

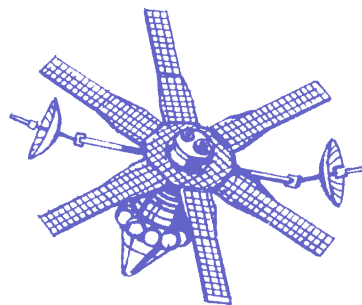
РУДОЛЬФ СВОРЕНЬ

ЭЛЕКТРОНИКА ШАГ ЗА ШАГОМ

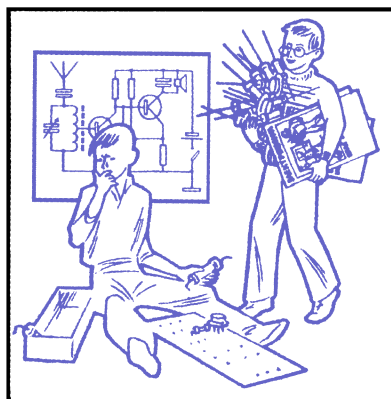
ОМК
ИЗДАТЕЛЬСТВО

ЭЛЕКТРОНИКА ШАГ ЗА ШАГОМ

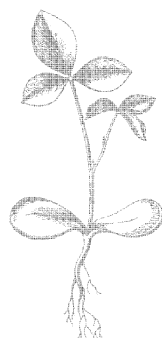
РУДОЛЬФ СВОРЕНЬ



ЭЛЕКТРОНИКА ШАГ ЗА ШАГОМ



ДМК
ИЗДАТЕЛЬСТВО
Москва, 2020



Scan AAW

УДК 621.3
ББК 32.85
C25

C25 Сворень Р. А.

Электроника шаг за шагом / под ред. Ю. В. Ревича. – М.: ДМК Пресс, 2020. – 512 с.: ил.

ISBN 978-5-97060-729-9

Первое издание практической энциклопедии радиолюбителя «Электроника шаг за шагом» Р. А. Сворень было выпущено в 1979 году и сразу завоевало широкую популярность. В него вошли рассказы об основах электротехники, электроники и радиотехники, о звукозаписи, телевидении, радиосвязи, электронной музыке, об автоматике и вычислительной технике.

Настоящая книга подготовлена на базе второго расширенного издания, вышедшего в 1986 году. Основная (учебная) часть оставлена почти без изменений; для привязки к современным реалиям и терминологии книга дополнена комментариями, а также «Практикумом» на основе современных компонентов.

Для широкого круга любителей электроники.

УДК 621.3
ББК 32.85

Все права защищены. Любая часть этой книги не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме и какими бы то ни было средствами без письменного разрешения владельцев авторских прав.

Материал, изложенный в данной книге, многократно проверен. Но, поскольку вероятность технических ошибок все равно существует, издательство не может гарантировать абсолютную точность и правильность приводимых сведений. В связи с этим издательство не несет ответственности за возможные ошибки, связанные с использованием книги.

ISBN 978-5-97060-729-9

© Сворень Р. А., 2020.

© Оформление, издание, ДМК Пресс, 2020

Рудольф Сворень – человек-легенда

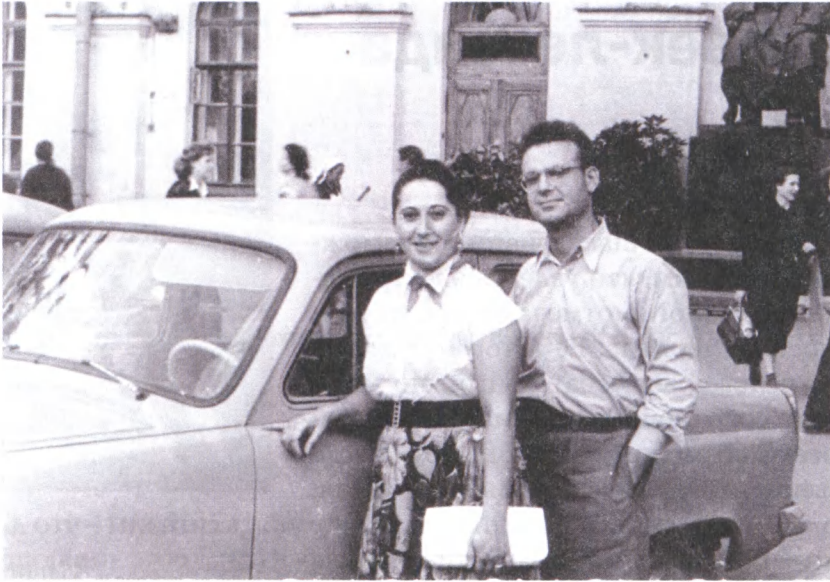


Книга «Электроника шаг за шагом», возможно, знакома многим, кто увлекся электроникой в детстве, многие отмечают простоту и доступность материала. Её автор – Рудольф Сворень, человек знаменательный, но мало известный современникам. Благодаря этому человеку, возможно, мир узнал о запуске искусственного спутника до самого события, и радиолюбители смогли подготовиться и принять сигналы – что для многих было запоминающимся событием на всю жизнь, объединяющим людей из многих стран.

Этот человек, чьи книги по основам радиоэлектроники выпускались миллионными тиражами в СССР, внес вклад в появление увлеченных электроникой людей. И мы хотели бы опубликовать его воспоминания из переписки Рудольфа Анатольевича с Русланом Тихоновым, инициатором переиздания этой книги.

Дорогой Руслан! Я обещал Вам рассказать о том, как из радиоинженера получился профессиональный журналист, и сейчас попробую это сделать. Начну с конца – в январе 1950 года (в возрасте 23 года) я окончил Одесский электротехнический институт связи (ОЭИС) с профессией «Инженер-электрик радиосвязи». По законам того времени получил назначение на работу в городе Фрунзе (ныне Бишкек) в Министерстве связи Киргизии. Перед отъездом из Одессы я поженился с пианисткой Екатериной Заславской, которая жила с братом, матерью и отчимом (отец погиб на фронте) в одной комнате на первом этаже старого одноэтажного дома недалеко от одесского вокзала. Мы с Катей прожили вместе более 50 лет.

Первое время во Фрунзе я работал дежурным инженером на местном средневолновом радиовещательном передатчике. Довольно быстро привык к непривычному – к совершенно непонятным мне радиопередачам на киргизском языке, к мощным усилительным лампам метровых размеров с водяным охлаждением, к высокой передающей антенне (высотой метров двести), к жестким правилам техники безопасности. Скажем к тому, что определенный тип объявлений (например, «На антенне работают люди») имеет право снять только лично тот человек, который объявление повесил. Я запомнил это на всю жизнь.



Рудольф Сворень и Екатерина Сворень (Заславская).
Москва, серебряная свадьба (1973 г.)

Передачик находился на окраине города, и ввиду отсутствия транспорта я добирался туда пешком (нам временно дали небольшую комнату в городе в трехкомнатной квартире) – утром час туда, вечером час обратно. Первое время жили очень трудно и бедно, скажу честно – просто голодали. Зарплата мизерная, в магазинах вообще ничего нет. Катя сразу пошла работать в детский сад музыкальным воспитателем, а я после работы ходил на приработки, в основном чинил приемники. Однажды, помню, попался раздолбанный СВД-9, я с ним дня три провозился и все же что-то сделал. Но от оплаты отказался – хозяин, судя по всему, был еще бедней меня.

Через несколько недель меня перевели в город, в небольшую лабораторию, которая занималась обслуживанием и совершенствованием (а в свое время и постройкой) первой, наверное, в нашей стране радиорелейной линии связи. Дело в том, что две крупные области Киргизии Джалал-Абадская и Ошская как бы отделены от остальной части республики и её столицы двумя большими горными хребтами. Чтобы попасть из Бишкека (Фрунзе) в Джалал-Абад или в Ош, нужно сделать огромную петлю и объехать эти горные хребты через Ташкент. Таким же длинным путем идут телефонные линии на столбах, и телефонная связь с «захребетными» областями, как правило, всегда была очень плохая. Но вот за несколько лет до моего появления во Фрунзе главный инженер Киргизского Министерства связи Константин Николаевич Ананьев показал, что не нужно обходить горные массивы, что через них проще перешигнуть. Была построена и начала работать радиорелейная линия Фрунзе (Бишкек) – Ош–Джалал-Абад всего с двумя промежуточными ретрансляторами на вершинах двух горных

хребтов. Наша промышленность радиорелейных станций в то время еще не выпускала, и Ананьев добыл трофейные немецкие приемопередатчики «Рудольф» и «Михаэль». Из них немцы собирали релейные линии, работающие на очень коротких (сантиметровых) волнах, по этим линиям Паулюс из окруженного нашими войсками Сталинграда напрямую разговаривал с Гитлером, вызывая недоумение наших радистов. Бишкекская лаборатория не только сделала для меня привычными диапазоны сверхкоротких радиоволн, она показала, как четко работают наши инженеры Оводов и Волчков, решая сложные или даже очень простые задачи. В данном случае они превращали одноканальный «Михаэль» в восьмиканальный – один переделанный аппарат позволял одновременно вести 8 разных телефонных разговоров вместо одного. У меня с Константином Николаевичем были прекрасные человеческие и деловые отношения, я с радостью обнаружил в интернете, что через тридцать лет правительство все же оценило его, присвоив звание Героя Социалистического Труда и назначив руководителем Управления радиорелейных магистралей и телевидения Министерства связи страны.

После двух лет работы во Фрунзе мы с Катей оформили отпуска и поехали в Одессу, к морю. Поехали, как обычно ездят, – через Москву. А там почти все родственники и друзья-москвичи уговаривали нас никуда не уезжать, так как лучшего города, чем Москва, в России нет – и по стилю жизни, и особенно по снабжению. Кто-то даже нашел для меня работу с жильем. Я съездил, посмотрел, поговорил с тамошним начальством и согласился. А через месяц мы переехали в Москву, вроде бы навсегда.

Организация, в которую я пошел работать, находилась в пяти минутах ходьбы от железнодорожной станции Расторгуево, на этой станции останавливались электропоезда, которые шли из Москвы дальше или возвращались в город. До городской станции Павелецкая, где уже были входы в метро, поезд из Расторгуева шел примерно полчаса. Называлась моя организация «Центральная школа технической подготовки ЦШТП ДОСААФ СССР».

В эту школу со всей страны местные радиоклубы, шоферские школы и группы противовоздушной обороны (ПВО) посылали своих преподавателей на двухмесячные курсы повышения квалификации. Так что в ЦШТП круглый год было от 3 до 12 разных (трех разновидностей) учебных групп по 20 человек в каждой. Должность моя называлась «Старший командир-инструктор радиокурса» – несколько часов в день я проводил на радиокурсе занятия по основам электро- и радиотехники. При этом оказалось, что сами курсанты помогли мне в дополнение к институтским запасам (не слишком, кстати, богатым) добавить или наново придумать описания и объяснения, более простые и более понятные людям без специальной подготовки. Учение мое в основном состояло из того, что курсанты (в основном бывалые военные радисты) задавали мне вопросы, а я придумывал, как им ответить. Бывало, кто-нибудь такой вопрос задаст, что я дома до полночи просиживал в поисках правильного и, главное, понятного от-

вета. Одним словом, не знаю, чему я научил своих слушателей (хотя сами они говорили, что многому), но радиокурс ЦШТП за полгода приучил меня к тому, что рассказывать что-нибудь какой-либо группе слушателей нужно только на том языке, который они хорошо понимают. Оказалось, что только на этом языке, на отработанных его разновидностях, могут общаться со своими читателями школьные учебники, телевизионные диски, рассказывающие об учебных опытах, научно-популярные журналы.



Студенты и преподаватели Радиотехнического отдела Центральной школы технической подготовки ДОСААФ СССР (Р.А. Сворень – третий слева в первом ряду) (1953 г.)

Кстати, дальнейшее активное изучение и использование этого языка связано для меня с переходом через 4 года на работу в журнал «Радио», который в те времена выпускало издательство Досааф. Я был переведен в журнал по просьбе его редакции в связи с нарастающими проблемами в отделе писем. Сотрудница отдела регулярно выполняла план, отвечая на 8 писем в день, а гора непрочитанных писем при этом все росла и росла. В первый свой рабочий день я ответил на 100 писем, и эта цифра не связана с какими-либо моими личными талантами – просто, открыв письмо, написанное на знакомом языке, я сразу понимал, что в нем спрашивается, и знал, что надо ответить. Думаю, что высококлассный специалист с абсолютным знанием математики большинство писем тут же бросил бы в корзину для мусора, как непонятную ему бессмыслицу. Кончилось дело тем, что через пару недель мне поручили формировать и редактировать

большой отдел (50 журнальных страниц из 64), где публиковались любительские схемы и конструкции, а также описание новых промышленных моделей. Первые 14 страниц каждого номера были отданы, так сказать, политическому отделу – он в основном писал о работе радиоклубов и о любителях, работающих в эфире.

Газеты часто напоминали, что американцы готовятся в ближайшее время запустить искусственный спутник Земли, первый в мире аппарат для перемещения в космическом пространстве. Нигде не сообщалось, что и в нашей стране ведутся работы в этой области, очевидно, считалось, что сначала нужно дело сделать, а потом рассказывать о нём. Мы с нашим старшим редактором Еленой Петровной Овчаренко написали письмо «на самый верх», доказывая, что нужно рассказать о предстоящем запуске спутника и в нашей стране. Тем более что в этом случае журнал «Радио» сможет сформировать большую группу радиолюбителей, принимающих сигналы спутника. Не знаю, какими путями перемещалось наше письмо, но ответ появился мгновенно – по указанию академика Сергея Павловича Королева в одном из институтов были подготовлены для журнала «Радио» три статьи о советских спутниках и их рабочих частотах. Мы эти статьи, конечно, сразу же опубликовали, добавив к ним свои быстрые разработки – простейшие приемники и совсем уже простые приставки к заводским вещательным приемникам для приема радиосигналов со спутника. Советский спутник был запущен 4 октября 1957 года, он оказался первым в мире и открыл, как принято говорить, новую, космическую эру в жизни человечества. А если кто-нибудь из иностранцев начинал вспоминать засекреченность этого русского проекта, то иностранному исследователю советовали читать журнал «Радио», который можно купить в любом газетном киоске.

Мой переход в редакцию совпал по времени с невиданно быстрым прогрессом радиоэлектроники – появились и совершили переворот в схемотехнике серийные транзисторы, а вскоре их высокочастотные и достаточно мощные типы. Широко осваивались сантиметровые и дециметровые диапазоны. Были созданы новые технологии производства транзисторов, а затем и интегральных схем – достаточно вспомнить, что уже несколько лет выпускаются размером с почтовую марку интегральные схемы, в каждой из которых несколько миллиардов (!!!) сложным образом точно соединенных деталей. А ведь для того, чтобы получился миллиард песчинок, нужно собрать 6 тысяч мешков песка. Отметим, что вся эта новейшая техника выпускалась, как говорится, без прикосновения человеческой руки – её делали и проверяли автоматы.

Думаю, не только передо мной встал в те годы вопрос – как познакомить людей с этим шквалом новой электроники. Когда рассказать о ней? О чём конкретно? Насколько подробно? Я не мог ответить на эти вопросы потому, что никак не мог разобраться в обстановке. Не мог разобраться, а решение почему-то принял правильное – я стал писать детские книжки об основах электро- и радиотехники. Первые две книжки вышли в 1963 году – мне тогда было 36 лет.

Книжки эти были совершенно разные, но главный герой у них был один и тот же – радиоприемник. Во-первых, изучая его, юный радиолюбитель становился профессионалом. А во-вторых, он своими руками практически бесплатно мог сделать то, за что в магазине нужно платить. Каждый любитель наверняка запомнил счастливый момент, когда первый собранный им приемник чуть ли не сразу же заговорил или запел. А вот книги об основах электротехники и электроники – дело не быстрое, я занимался ими 50 лет, и последняя из этих книг «Электричество шаг за шагом» была напечатана в 2012 году. Всего же я написал и выпустил 13 больших книг (включая два перевода на другие языки и одну книгу, написанную в соавторстве), их общий тираж – более 8 миллионов экземпляров. При этом сравнительно медленное создание и публикация книг практически не влияли на бурные события в личной и деловой жизни – под влиянием нарастающего своего интереса ко многим различным областям науки я ушел из журнала «Радио» и несколько лет жил в режиме свободного журналиста. Печатался в газетах и журналах «Известия», «Неделя», «Правда», «Комсомольская правда», «Техника молодежи», «Вечерняя Москва», «АПН» и многих других. Однако пришел момент, когда достоинства свободной жизни перестали перекрывать её недостатки, и в 1964 году я вернулся на работу в стабильный журнал – на этот раз в журнал «Наука и жизнь», считавшийся в те времена лидером всех научно-популярных изданий.



Дважды Герой Советского Союза, летчик-космонавт СССР Алексей Архипович Леонов в гостях у редакторов журнала «Наука и жизнь» – у главного редактора Игоря Константиновича Лаговского (второй слева), его заместителей Рады Никитичны Аджубей и Рудольфа Анатольевича Свореня (1969 г.)



Рудольф Анатольевич Сворень (слева) занят тем, что считает главным делом, – обсуждает с коллегами – разработчиками и будущими издателями планы своих учебных книг и схемы простейших аппаратов, помогающих понять основы электроники (1969 г.)



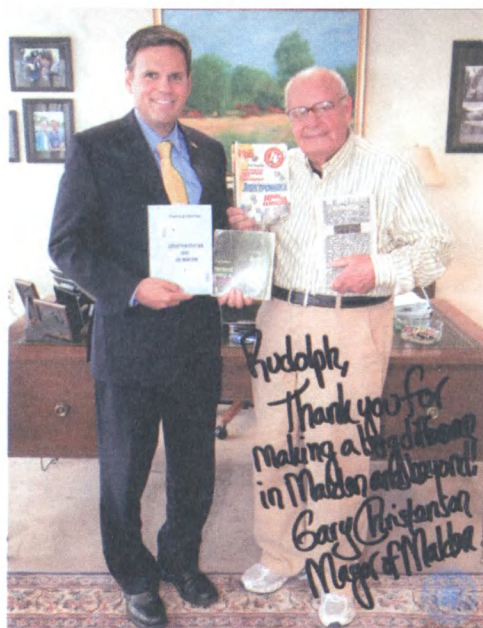
Руководитель разработчиков Р. А. Сворень демонстрирует известным ученым страны и мира академикам М. В. Келдышу, В. А. Котельникову, Н. Г. Басову, А. М. Прохорову и др. созданные его конструкторской группой электронные игрушки, управляемые звуковыми импульсами (1970 г.)



На большой выставке, рассказывающей о развитии разных направлений советской электроники, побывал Председатель Совета Министров СССР Алексей Николаевич Косыгин (глава Правительства страны). Он, неожиданно для некоторых, провел много времени у стенда электронных конструкторов и игрушек, а беседа с руководителем разработчиков Р. А. Своренем, отметил большие возможности радиолюбителей в содействии прогрессу техники (1970 г.)

В этом журнале я поочередно по несколько лет заведовал несколькими ведущими отделами, дольше всего отделом физико-математических наук. А лет через двадцать меня утвердили членом редколлегии и вскоре назначили заместителем главного редактора. Вот здесь уж свободного времени совсем не стало — так или иначе я участвовал в подготовке каждого номера целиком и дважды читал каждый номер «насквозь». Так бы оно, наверное, продолжалось до полного ухода на пенсию, если бы не одно чрезвычайное событие — в апреле 1999 года я уехал в США без какого-либо понимания, вернусь ли. Уехал я потому, что очень болел, сердце практически не работало — я уже и десяти шагов не мог пройти, чтобы не остановиться и передохнуть. А назначенную мне операцию на открытом сердце — замену сердечного клапана — в наших больницах еще не делали. Состояние мое резко ухудшилось после того, как из-за неизлечимой онкологии ушла из жизни любимая жена Екатерина.

Но не будем вспоминать негативные подробности, через месяц после приезда я уже жил в неплохой квартире в небольшом городе Малден, входившем в состав Большого Бостона. А еще через два месяца (после операции) я вернулся к жизни здорового человека и стал активно разрабатывать проблему, о которой раньше мог лишь изредка подумать из-за отсутствия свободного времени. Проблему эту можно было бы назвать так — «Создание новой системы среднего образования». Типичным примером такой системы можно назвать нашу нынешнюю российскую среднюю школу от 1-го до 11-го класса. Её задача — помочь школьнику создать представление о мире, в котором мы живем, создать, как её часто называют, картину мира. Делается это путём изучения отдельных школьных предметов, например биологии, химии, истории, геометрии, грамматики и других, — из этого потом и складывается картина мира. Но складывается часто не очень удачно — как правило, 70–80 процентов школьников не получают в школе знаний, которые им хотели бы передать учителя и учебники. При этом школьники часто перегружены занятиями и очень устают. Просмотрите, например, нынешние учебники биологии или химии — просто страшно от того, что школьники должны всё это знать. Причем всё это проблемы, существующие в школах многих разных стран, в частности России и Соединенных Штатов.

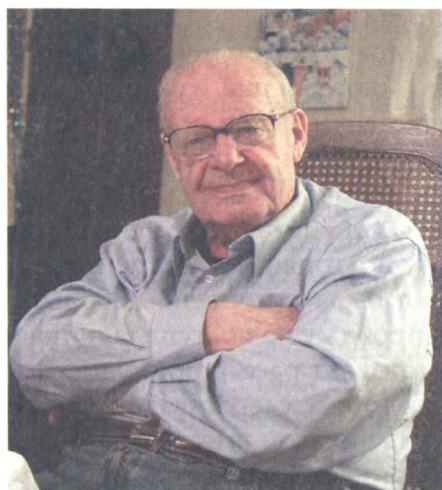


Рудольф Сворень на приеме у Гари Христиансена, мэра города Малден (часть Большого Бостона, США) (2015 г.)

Мне кажется, что пришло время для серьезных изменений в среднем образовании, которые избавят его от нынешних недостатков. Конечно, создавать и обсуждать систему образования, а тем более изменения в ней, должны профессионалы-педагоги, но выскажу и несколько своих соображений по этому поводу. Во-первых, всё учебное время нужно разделить на две примерно равные части – на 1-ю и 2-ю части системы среднего школьного образования – 1ССШО и 2ССШО. Часть 1ССШО отдается формированию картины мира, а часть 2ССШО – углубленному изучению (в небольших группах) того, что понадобится в будущей профессии или для поступления в институт.

Занимаясь школьной проблемой, я прежде всего пытался написать учебную книгу «Самое главное понять самое главное» (сокращенно книга «Самое главное...») для 1ССШО, то есть для создания картины мира. Книга «Самое главное...» должна быть такая, чтобы её даже без помощи учителя легко мог читать каждый школьник. Пока у меня получилась огромная рукопись объемом 1500 страниц. Чтобы дописать её, отредактировать, разделить на 10–12 нормальных книжек и укомплектовать иллюстрациями, понадобится много времени, думаю 5–6 лет. Я не стал всё остальное откладывать и сразу начинать столь большую по нужному времени работу, я начал готовить экспериментальное издание шести сравнительно небольших писем-книжечек (50 страниц текста и примерно столько же страниц иллюстраций в каждой) с общим названием «Мир устроен очень просто». Часть из этих писем-книжечек уже готова, и надеюсь завершить эту работу за 2 года. Надеюсь, что 2 лет хватит, чтобы несколько изменить и улучшить вполне хорошие последние мои книжки об электричестве и электронике. И наконец, 2 года уйдет, чтобы организовать выпуск простых конструкторов для радиолюбителей, возможно, с использованием первых книжек про приемники.

Как видите, план действий есть, и что полезное для людей можно сделать, вполне понятно. Единственное, что дает повод для размышлений, – так это то, что примерно через полтора года мне будет (по крайней мере должно быть) девяносто лет.



Р. Сворень
03.12.2015

Как книга

«Электроника шаг за шагом»

обрела новую жизнь

История переиздания книги «Электроника шаг за шагом» началась летом 2015 года. Тогда, по выходным, я вёл занятия в кружке электроники для школьников. В список рекомендуемой литературы для кружковцев я всегда включал эту книгу Рудольфа Анатольевича Свореня. Однако с каждым годом получить бумажную версию книги становилось все сложнее – постепенно она исчезала из библиотек и стала редкостью даже у букинистов. К тому же ряд сведений в книге уже стал неактуальным, электронные схемы для практических работ тоже нуждались в адаптации к доступной элементной базе и интересам нынешних школьников, поэтому я решил узнать – можно ли переиздать ее, сохранив дух старой школы, но добавив новую информацию в свете современных достижений электроники? Нашел контакты автора книги, он к тому времени больше 15 лет жил в США, связался с ним. Оказалось, что, несмотря на преклонный возраст, Рудольф Анатольевич сохранил ясный ум и прекрасную память и по-прежнему писал книги.

Мою идею он поначалу встретил скептически, мол, книга устарела, нужно многое в ней изменить, а он сейчас занят другими делами. Однако со временем (а мы после этого общались с ним великое множество раз по телефону и электронной почте) мне всё же удалось убедить его начать подготовку к переизданию. Выяснились и новые интересные детали: оказалось, что недавно он написал новую книгу – «Электричество шаг за шагом» (не повторяет «Электронику...», посвящена основам электротехники), но она была выпущена небольшим тиражом благотворительным фондом, в продажу не поступала и практически не дошла до читателя. Безусловно, этот факт расстроил Рудольфа Анатольевича и служил дополнительным фактором, сдерживающим его работу по переизданию «Электроники...». Ведь никакой писатель не хочет писать, как говорят, в стол. Пообещав, что я договорюсь о переиздании уже двух книг, я начал действовать.

Началось общение с разными издателями, к сожалению, большей частью бесплодное. В это же время я создал страницу в Википедии, посвященную Р. А. Свореню. А вместе с Ильей Немихиным из Хакспейса Екатеринбурга мы опубликовали серию статей на Хабре (habr.com) с воспоминаниями Рудольфа Анатольевича о том, как он прошел путь от радиоинженера до писателя. Чтобы убедиться – действительно ли нужна современному читателю эта книга, мы объявили регистрацию желающих приобрести новое

издание книги «Электроника шаг за шагом». Таких желающих набралось около двух тысяч человек, неплохой тираж для технической книги по нынешним временам. Важным в этой инициативе оказалось то, что по следам этих публикаций к нам обратился владелец издательства «ДМК Пресс» Дмитрий Мовчан, который и предложил издать эти книги.

К сожалению, болезнь, а затем и смерть Рудольфа Анатольевича оставила процесс переиздания. Лишь благодаря поддержке наследников писателя удалось продолжить эту работу. В конце 2018 года вышло в свет второе издание книги «Электричество шаг за шагом», а в 2019 году началась работа над подготовкой к печати нового издания и самой известной книги Р. А. Свореня – «Электроника шаг за шагом». Предстоял большой объем работы как для художника – требовалось заново воссоздать все замечательные рисунки книги, так и для редактора. Напомню, что сам Рудольф Анатольевич был против репринтного издания книги и хотел ее переработать, исходя из современных реалий. Поэтому для редактирования книги я предложил пригласить писателя Юрия Всеволодовича Ревича. Он – автор нескольких популярных книг по электронике для начинающих, в том числе для детей, и я надеялся, что он сможет, сохранив стиль и оригинальную авторскую манеру подачи материала, актуализировать информацию и практические схемы книги.

И вот наконец моя мечта сбылась! Вы держите в руках новое издание книги «Электроника шаг за шагом». В своё время она приобщила к увлечению электроникой тысячи девчонок и мальчишек, дала им первые знания о том, как всё устроено в этом, поначалу казавшемся им загадочным мире электронных устройств. Надеюсь, и новое поколение юных электронщиков с помощью этой книги, при поддержке своих наставников в кружках и родителей дома, сделает свои первые шаги в занимательный мир электроники, достижения которой за последний век полностью изменили жизнь человечества. А затем уже уверенно, шаг за шагом, пойдёт по большой дороге создания новых электронных устройств и удивительных технологий на их основе.

Хочу выразить благодарность всем тем, кто поддержал идею переиздания книги, кто писал искренние отзывы о книге, присылал свои советы и рекомендации для нового издания. И лично от себя хочу сказать большое спасибо Илье Немихину, Ольге Басовой, Артемию «Di Halt» Исламову (проект easyelectronics.ru), Владимиру Чуднову (главный редактор журнала «Радио»), Александру Бениаминову (внук Р. А. Свореня), Юрию Ревичу, Дмитрию Мовчану. Именно благодаря вам эта замечательная книга обрела новую жизнь.

Руслан Тихонов
svorenbook@gmail.com
Май 2020 г.

Предисловие от редактора

Книга Рудольфа Анатольевича Свореня «Электроника шаг за шагом», первый вариант которой вышел в далеком 1979 году, в свое время произвела настоящую революцию в радиолюбительском деле. В ней впервые подробно и на доступном уровне были изложены основные принципы работы электронной аппаратуры практически всех существовавших в то время разновидностей – от элементарных радиоприемников до ЭВМ и даже радиолокаторов. Краткую историю развития этой книги автор излагает сам в конце последней главы.

В чем ценность этой книги для сегодняшнего читателя? Современные любители электроники лихо пишут программы для контроллеров на языках C/C++ и Python и знают, как создать мини-сервер с выходом в интернет, а любимое когда-то развлечение специалистов по искусственному интеллекту – создание движущегося робота-тележки, обходящего препятствия, – ныне предмет для занятий в детских кружках по робототехнике. Но при этом они совершенно теряются, когда нужно посчитать сопротивление ограничительного резистора для светодиода, и не умеют правильно подключить транзистор в простейшем ключевом режиме. Книга Р. А. Свореня дает необходимую всем электронщикам базовую информацию по широкому кругу вопросов: от основ электротехники до принципов работы усилителей и генераторов сигналов. Пусть вам никогда не придется самостоятельно конструировать, например, радиоустройства, но понимание принципов работы радиосвязи и транзисторных усилителей звука значительно облегчит обращение с готовыми модулями для этой цели.

Для характеристики своей целевой аудитории Рудольф Анатольевич употребляет термин «радиолюбительство». Интересно, что такое название существует только в русском языке, прямых аналогов в английском и других иностранных языках не находится. Этот термин возник в нашей стране еще в 1930-е годы, так как в то время никакой другой электронной аппаратуры, доступной для повторения на любительском уровне, кроме радиоприемников, не существовало. Радиолюбительство в буквальном смысле термина получило тогда широкое распространение, так как промышленность явно отставала от потребностей населения. Со временем прилавки наполнялись бытовой техникой, и радиолюбительство последовательно прошло ряд этапов: сначала центр внимания переключился на качественный звук, телевидение, затем и на различную домашнюю автоматику. Часть этих этапов, соответствующая времени выхода книги, получила отражение в ее тексте.

Надо отметить, что при всем этом собственно «любители радио», то есть те, кто занимается любительской радиосвязью и радиоспортом, за все

эти годы никуда не исчезли. Это признанные во всем мире разновидности хобби, по которым проводятся соревнования, выходят специализированные журналы и создаются тематические сайты. Однако эта сторона «радиолюбительства» по понятным причинам практически не нашла своего отражения в книге Р. А. Свореня – на начальном уровне эти увлечения оказываются недоступны, тут требуется более основательная теоретическая и практическая подготовка.

Настоящее издание подготовлено на базе второго издания полной версии книги, вышедшего в 1986 году; в последних главах добавлены некоторые дополнения из издания 2001 года. Разумеется, с тех пор сама по себе электроника принципиально изменилась, и далеко не все, рассказанное автором в тех обстоятельствах, актуально и сегодня. Однако при переиздании книги мы не стали устранять многие явные архаизмы изложения, лишь сопроводив их примечаниями для привязки к современным реалиям и современной терминологии.

Подробные описания многих разделов радиолюбительства, представляющие сегодня лишь исторический интерес, пришлось кардинально сократить или удалить вовсе. Если будет позволено такое сравнение, то многим было бы интересно узнать, как люди каменного века добывали огонь трением, но едва ли один человек из многих тысяч соберется повторить этот опыт. Звукозапись, например, успела со времен 1960-х годов трижды сменить носители (а если считать с 1950-х, то и четырежды), стала полностью цифровой и в конце концов избавилась от носителей вовсе, став чисто информационным феноменом. Фильмы пока еще можно приобрести на DVD-дисках, но дело быстро идет к тому, что киноиндустрия повторит судьбу звукозаписи, портал YouTube – тому свидетельство. Принципиально изменились технологии телевидения; широко распространилась не существовавшая во времена первых изданий книги домашняя видеозапись, причем также успевшая пройти ряд этапов, от отдельных и довольно дорогих аналоговых видеокамер до миниатюрных цифровых, встроенных в мобильные телефоны. Современная автоматика и связь немыслимы без микроконтроллеров и микропроцессоров, перевернувших лицо не только компьютерной индустрии, но и практически всех областей техники, включая бытовую.

Потому при подготовке данного издания почти в неприкосновенности сохранена бóльшая половина книги (вплоть до главы 12 включительно), посвященная общим принципам функционирования электронных устройств, где исправлены лишь ошибки и неточности автора, а также заменены или снабжены комментариями и дополнениями явные архаизмы. Пришлось полностью отказаться от практической части в главах, посвященных радиовещанию, телевидению и звукозаписи. Не потому даже, что конструированием подобных устройств любители в настоящее время практически не занимаются – гораздо существеннее то, что изменились

сами принципы работы таких устройств. Тем не менее теоретические основы этих разделов электроники по-прежнему могут быть интересны (на них основываются и современные подходы). Эти разделы сведены в одну главу (глава 13). По той же причине сохранены главы об электронных музыкальных инструментах, автоматических устройствах и даже компьютерах, которые в 1986 году еще только выходили из пеленок. Сохранена также во многом актуальная глава об источниках питания (глава 17); она в конце дополнена отдельным разделом о современных интегральных стабилизаторах.

Книга в оригинале сопровождалась большим количеством практических примеров различных устройств, а также необходимыми справочными данными по компонентам радиоаппаратуры, называвшимся тогда еще попросту радиодетальями. Этот раздел тогда был очень важен, потому что справочники по компонентам в то время были жутким дефицитом и далеко не всем доступны. Подобные разделы книги удалены полностью, а практические примеры созданы заново на современном материале.

Вместо сложного деления текста на теоретическую (в оригинале соответствующие подразделы помечены буквой Т с номером), справочную (помечены буквой С), а также практические примеры, зачастую никак не связанные с окружающим их текстом (помечены буквой К), оставлены лишь нумерация подразделов и выделение их первой фразы. Некоторые необходимые по контексту справочные данные включены в основной текст. При ссылках из других мест на нужный подраздел текста, что составляет одно из несомненных достоинств книги Р. А. Свореня, приводится номер главы и подраздела (например, «гл. 1; 7»). Заново подготовленные практические примеры, чтобы не путать их с авторским текстом, выделены в особые разделы в конце глав, под названием *Практикум*. Рисунки теперь имеют свою нумерацию в каждой главе, включающую номер главы; при ссылке на рисунок приводится его номер и далее номер нужной картинки на этом рисунке, как и было у автора (например, «рис. 3.10; 4»).

Кроме того, на авторских иллюстрациях в книге изменена полярность питания на более привычную современному читателю: питание на схему подается от положительного полюса источника, а «общий провод» подключается к отрицательному. В соответствии с этим изменением на рисунках изменена полярность подключения компонентов (батарей, диодов, электролитических конденсаторов и пр.), а также *p-n-p*-транзисторы заменены на *n-p-n*.

Отдельно отметим, что упомянутые автором в главе 1 графопостроители (плоттеры) с пером как инструмент для рисования чертежей под управлением компьютера давно исчезли из обихода (в настоящее время они употребляются в основном для раскройки различных материалов). К сожалению, введенный тогда стандарт упрощенных графических обозначений почему-то таким и остался. Это касается не только отечественных ГОСТов,

но и зарубежных стандартов. Заново введенные практические примеры также следуют введенному автором книги правилу – в них употребляются более выразительные обозначения, пусть и не всегда точно соответствующие официальному стандарту.

К данному изданию приложен небольшой список литературы, в которой читатель может найти дополнительные сведения.

Ревич Ю. В.

Т – ТЕКСТ (ТЕОРИЯ)
Р – РИСУНКИ
К – КОНСТРУКЦИИ
С – СПРАВОЧНЫЙ
МАТЕРИАЛ



ГЛАВА 1

Предисловие- путеводитель

1. Эта книга для радиолюбителей, для тех, кто сам конструирует приемники, усилители и другую электронную аппаратуру¹. Есть немало загадочных, необъяснимых явлений, немало тайн, до которых еще не успела добраться наука. В их числе и радиолюбительство. Как, например, объяснить такое: на магазинных полках полно прекрасных всеволновых приемников, а начинающий радиолюбитель, путаясь в проводах, обжигаясь о жало паяльника, собирает свой первый шедевр – приемник, который в лучшем случае будет принимать две-три местные станции. Забыты друзья, на самом интересном месте заброшен детектив, мобилизованы последние финансовые ресурсы... И все это ради той радостной минуты, когда из громкоговорителя зашуршит едва слышное: «...е-е-е-если б знали вы-ы-ы, как мне доро-ги-и-и-и...»

Пройдут годы, появятся термоядерные электростанции и личные мини-вертолеты, космонавты высадятся на Марсе, будут раскрыты загадки человеческой памяти и секреты зарождения жизни. К тому времени, возможно, будет проведен и строгий научный анализ притягательных сил радиолюбительства... Пока же по этому поводу можно лишь высказывать предположения. К радиолюбительскому конструированию наверняка влечет естественная потребность творить, создавать, строить. Она в самой человеческой природе, запрограммирована в нас, закреплена тысячелетиями. Так же, как не может человек жить без воды и пищи, без воздуха, вот так же не может он без интересного дела. А радиолюбительство – конечно же, дело интересное, творческое. Наука на грани искусства.

Наверняка привлекает радиолюбительство и своей полезностью, тем, что позволяет легко приобщиться к самой современной технике. Можете вы построить дома настоящий синхрофазотрон? А космический корабль? Атомный реактор? Самолет? Не можете... А вот настоящий радиоприемник можно изготовить прямо на краешке кухонного стола.

К радиолюбительству тянется не только тот, кто хочет связать свое будущее с электроникой. Сегодня электронная техника применяется повсюду,

¹ Уточнения к определению термина «радиолюбительство» см. в «Предисловии от редактора» (здесь и далее примечания редактора).

с ней постоянно встречаются летчик и врач, биохимик и экономист, металлург и музыкант. И каждый, кто занимается практической электроникой, как говорится, в порядке любительства, прекрасно понимает, что это приятное дело окажется полезным для человека любой профессии. И вот еще что: радиолубительство не только учит, но в сильной мере и воспитывает. Оно, например, делает человека более сообразительным, находчивым, изобретательным. Более собранным, четким, аккуратным – несколько раз пострадаешь из-за собственной небрежности, и, смотришь, появляется привычка тщательно проверять сделанное, работать быстро, но не спеша. Потеряешь час на поиски какой-нибудь детали, и совсем уже по-иному звучат слова «порядок на рабочем столе» или «организация рабочего места».

Собирая электронные схемы, налаживая их, выискивая какую-нибудь неисправность, вы учитесь логически мыслить, рассуждать, учитесь использовать имеющиеся знания, добывать новые. Учитесь учиться.

Вспоминается, как известный советский радиофизик академик Александр Львович Минц, принимая специалистов на работу, всегда отдавал предпочтение радиолубителям. И не только за конкретные знания, но главным образом за умение мыслить, работать творчески, изобретать.

2. В книге имеются описания некоторых схем и конструкций для самостоятельного изготовления. В большинстве случаев это схемы отдельных узлов и блоков, из которых можно собрать совсем уже огромное множество простых и сложных схем, подобно тому как дети из кубиков собирают самые разнообразные «здания»².

Каждый схемный блок, как правило, связывает с внешним миром всего несколько проводов (на схемах они чаще всего заканчиваются стрелками). Это, в частности, провод «Вход» («Вх»), который подключается к предыдущему блоку, провод «Выход» («Вых»), к которому подключается последующий блок, провод «Плюс» («+»), к которому подключается «плюс» источника питания (или провод с таким же обозначением «+» другого блока), и провод «Общий» («О» или \perp), к которому подключаются «минус» источника питания и все другие провода с обозначением «Общий».

Вскоре вы научитесь и сами компоновать сложные схемы из простых типовых блоков, используя для этого интересные элементы не только из этой книги, но и из других источников, из различных любительских и промышленных электронных схем.

Здесь, пожалуй, уместно сделать важное предупреждение. Так уж случилось, что система условных изображений и сокращенных буквенных обозначений радиодеталей менялась несколько раз. В результате в радиолубительской литературе разных лет одни и те же детали изображаются

² Описания законченных конструкций, основанных на устаревшей элементной базе, из книги удалены. Частично этот пробел позволяет восполнить книга [7]. Несколько практических примеров, привязанных к тематике соответствующих разделов, читатель может найти в конце глав 4, 9–11, а также 14–17 этой книги.

и обозначаются по-разному. Правда, изображения, как правило, очень похожи, но все же различия есть и конденсатор с резистором не спутаешь. Последние изменения были предприняты в эпоху появления машинной графики, когда чертежи и схемы выполнялись на специальном графическом устройстве – графопостроителе (плоттере). Графопостроителю проще делать чертеж линиями одинаковой толщины, и в связи с этим была введена система условных обозначений, где и соединительные провода, и обмотки катушек, и все элементы других деталей изображаются сравнительно тонкими одинаковыми линиями. Для рисунков этой книги выбраны условные изображения деталей, несколько отличающиеся от стандарта, но зато более броские и выразительные, в основном за счет использования линий разной толщины (см. рис. 1 и 2, где приведены некоторые условные обозначения на схемах).

Примечание редактора. В переводной литературе, а также в многочисленных интернет-источниках современный читатель может встретить схемы, выполненные по американско-японским стандартам (европейские более соответствуют отечественным). В них отличается начертание многих элементов – резисторов, электролитических конденсаторов, логических микросхем и пр., причем отметим, что отечественные более логичны и проще выполняются графически (см., например, рис. 1.1; 1). Но это не должно смущать читателя: американские схемы вполне понятны тому, кто разобрался в отечественных.

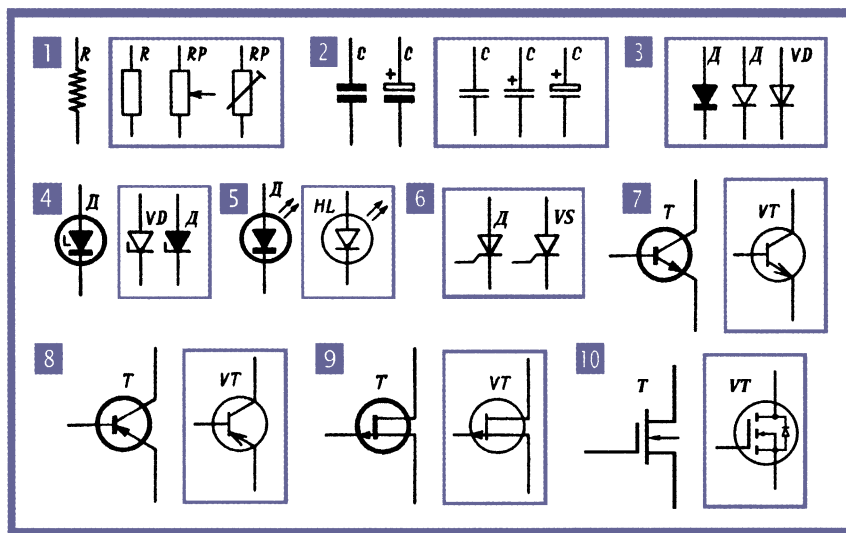


Рис. 1.1. Некоторые условные обозначения на схемах (вне рамки – реже употребляющиеся): 1 – резисторы (слева вне рамки – американско-японское обозначение); 2 – конденсаторы (слева – неполярный, справа – полярный электролитический); 3 – диод; 4 – стабилитрон; 5 – светодиод; 6 – тиристор; 7 – транзистор *p-n-p*; 8 – транзистор *p-n-p*; 9 – полевой транзистор с *p-n*-переходом; 10 – полевой транзистор с изолированным затвором (MOSFET)

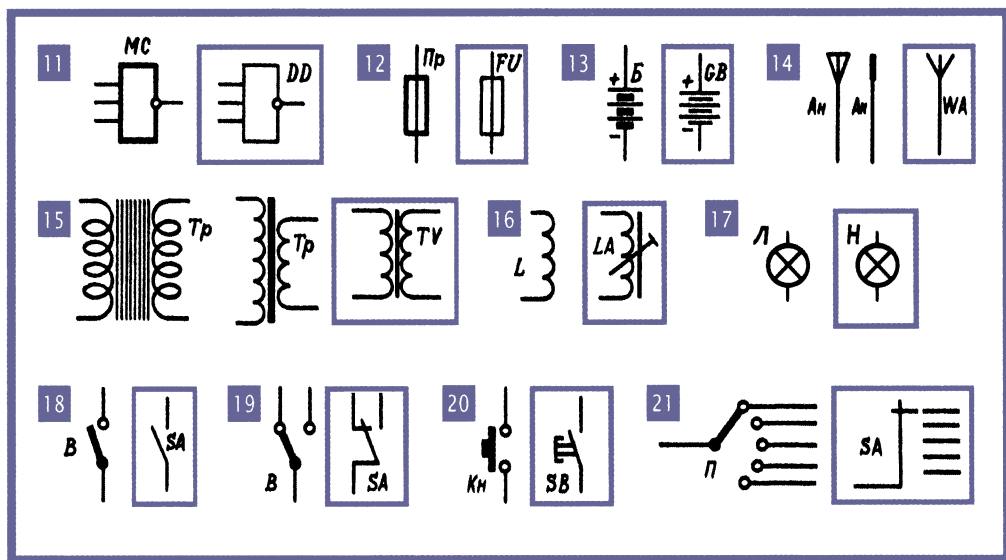


Рис. 1.2. Некоторые условные обозначения на схемах (продолжение):

- 11 – цифровая интегральная микросхема (логический элемент);
- 12 – предохранитель; 13 – химический источник тока, 14 – антенна;
- 15 – трансформатор; 16 – катушка индуктивности (дроссель; в рамке – дроссель с подстройкой индуктивности); 17 – лампа накаливания; 18 – выключатель;
- 19 – переключатель двухпозиционный; 20 – кнопка на замыкание;
- 21 – переключатель многопозиционный

3. В книге есть некоторое количество справочных материалов, в основном теоретического характера. Некоторые справочные данные, такие, скажем, как расчетные формулы, можно найти на рисунках, относящихся к основному тексту, и в самом этом тексте, о котором хочется сказать особо.

4. Книга позволяет сочетать практическую работу с изучением основ электроники, продвигаться вперед от простого к сложному. Есть два способа научить человека управлять автомобилем. Первый способ такой. Будущий водитель сразу садится за руль, и ему дают конкретную инструкцию: «Хочешь ехать вперед – передвинь этот рычаг на себя и влево, хочешь ехать назад – передвинь его на себя и вправо. Прежде чем переставлять рычаг, нажми вот эту левую квадратную педаль, а когда переставишь рычаг, отпусти ее. Хочешь ехать быстрее – надавливай на эту продолговатую педаль, хочешь притормозить – дави на эту правую квадратную педаль. Вот и все. Поехали...»

А вот другой способ. Человеку, который хочет водить машину, нужно сначала рассказать, хотя бы в самых общих чертах, о том, как этот автомобиль устроен. Как работает двигатель, как вращение передается колесам,

что происходит при переключении скоростей, при нажатии на педаль сцепления или газа, рассказать о всех основных процессах, которые происходят во время управления машиной. И только после такого рассказа будущему водителю показывают, какие ручки и педали управляют теми или иными агрегатами, объясняют, в каких случаях и как ими пользоваться.

Эти два варианта освоения автомобиля очень похожи на два типичных пути, которыми радиолюбители идут к конструированию электронных приборов. Первый начинается с того, что человек берет в руки паяльник и по готовому описанию со схемой пытается сразу же собрать приемник или усилитель, не вдаваясь в такие мелочи, как принцип действия тех или иных приборов и назначение тех или иных элементов схемы. А вот другой путь – изучение основ электротехники и электроники, а затем уже со знанием дела практическая работа, конструирование электронных установок и аппаратов.

Если разобраться строго, то правильнее и разумнее идти вторым путем – от теории к практике, от понимания к действию. Но знакомство с основами электроники – дело не простое и не быстрое, тем более что предварительно нужно укрепить фундамент, вспомнить основы электротехники. А человеку не терпится, хочется побыстрее заняться делом – сверлить, паять, налаживать, побыстрее сделать что-нибудь такое, что само поет, играет, мигает лампочками. Хочется побыстрее нажать на педали и двинуться в путь.

С учетом всех этих «хочется» и «нужно» книга построена так, что допускает некий, если можно так сказать, гибридный путь в радиолюбительство. Из всего множества практических схем и конструкций выделено несколько, рассчитанных на самого что ни на есть начинающего радиолюбителя, на того, кто в части радиоэлектроники находится на нулевой отметке³. Описания этих схем и конструкций сделаны достаточно подробно, в описания введены сведения о работе схемы, о назначении некоторых ее деталей. Одним словом, все рассчитано на то, чтобы эти конструкции можно было сделать еще до знакомства с теоретическими разделами книги или параллельно с изучением основ электроники, в какой-то степени сочетая таким образом то, что нужно, и то, что хочется.

5. Основной текст книги посвящен основам электроники и некоторым конкретным ее направлениям. Одно только есть предостережение: не хотелось бы, чтобы первые успехи в сборке простейших схем передвинули на второй план знакомство с основами электротехники и электроники, создали иллюзию, что с этим делом можно подождать или даже вообще обойтись без него. Если вы не хотите понапрасну терять время на разгадывание известного или бросать работу, отчаявшись найти неисправность в схеме,

³ К числу таких «нулевых конструкций» относятся практические примеры из глав 4, 9, 10 и частично 11, но и остальные примеры требуют лишь минимальной подготовки.

когда обнаружить ее – дело одной минуты, если вы не хотите повторять чужие ошибки и слепо копировать посредственную схему, когда есть десятки способов улучшить ее, одним словом, если вы не хотите блуждать в потемках по путаным дорогам страны Электронии, вашим девизом должно стать «знай и умей».

Можно прекрасно собрать велосипед, не зная теоретической механики, и успешно пилить дрова, не зная теории резания древесины. Но успехи в области практической электроники в принципе невозможны без определенного теоретического фундамента. Теория – это сконцентрированный опыт миллионов, собранные, приведенные в систему правильные решения, отброшенные в сторону бессчетные ошибки. Теория – это молниеносные мысленные эксперименты вместо долгих и дорогостоящих опытов «в металле», быстрый выбор правильного ответа вместо бесконечного слепого перебора и гадания. Теория – это кратчайший путь к нужному практическому результату. Прекрасно сказал великий итальянский физик Энрико Ферми: «Нет ничего практичнее хорошей теории».

В этой книге весь теоретический материал разбит на 18 глав. Первые десять посвящены основам электротехники, радиотехники, электроники, это фундамент, необходимый для того, чтобы построить прочное здание знаний и умений.

В каждой главе есть некоторое количество сравнительно небольших разделов, они имеют сквозную нумерацию по всей книге. Конечно же, основной текст книги, тот, что назван «теоретическим», не очень-то похож на теорию в истинном высоком смысле этого слова, теорию, насыщенную математическими формулами, охватывающую весь комплекс вопросов, связанных с данной темой. Основной текст книги – это очень краткий и по возможности предельно упрощенный пересказ некоторых элементов теории; теорией его можно называть только условно.

6. Рисунки, поясняющие основной текст, имеют свою собственную нумерацию в каждой главе. На рисунке может быть несколько фрагментов с отдельными номерами, на них и дается ссылка в тексте. Так, например, ссылка рис. 5.1; 2 означает «фрагмент номер 2 на рис. 1 в главе 5» (в данном примере это иллюстрация к понятию северного и южного полюсов магнита).

7. Книга написана на нескольких разных языках, освоить их – значит сделать самый важный шаг в электронику. Внимательно наблюдая за самим собой, нетрудно убедиться, что мы мыслим словами. Стоит вам подумать: «Я иду в школу», – и где-то в глубине звучат неслышимые слова «я и-ду в шко-лу». Английский мальчик о том же самом подумает так: «Ай гоу ту тзе скул», немецкий мальчик: «Их гее ин ди шуле».

Каждый человек думает словами, думает на том языке, на котором говорит. Или скажем иначе: человек говорит на том языке, на котором мыслит.

И не случайно преподаватели иностранных языков считают, что вы только тогда по-настоящему изучили язык, когда начали мыслить на нем так же, как и на своем родном.

Но вот шахматист, автоматически сделав несколько первых ходов, задумывается над сложной позицией. Неужели же и он в это время думает словами, слышит неслышимые: «Если я на-па-ду ко-нем на его сло-на, то он пойдет на по-ле вэ-че-ты-ре и, заб-рав мо-ю пеш-ку, по-па-дет под у-дар мо-е-го фер-зя, и тог-да...»?

Нет, конечно же, шахматист не думает звучащими словами разговорного языка. Он думает совсем на другом языке, на специфическом языке шахмат, оперирует в своем сознании готовыми образами фигур, позиций, ходов, комбинаций. Точно так же, как механик, всматриваясь в сложную машину, мыслит на своем языке, «слова» которого – образы конкретных деталей, их типичные взаимодействия, скажем, зацепление шестерен или червячной передачи. И так же, как математик, читая свои математические тексты, тоже обходится без разговорного языка, мыслит математическими символами и действиями, а композитор – мелодиями, аккордами, ритмами.

Нас окружает огромный мир, мир вещей и явлений. И в нашей вычислительной машине, в нашем мозгу, по мере того как мы познаем этот мир, строится его модель, которая состоит из записанных в память слов, картин, элементов их взаимосвязи. (Пока никто не знает, как вводятся в мозг или извлекаются эти записи, в каком виде они существуют: то ли это комбинации возбужденных нервных клеток, то ли комбинации молекул в клетке или атомов в молекуле, то ли комбинации электрических или химических сигналов.)

Самое универсальное средство для описания мира, для построения его модели – наш разговорный язык. Но для некоторых фрагментов этой модели, таких как устройство машин, шахматы, музыка, электронная аппаратура, химические соединения, существуют и специальные языки, более удобные, более оперативные и экономные. Здесь может быть уместно такое сравнение: универсальный автомобиль для перевозки грузов – это грузовик с откидными бортами, на нем можно перевозить все. Но для перевозки песка удобнее самосвал, для перевозки людей – автобус, для перевозки молока – автоцистерна. Мы пользуемся универсальным языком звучащих слов или осваиваем новые языки в зависимости от того, какую задачу нужно решить, что нужно описать – простую житейскую ситуацию «я иду в школу», устройство машины или состав вещества. В первом случае удобен разговорный язык, во втором – язык чертежа, в третьем – язык химических формул.

Чтобы заниматься электроникой, обязательно нужно освоить несколько новых языков. Прежде всего это язык схем, на котором осуществляет-

ся описание электрических цепей электронных приборов. Затем – язык графиков, с его помощью удобнее всего рассказать о процессах, которые происходят в электронном приборе. Еще язык спектров, который лучше всего описывает важнейшие преобразования электрического сигнала, этого главного героя электронных схем. Очень удобен и язык математических формул, он, в частности, помогает экономно и наглядно представить важнейшие законы электрических цепей.

Чтобы знать электронику, нужно прежде всего знать эти специальные языки, пусть не в очень большом объеме, но знать очень хорошо, свободно мыслить на них, мыслить на языке схем, графиков, простейших математических формул. Освоение этих языков – одна из главных наших целей, к ней мы будем постепенно, шаг за шагом продвигаться, с каждым шагом чувствуя себя уверенней и свободней в сложном мире электроники.

8. Многое в книге излагается упрощенно, а кое-что очень упрощенно и, может быть, даже слишком упрощенно. Один известный астрофизик, рассказывая о своей работе, заметил, что ему, наверное, никогда не удалось бы успешно развивать свою науку, если бы он постоянно представлял себе чудовищные космические расстояния или гигантские интервалы времени, которыми измеряются космические события. Работая, он думал совсем иными масштабами, оперировал образами, крайне упрощенными, но зато удобными, такими, которые легко себе представить. Ну, скажем, Солнце он мысленно представлял себе как некий шар с диаметром 10 см. А иногда и нашу Галактику считал однородным телом, приравнивал ее к своего рода плоскому солнцу, хотя в Галактике десятки миллиардов звезд, похожих на наше Солнце, а само оно в тысячи миллиардов раз меньше Галактики. В нашем рассказе об электронике и электронных приборах такой прием – упрощение истинной картины, изменение масштабов, использование образов искаженных, но более удобных для обдумывания – будет встречаться очень часто. Иногда это делается для того, чтобы читателю можно было проще обдумывать сложные процессы, а иногда для того, чтобы автору было легче их объяснить. Мы будем, например, представлять себе атомные ядра и даже сами атомы маленькими шариками, такими горошинами или маковыми зернышками, в то время как все это сложнейшие системы, собранные из множества разнообразных частей, размеры которых невообразимо малы.

Мы будем часто пользоваться аналогиями, сравнивая, например, электромагнитные процессы с механическими (переменный ток с качелями или заряд конденсатора с наполнением ведра), в то время как сходство между ними чисто внешнее, физическая сущность этих похожих процессов совершенно разная.

Примечание редактора. Неточное утверждение. Приведенные автором примеры (скажем, сравнение переменного тока с качелями), как и многие другие подобные аналогии, как раз показывают, что физическая сущность у разных по видимости процессов одинаковая. Причем именно колебательные процессы есть самая яркая иллюстрация этого положения: гармонические колебания маятника и процессы в колебательном контуре; звонок механического будильника и релаксационные генераторы на различных элементах (см. главу 11); самопроизвольные пульсации жидкости в трубах и самовозбуждение усилителей – все эти явления с точки зрения физика являются одними и теми же процессами и описываются одними и теми же уравнениями. Автор прав в том, что они относятся к разным областям физики, но глубинная сущность у них одна и та же – как правило, это процессы преобразования энергии в различной форме.

Мы будем, наконец, пользоваться привычными житейскими словами, чтобы рассказать о сложных электрических явлениях, будем, например, употреблять такие выражения, как «электроны быстро побежали», или «магнитное поле старается помешать нарастанию тока», или даже «атомное ядро не хочет отпускать электроны». Подобные выражения в тексте встречаются настолько часто, что пришлось даже отказаться от спасительных кавычек, иначе страницы текста просто пестрили бы кавычками.

Все это делается только для того, чтобы можно было думать о вещах сложных и непривычных в терминах знакомых и понятных, чтобы облегчить познание нового, пользуясь самым, пожалуй, сильным средством – сравнением, сопоставлением, связыванием с тем, что уже известно. И еще для того, чтобы по возможности не выпускать на эти страницы огромное количество слов и символов, необходимых для достаточно аккуратного, достаточно строгого описания сути дела. Встречаясь в тексте с грубыми механическими моделями электронных схем, с искаженными масштабами, с сильно упрощенными процессами или структурами, с разного рода «прыжками» электронов или «стараниями» магнитных полей, нужно помнить, что все это лишь военная хитрость, необходимая для штурма крепостей непонятного. И что упрощенное описание какой-либо физической сложности – это не более чем упрощенное описание.

9. В книге последовательность изложения выбрана такой, чтобы рассказ шел от простого к сложному, от известного к неизвестному. Но вполне может оказаться, что читателю понадобится нарушить эту последовательность. Хотя бы потому, что какие-то разделы ему уже известны или о каком-нибудь приборе, о какой-нибудь схеме хочется узнать побыстрее, «вне очереди».

Краткое, правильное даже сказать сверхкраткое содержание всех разделов текста приводится в начале каждого раздела (жирным шрифтом, перед основным текстом). Эти краткие резюме могут быть полезны и в том случае, когда нужно повторить пройденное, чтобы двинуться дальше.

10. Книга должна помочь вам сделать первые шаги в электронику и создать фундамент знаний для дальнейшей самостоятельной работы. Выйти к вершинам любительского конструирования электронных приборов, конечно, не просто. И дело это не быстрое. Однако же и путь от простейшего генератора прямоугольных импульсов к сложным электронным схемам, к усилителям высококачественного звучания, электрогитарах, электронным роботам – путь этот вполне преодолим, его прошли уже многие тысячи людей. Хочется верить, что эта книжка поможет вам сделать первые шаги на пути в электронику, поможет запастись фундаментальными знаниями и приобрести практическую хватку. А это есть самые важные слагаемые дальнейшего успешного продвижения вперед.



ГЛАВА 2

Встреча с электричеством

1. Мир, в котором мы живем, устроен намного сложнее, чем это кажется с первого взгляда. Если раздобыть где-нибудь машину времени, проехаться на ней в далекое прошлое и побеседовать с тамошним жителем, то он нарисует вам картину мира довольно-таки простую. В ней будет твердый потолок-небосвод, на котором закреплены тлеющие угольки-звезды, будут мельчайшие частицы вещества – пылинки, разделить которые, раздробить уже невозможно, будет трение, рождающее огонь, и холод, превращающий воду в лед, будет огромный шар-костер, который каждый день перекачивается по небосводу от одного его края до другого. И еще будут некоторые твердо установленные истины, по нынешней терминологии – законы природы. Например, такие: «дерево, пожираемое огнем, дает тепло», «в воде дерево не тонет, а камень тонет», «всякое тело стремится к земле: тяжелый камень, легкий лист, мягкая капля и пушистая снежинка – все падает на землю, тянется к ней по своей собственной воле».

Не торопитесь, пожалуйста, выводить своему далекому предку двойку по природоведению. Таким же, наверное, виделось бы окружающее любому из нас, если бы он вырос где-нибудь на необитаемом острове, без парового отопления и шариковых ручек, без магазинов «Гастроном» и журнала «Юный техник». А потом, если вдуматься, запас знаний человека древнего, необученного был не таким уж скудным, и в школе природы он никогда не был в числе отстающих.

Великая мастерица – эволюция – долго и тщательно работала над своим лучшим творением Человеком и снабдила его изумительными инструментами познания мира. Зрение, слух, обоняние, осязание, датчики температуры и давления, тонкие химические анализаторы вкуса и, наконец, изумительный компьютер мозг – все это открыло Человеку мир в огромном многообразии вещей и явлений. На школьном уроке, который длился тысячелетия, работая и наблюдая, замерзая и обжигаясь, в борьбе со стихиями, голодом и хищным зверьем, твердо усвоил Человек такие понятия, как «быстрый» и «медленный», «тяжелый» и «легкий», «теплый», «холодный», «далекий», «большой», «горький». В плоть и кровь человеческую вошли представления о плотности вещества и скорости движения, о массе,

размерах, времени, температуре – словом, важнейшие представления о мире, в котором нашим предкам приходилось жить и бороться за жизнь. Никакой другой житель планеты не имел столь детальной картины мира.

И все-таки...

И все-таки это была картина мира, созданная всего лишь диким обитателем лесов и пещер, собирателем плодов, охотником, имевшим в своем арсенале только палку и камень. Эту картину, конечно же, не сравнишь с тем, что знает современный человек, пассажир реактивного лайнера и владелец карманного плеера, исследователь живой клетки, строитель небоскребов, атомных реакторов, космических кораблей.

2. Человечество не быстро и не легко выясняло, как что устроено в природе. Сначала, наверное, лишь одинокие смельчаки решались перейти порог дозволенного, пытались увидеть больше, чем хочет показать природа. Эти безвестные академики сделали немало великих открытий и изобретений, таких, скажем, как рычаг, колесо, ориентировка по звездам, земледелие. И еще одно, наверное самое великое, – школа: человек научился передавать знания потомкам, с тем чтобы они не начинали все с самого начала, «с нуля», а могли бы пользоваться уже достигнутым. И идти дальше.

В далекой, уже невидимой древности начались бои на огромном фронте познания мира. Было время – линия этого фронта, линия, отделяющая знание от неизвестности, продвигалась вперед очень медленно. Века, тысячелетия уходили на то, чтобы понять какую-нибудь простую, как сейчас кажется, истину – задачи, которые приходилось решать древним мыслителям и исследователям, были для них столь же мучительно трудными, как и современные научные проблемы для ученых наших дней. Но с каждой новой победой, с их новым открытием росли силы наступающей армии, знание помогало добывать знание, все быстрее шли вперед передовые части науки. И вот уже восхищенное человечество рукоплещет глубоким прорывам в тайны жизни, в глубины вещества и просторы Вселенной, фантастическим успехам химии, медицины, астрофизики, энергетики, блистательным научным победам последних столетий, так сильно изменившим не только наше миропонимание, но и сам образ нашей жизни.

В нескольких популярных книгах о науке встречается интересный прием, помогающий почувствовать темпы человеческого прогресса в разные времена. Авторы сжимают масштаб времени в тридцать миллионов раз, так что каждый год прошлого превращается в секунду. Вот как располагаются некоторые события на такой сжатой шкале времени.

Примерно сто пятьдесят лет назад в не приметном уголке огромной Вселенной из газопылевого облака, окружавшего звезду Солнце, образовалась цепочка планет, и в их числе – наша Земля. Лет двадцать Земля остывала, а еще через десять на некоторых участках ее поверхности в теплых водах Мирового океана начались сложные химические процессы с образованием

больших молекул, началась предыстория жизни. Около ста лет назад появились первые примитивные живые клетки, а затем много десятилетий они совершенствовались, специализировались, объединялись в многоклеточные организмы. Лет десять–двенадцать назад появились рыбы и папоротники, пять лет назад – динозавры, которые, правда, уже через год исчезли с лица земли. Немногим более четырех лет назад в небо поднялись первые птицы, примерно через год начали появляться млекопитающие.

И только месяц прошел с тех пор, как из царства животных выделился человек.

3. Электрическая сила похожа на силу тяжести, но имеет совсем другую природу. Если бы мы захотели отметить на нашей сжатой шкале времени научные открытия, пусть даже не все, а только очень важные, то появилось бы на этой шкале огромное множество черточек. «Механизмы горения». «Разбегание галактик». «Кровообращение». «Молекулярное строение вещества». «Устройство живой клетки». «Шарообразность Земли». «Реактивное движение». «Циклы солнечной активности». «Деление атомных ядер». «Противомикробный иммунитет». «Химическая связь». «Подъемная сила крыла». «Синтетические волокна». «Синтетические алмазы». «Световой спектр». «Строение белка».

Из всего этого множества черточек-отметок несколько нужно было бы как-то выделить, скажем сделать их подлиннее или нарисовать другим цветом. Это были бы отметки, соответствующие особо важным открытиям, суперважным. Открытиям совершенно новых для человека, принципиально новых свойств окружающего мира.

Вы подняли с земли небольшой камушек, а затем разжали ладонь, и камушек падает вниз, тянется к земле. Почему? Так устроен мир, в котором мы живем, – все тела притягиваются друг к другу, стремятся сблизиться, и это явление мы называем гравитацией, гравитационным взаимодействием. Откуда оно берется? Почему действует именно так, а не иначе? Ответ все тот же – так устроен мир...

Один из примеров гравитационного взаимодействия – притягивание предметов к земле, то, что в нашем сознании связывается со словами «сила тяжести», «вес», «земное притяжение». Железный шар тянется к земле сильнее, чем деревянный, большой – сильнее, чем маленький. Характеристика какого-либо физического тела, которая показывает, насколько сильно, насколько активно это тело участвует в гравитационных взаимодействиях, называется его массой. Чем сильнее физическое тело – камень, железный или деревянный шар, капля воды, планета – тянется к другому физическому телу под действием гравитационных сил, тем, говорим мы, больше масса этого тела. А можно сказать так: чем больше массы взаимодействующих тел, тем сильнее их гравитационное притяжение. Кстати, именно поэтому такими легкими чувствуют себя космонавты на Луне: ее

масса меньше, чем масса Земли, и Луна тянет к себе в несколько раз слабее.

С гравитацией человек познакомился тогда, когда он еще не был Человеком. Мы привыкли к ней, считаем ее совершенно естественной и чуть ли не единственной силой, которая правит миром.

Но вот около двух с половиной тысяч лет назад древнегреческий философ и исследователь природы Фалес Милетский впервые отмечает, что у гравитации есть могучий соперник, ранее ловко скрывавшийся от людей. Обнаружилось, что если натереть шерстью янтарную палочку, то палочка притягивает к себе легкие предметы, скажем клочки ткани. Под действием своей тяжести, то есть под действием гравитационного притяжения к земле, эти клочки ткани должны были бы падать, двигаться вниз. А они, преодолевая силы гравитации, упрямо поднимаются вверх (рис. 2.1).

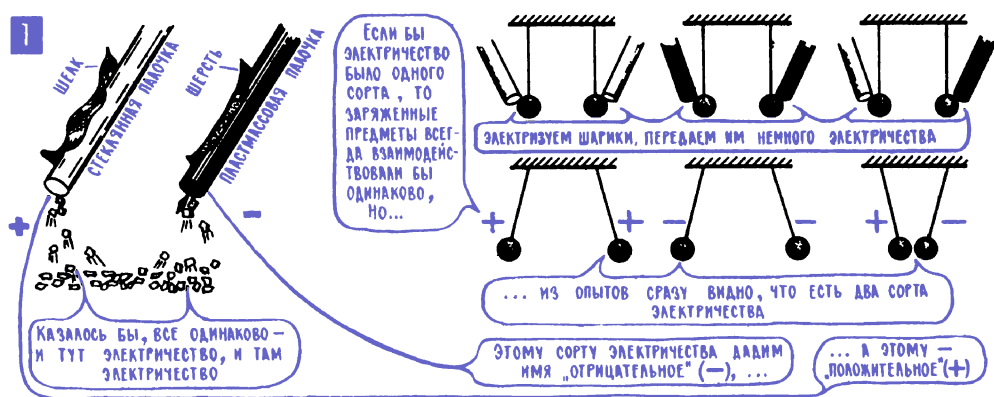


Рис. 2.1. Электризация тел

О чем это могло говорить? Только об одном – кроме гравитационных сил, кроме сил притяжения, которые стремятся сблизить, стянуть в одно место две массы, в мире существуют еще какие-то силы, которые в данном опыте с натертой янтарной палочкой оказались сильнее гравитационных. Какова природа неизвестных ранее сил? Почему только после натирания янтаря у него появляются новые свойства?

Ответить на эти вопросы первые исследователи не могли, они лишь зафиксировали обнаруженный факт и дали новому явлению свое название «электричество». На русский язык это слово можно было бы перевести так: «янтарничество». Потому, что «электричество» происходит от греческого слова «электрон», что означает «янтарь», и «электричеством» новое явление было названо именно потому, что оно было обнаружено в опытах с янтарной палочкой.

Опыты с натиранием янтаря позволяют сделать очень важный вывод. До этих опытов было известно только одно основное свойство материи –

масса, – которое заставляло предметы притягиваться друг к другу, двигаться, работать. Натертый янтарь показал, что наряду с массой у вещества может быть еще одно работающее основное свойство, в дальнейшем ему дали название «электрический заряд». Почему электрический – понятно. Почему заряд? Трудно сказать... Может быть, тот, кто впервые ввел это понятие – электрический заряд, – представлял себе, как, натирая янтарь, в него вталкивают некую невесомую электрическую массу, заряжают янтарь электричеством, подобно тому как заряжали когда-то пушку, вталкивая в нее стальное ядро.

Кстати, электричество, электрический заряд – не единственное принципиально новое свойство материи, открытое пытливым человеком. Несколько тысячелетий назад у некоторых металлических руд были обнаружены ни на что другое не похожие магнитные свойства, которые не хуже гравитации и электричества могут работать, двигать физические тела. И совсем недавно, уже в нашем веке, открыт еще один совершенно новый сорт основных свойств материи: ядерные силы. Это не гравитация, не электричество, не магнетизм. Действуют ядерные силы совершенно самостоятельно, причем только на очень небольших расстояниях. Именно они каким-то своим собственным способом стягивают расталкивающие друг друга составные части атомного ядра. А потом открыли еще одно фундаментальное свойство материи, еще один вид особых сил – их называли слабыми, хотя действуют эти слабые силы во много раз сильнее, чем гравитация.

Вот так-то... Все было просто, была одна гравитация, а теперь – вон сколько открылось основных свойств материи. Мир намного сложнее, чем кажется человеку, который, подобно своему доисторическому предку, видит лишь то, что видно с первого взгляда...

Нужно, правда, отметить, что современная физика пытается, в каком-то смысле, упростить открывавшуюся ей сложную картину мира: в современной физике господствует представление о единой природе, о «великом объединении» всех известных сил – сильных, слабых, электромагнитных, гравитационных. Могучие силы теории и эксперимента направлены на то, чтобы выявить эту единую природу. Причем на этом пути есть уже огромное достижение – экспериментально подкреплена теория, объединившая электромагнитные и слабые силы в единое, как его называют, электрослабое взаимодействие.

Но вернемся, однако, от этой высокой физики к делам простым и практически важным.

Электричество и гравитация в чем-то очень похожи, и работают они по очень похожим правилам. Гравитационное притяжение тем сильнее, чем больше взаимодействующие массы; электрическое – чем больше заряды. А если раздвигать взаимодействующие тела, увеличить расстояние между ними, то обе силы – электричество и гравитация – резко ослабевают (рис. 2.2).

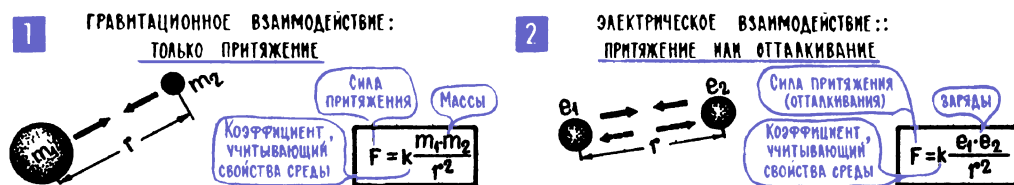


Рис. 2.2. Гравитационное и электрическое взаимодействия

Для того чтобы почувствовать реальность таких понятий, как «гравитация», «масса», «сила тяжести», не нужно раскрывать учебник физики. Достаточно положить его на ладонь. Мы непосредственно воспринимаем массу, ощущаем ее, чувствуем массу своего тела, массу покупки, которую несем из магазина, массу упавшего на ногу камня. Электрический заряд, конечно, на ощупь не почувствуешь, в реальность электричества можно поверить, лишь проделав специальные опыты. К тому же масса – понятие привычное, мы привыкали к ней миллионы лет. А с электричеством сталкиваемся ежедневно всего около ста лет. Но электричество сегодня уже играет в нашей жизни такую важную роль, что силой мысли, силой воображения нужно отвести ему достойное место в своей картине мира. В него нужно неотвратимо поверить, к нему нужно привыкнуть. Нужно привыкнуть...

4. Электричество бывает двух видов, двух сортов: положительное и отрицательное. В результате гравитационного взаимодействия физические тела только притягиваются, пока еще никто не наблюдал антигравитации, то есть расталкивания двух масс. Отсюда можно сделать вывод, что в природе существует масса только одного сорта и что одинаковые массы взаимодействуют только так – они взаимно притягиваются. Одинаковость, однотипность масс установлена с колоссальной, просто-таки фантастической точностью – до миллионных долей миллионной доли процента. Но факт существования только одного сорта массы настолько важен, что физики планируют еще более точную его проверку. В отличие от массы, электричество бывает двух разных сортов, и в этом может убедиться каждый, проделав простейшие опыты с натиранием стеклянной и пластмассовой палочек. Поначалу может показаться, что электричество всегда действует одинаково (рис. 2.1), но, передавая заряды с натертых палочек двум легким шарикам, можно убедиться, что в разных случаях они ведут себя по-разному (рис. 2.2; 2). Шарик, получивший электрический заряд разных сортов (разноименно заряженные), притягиваются, одинаковых сортов (одноименно заряженные) – отталкиваются. Если бы электричество было только одного сорта, то взаимодействие зарядов всегда было бы одинаковым:

наэлектризованные предметы либо только притягивались бы, либо только отталкивались.

Два разных сорта электричества нужно было как-то назвать, скажем «электричество сорта А» и «электричество сорта Б». Однако тому, кто давал имя этим сортам, понравились другие слова, и он назвал два разных сорта электричества положительным (сокращенное обозначение «+», «плюс») и отрицательным («-», «минус»). В данном случае привычный для нас смысл этих слов не имеет никакого значения, и ни в коем случае не нужно думать, что положительное электричество чем-то лучше отрицательного, как, скажем, положительный литературный герой или положительный пример.

Электрический заряд, который называли положительным, появляется у натертого стекла, отрицательный – у натертой пластмассы. Попробуем провести такой мысленный эксперимент: будем ломать, распиливать, крошить наэлектризованные стекло и пластмассу, чтобы найти в них самые маленькие порции электрического заряда.

5. Молекула – мельчайшая частица данного вещества. Мысленный эксперимент, кроме всего прочего, хорош тем, что любая трудная работа здесь идет легко и быстро. Вот и у нас уже появились сначала маленькие кусочки наэлектризованного вещества, затем очень маленькие и, наконец, самые маленькие частички стекла и пластмассы – их молекулы. Можно, конечно, и эти молекулы, например молекулы стекла, разделить на составные части, но то, что при этом получится, уже не будет стеклом. Здесь, по-видимому, уместно такое сравнение. Представьте себе, что вам нужно разделить на районы город. Самый маленький район, который может получиться, – это один дом, молекула большого города. Можно, конечно, и дом разобрать по частям, но вряд ли какую-нибудь из строительных деталей можно будет назвать районом города.

Получив молекулы стекла и пластмассы, мы обнаружим, что некоторые из них наэлектризованы, то есть обладают электрическими свойствами, а другие не обладают. Остается предположить, что электрический заряд молекулы, ее электрические свойства связаны с какой-то еще более мелкой частицей, которая или входит, или не входит в молекулу. И если входит, то делает ее наэлектризованной. Чтобы проверить эту гипотезу, продолжим свой мысленный эксперимент и разделим наэлектризованную молекулу на составные части.

Подобно тому как современный дом состоит из отдельных типовых блоков – перекрытий, лестничных пролетов, стеновых панелей, – подобно этому молекула любого вещества состоит из типовых блоков вещества – атомов. Всего сегодня известно чуть больше сотни основных типов различных атомов, их называют химическими элементами. В молекулу могут входить самые разные атомы и в самой разной пропорции, они могут по-разному соединяться друг с другом, образовывать различные пространственные

конструкции. И из сравнительно небольшого количества элементов (хотя сотня – это тоже немного, но реально в строительстве молекул используется еще меньше) образуются миллиарды самых разных веществ. Так же, как из одинаковых строительных деталей строятся самые разнообразные здания. Разные сочетания разных атомов дают воздух и воду, мрамор и зеленый лист винограда, соль и сахар, стекло и пластмассу.

Продолжив свой мысленный эксперимент и разобрав на части молекулы подопытных веществ – стекла и пластмассы, – мы обнаружим, что и среди атомов попадаются, как говорится, наэлектризованные и ненаэлектризованные экземпляры, атомы с электрическим зарядом и без него, то есть электрически нейтральные. И после этого нам не останется ничего другого, как в поисках мельчайших частичек электрического заряда разобрать на части сам атом.

6. Планетарная модель атома – массивное ядро, вокруг которого вращаются электроны. Слово «атом» в переводе с греческого означает «неделимый». Это название появилось очень давно, когда о настоящих атомах, в современном понимании этого слова, никто и представления не имел. Просто считалось, что всякое вещество можно дробить на части до тех пор, пока не получатся мельчайшие невидимые пылинки, которые дальше уже разделить нельзя. Невозможно. Вот эти гипотетические, то есть предполагаемые неделимые, пылинки древние греки и называли атомами. Позднее название «атом» перешло к частицам уже не гипотетическим, а совершенно реальным, к тем самым основным блокам, из которых, как было установлено, строятся разные вещества. Еще какие-нибудь полтора века назад некоторые ученые считали эти блоки неделимыми и с чистой совестью называли их атомами. И только в начале XX века было установлено, что, строго говоря, атом нельзя называть атомом, что атом не есть неделимый блок, он представляет собой сложную машину и состоит из множества разнообразных деталей.

Склеенная из пластмассы модель самолета или даже летающая его модель лишь в небольшой степени похожа на воздушный лайнер, берущий на борт сотни пассажиров. Но вместе с тем, рассматривая эти модели, можно узнать много важного о настоящих самолетах, об устройстве их основных деталей, о том, для чего эти детали нужны.

Одна из правдоподобных моделей атома похожа на нашу Солнечную систему, и ее так и называют – «планетарная модель». В центре планетарной модели – основная деталь атома, его ядро, массивный шар, в котором сосредоточена почти вся атомная масса. Вокруг ядра вращаются маленькие и легкие шарики – электроны, чем-то напоминая планеты, вращающиеся вокруг Солнца (рис. 2.3). Такая картина очень наглядна, ее легко себе представить, но, конечно же, планетарная модель – это упрощение, искажение истины (см. гл. 1; 8). Она похожа на настоящий атом, наверное,

не больше, чем самолет-игрушка на настоящий «Ту» или «Ил». Скажем, электроны – это совсем не шарики-пылинки, а некоторые во многом еще загадочные сгустки материи, которые ведут себя не только как частицы, но и как волны. И двигаются электроны не по спокойным круговым орбитам, как Венера или Земля вокруг Солнца. Электроны как бы размазаны в пространстве, распределены по сферам вокруг ядра, образуют вокруг него так называемые электронные оболочки. И само ядро – тоже не бильярдный шар. Это огромный (по атомным масштабам, разумеется) бурлящий котел, в котором никогда не прекращаются самые удивительные преобразования и перестройки, непрерывно идут сложные превращения вещества и энергии, рождаются и умирают частицы.

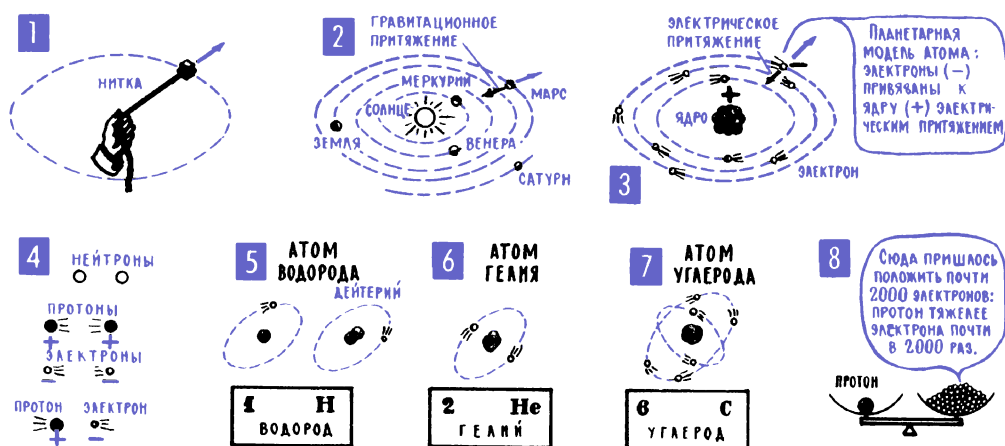


Рис. 2.3. Планетарная модель атома

И все же планетарная модель, несмотря на все ее недостатки, помогает просто и правильно объяснить многие важные процессы в атоме, многие особенности его конструкции. Именно поэтому свое путешествие в атомные глубины мы начнем с того, что построим упрощенную действующую – именно действующую – планетарную модель самого простого из известных атомов.

Привяжите нитку к спичечной коробке, раскрутите ее вокруг руки, и модель готова (рис. 2.3; 1). Ваша рука в ней играет роль атомного ядра, вращающаяся на нитке спичечная коробка – роль электрона. Но чью же роль в таком случае играет нитка? Ведь если нитка оборвется, то коробка под действием центробежной силы улетит в сторону, без нитки наш «атом» существовать не может. А в настоящем атоме нет никакой нитки, которая связывала бы ядро с электроном, и вместе с тем атом не разрушается, электрон с огромной скоростью (миллионы оборотов в секунду) вращается вокруг ядра и никуда не улетает. Что его держит? Какая сила

привязывает, притягивает вращающийся электрон к ядру, не позволяет ему оторваться, улететь? Это делает электричество.

7. В атомных частицах – электроне и протоне – хранятся мельчайшие порции электрических зарядов. Точными опытами установлено, что любой электрон обладает некоторым отрицательным электрическим зарядом, то есть зарядом того же самого сорта, который был обнаружен у пластмассовой палочки. Электрический заряд есть обязательное, непереносимое свойство электрона, такое же непереносимое, как масса. У всех электронов электрический заряд одинаков, так же, скажем, как одинакова масса у всех пятаков.

Теперь заглянем в ядро. Если не бояться упрощений, то можно считать, что ядро состоит из крепко склеенных частиц двух сортов – нейтронов и протонов. И те, и другие – довольно тяжелые частицы, масса каждой из них почти в две тысячи раз больше массы электрона (рис. 2.3; 8): если электрон – копейка, то протон или нейтрон – двухкилограммовая гиря или двухлитровая банка, наполненная водой. Различаются ядерные частицы – нейтрон и протон – прежде всего тем, что нейтрон в электрическом отношении нейтрален (отсюда и его название), то есть никакими электрическими свойствами он не обладает, а у протона есть положительный электрический заряд.

Подведем некоторые итоги. Электрон на орбите, протон в ядре. Обе частицы от природы обладают электрическими свойствами. У электрона отрицательный электрический заряд, «минус», у протона – положительный, «плюс»...

Теперь уже, наверное, понятно, почему именно электрические силы в настоящем атоме делают то, что в нашей модели делала нитка, – притягивают вращающийся электрон к ядру. У протонов и у электронов разноименные электрические заряды, и силы их электрического взаимодействия стараются стянуть, сблизить эти частицы.

Еще одна интересная особенность: у электрона и у протона заряды хотя и разного сорта, но равны по величине, по своей, если можно так сказать, действующей силе. Массы у этих частиц разные, вспомните: копейка и двухлитровая банка воды, – а электрические заряды, электрические свойства одинаковые. Это тоже может быть доказано точными опытами. Если расположить на некотором расстоянии один от другого два протона и на таком же расстоянии один от другого два электрона, то электрические силы будут расталкивать протоны (все правильно – одноименные заряды отталкиваются) с такой же силой, как и электроны (рис. 2.3; 4).

Сравнительно недавно, в середине семидесятых годов, начала активно развиваться и получать экспериментальное подтверждение физическая теория, согласно которой такие частицы, как протон и нейтрон (к электрону это не относится), состоят из еще более «мелких» деталей – кварков.

У кварков электрический заряд меньше, чем у протона, и может составлять $1/3$ или $2/3$ от той порции электричества, которую имеет протон. Причем заряд кварков может быть как положительным, так и отрицательным. Однако теория предсказывает, что сами кварки выделить из протонов или других частиц и получить в «чистом виде» невозможно, а может быть, даже принципиально невозможно. Придравшись к этому, мы будем считать, так же как считалось до появления кварковых теорий, что положительный заряд протона и отрицательный заряд электрона – это самые малые порции электричества, которые можно обнаружить в природе.

8. Атомы разных химических элементов различаются числом протонов в ядре и электронов на орбитах. Простейшая планетарная модель атома, построенная нами, – спичечная коробочка, которая вращается вокруг руки, – это модель атома водорода. В его ядре – один протон (+), а на орбите – один электрон (–). Бывают атомы водорода, в которые входят еще и нейтроны (это так называемые изотопы – тяжелый водород, дейтерий, с одним нейтроном и сверхтяжелый водород, тритий, с двумя), но мы нейтроны во внимание принимать не будем. Потому, что это частицы нейтральные, электрического заряда у них нет и на электрические свойства атомов они не влияют.


Следующий по сложности – атом гелия. В его ядре уже два протона, а на орбите – два электрона (нейтроны мы опять-таки не принимаем во внимание, хотя они есть и у гелия, и у всех более сложных атомов). У лития – три протона и три электрона, у бериллия – четыре и четыре, бора – пять и пять, углерода – шесть и шесть, азота – семь и семь и т. д. Один химический элемент отличается от другого числом протонов в ядре. Всего в природе существует 92 разных сорта атомов (с числом протонов в ядре от 1 до 92), то есть 92 химических элемента, а с учетом полученных искусственно – около 115. У разных элементов разная способность вступать в химические реакции, соединяться в молекулы. На это и обратили внимание химики еще в те времена, когда о строении атомов ничего не знали. Проанализировав химические свойства элементов, Дмитрий Иванович Менделеев расположил их в определенном порядке в таблице, которая всему миру известна как таблица Менделеева. А потом, спустя много лет, оказалось, что порядок следования элементов в менделеевской таблице определяется числом протонов в атомном ядре – чем больше протонов, тем более далекое место в этой таблице занимает элемент.

Электроны вращаются вокруг ядра по разным орбитам. Некоторые из орбит находятся поближе к ядру, другие подальше от него, третьи – совсем далеко. Все электронные орбиты сгруппировываются в несколько слоев, в несколько, как принято говорить, электронных оболочек. В первом, самом близком к ядру слое только две орбиты, два вращающихся электрона (исключение – атом водорода, у которого всего один электрон), во вто-

ром слое может быть уже до восьми орбит, в третьем – до восемнадцати. На всех наших рисунках электронная оболочка показана в виде одного круга или эллипса, по которому вращаются все электроны. Это, конечно, грубое упрощение, одно из тех, которым было посвящено предупреждение в гл. 1; 8. Особое значение имеет наружный слой электронных орбит, потому что именно с помощью своих внешних электронов атомы соединяются друг с другом, образуя молекулы. С внешними электронными оболочками атома нам еще предстоит интересные встречи, а сейчас несколько слов о другой важной особенности атомных конструкций.

9. Положительный ион и отрицательный ион – атомы, у которых нарушено электрическое равновесие. Обнаружив в электронах и протонах мельчайшие порции электричества, мы можем теперь объяснить, как появляются электрические свойства у более крупных «предметов» – у атомов, у молекул. И у натертых палочек из пластмассы и стекла. В нормальном своем состоянии любой атом электрически нейтрален – число протонов в его ядре и число электронов на орбитах одинаково. А при этом и суммарный положительный заряд атома, и его суммарный отрицательный заряд как бы нейтрализуют друг друга, и за пределами атома никакие его электрические свойства вообще не ощущаются. Вещество, состоящее из таких нейтральных атомов, само тоже нейтрально, электрического заряда у него нет (рис. 2.4).

ЭЛЕКТРИЗАЦИЯ:
В ОДНОМ СЛУЧАЕ НЕКОТОРЫЕ НЕЙТРАЛЬНЫЕ АТОМЫ ВЕЩЕСТВА ТЕРЯЮТ ЭЛЕКТРОНЫ И ПРЕВРАЩАЮТСЯ В ПОЛОЖИТЕЛЬНЫЕ ИОНЫ (СТЕКЛО), В ДРУГОМ – В ВЕЩЕСТВО „ВТАЛКИВАЮТСЯ“ ЛИШНИЕ ЭЛЕКТРОНЫ (ПЛАСТМАССА)





















	НЕЙТРАЛЬНЫЕ АТОМЫ			ПОЛОЖИТЕЛЬНЫЕ ИОНЫ			ОТРИЦАТЕЛЬНЫЕ ИОНЫ		
									
СУММАРНЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЗАРЯД									
ЗАРЯД	+ 1	+ 6	+ 12	+ 1	+ 6	+ 12	+ 1	+ 8	+ 12
ЭЛЕКТРОНОВ	- 1	- 6	- 12	0	- 4	- 8	- 2	- 10	- 15
АТОМА	0	0	0	+ 1	+ 2	+ 4	- 1	- 2	- 3

Рис. 2.4. Атомы и ионы

Если же каким-то способом удалить с атомной орбиты хотя бы один электрон, то общий заряд электронов будет уже меньше, чем общий заряд протонов. И такой атом в целом будет обладать положительным зарядом. А значит, будет обладать положительным зарядом и молекула, куда входит этот наэлектризованный атом, и в итоге вещество, в которое входит наэлектризованная молекула. У натертой стеклянной палочки положительный заряд появляется именно потому, что при натирании мы, грубо говоря, выдираем электроны из многих атомов, расположенных в поверхностном слое стекла.

Можно при натирании каким-то способом втолкнуть в атом лишний электрон, у некоторых веществ ему найдется местечко на орбите. У такого атома электронов окажется больше, чем протонов в ядре, а значит, появится отрицательный заряд. В итоге отрицательный заряд будет у молекулы, включившей в себя этот атом, и у вещества, куда входит наэлектризованная молекула. Именно так можно объяснить появление отрицательного электрического заряда у натертой пластмассовой палочки.

В заключение остается назвать имена, которые присваивают атомам в зависимости от их электрического состояния.

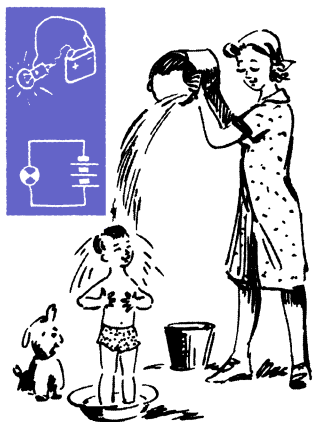
Нормальный атом, такой, у которого число протонов и число электронов одинаково и который поэтому во внешнем мире никак не проявляет своих электрических свойств, называют нейтральным атомом. Атом с недостающими электронами (или, другими словами, с избытком протонов) называют положительным ионом – в целом такой атом ведет себя как частица, имеющая чистый положительный заряд. Атом с избытком электронов ведет себя как частица с чистым отрицательным зарядом, и такой атом называют отрицательным ионом.

10. Электрические силы могли бы работать в машинах. С давних пор люди стремятся умножить силу своих мускулов, выполнять работу бо́льшую, чем могли бы по своим природным способностям. Стремятся они к этому не просто так, не ради спортивного интереса, а для того, чтобы улучшить свои жизненные условия, чтобы жить лучше, чем предназначено дикой природой. В разные времена человек приспособил себе в помощники домашних животных, энергию падающей воды, ветра, расширяющегося пара, взрывающихся бензиновых паров. И конечно же, не мог он оставить в бездействии такую прекрасную работающую силу, как электричество.

Уже простейшие опыты с натиранием стекла и пластмассы говорят о том, что электричество может работать, ну, скажем, перемещать какие-то грузы. Или приводить в движение машины, подобно тому, например, как гравитационные силы вращают жернова водяной мельницы. В принципе, работоспособность электричества огромна, значительно больше, чем работоспособность гравитации. Если стеклянную и пластмассовую палочки размером с карандаш расположить на расстоянии метра, то под действием гравитационных сил они будут притягиваться одна к другой, как и любые две массы. Но сила этого притяжения будет в миллиарды миллиардов раз меньше, чем сила самого чахлого комарика. А вот если наэлектризовать эти палочки-карандаши, уменьшить на один процент число электронов в стекле и увеличить на один процент число электронов в пластмассе – обратите внимание: всего на один процент! – то палочки будут притягиваться с такой силой, что смогут сдвинуть с места железнодорожный состав из миллиарда миллиардов груженых вагонов!

Вы хотите спросить, почему же в наших опытах электрических сил едва хватало на то, чтобы подтянуть вверх легкие бумажки? Только потому, что натиранием мы сумели нарушить электрическое равновесие лишь у очень небольшого числа атомов.

И все же в использовании электрической энергии техника не пошла по пути машин с большими сильно наэлектризованными деталями. В современных электрических машинах и установках всех типов работают детали, наэлектризованные самой природой, – мельчайшие частицы вещества, с которыми мы встретились на нашей экскурсии в мир атомов и молекул. А конкретно в современных электрических машинах всех типов работают электроны, положительные и отрицательные ионы. Главным образом – электроны.



ГЛАВА 3

Завод, где работают электроны

1. В некоторых веществах электроны и ионы могут находиться в свободном состоянии. Есть хорошая французская поговорка: «Для того чтобы сделать рагу из зайца, нужно, как минимум, иметь зайца». По аналогии можно сказать: для того чтобы заставить ионы и электроны работать в электрических машинах, нужно, как минимум, иметь ионы и электроны. Причем иметь их в свободном состоянии, чтобы можно было эти микроскопические детали перемещать, двигать и тем самым заставить их выполнять какую-то работу.

Повседневный опыт приучил нас, что твердые тела и жидкости имеют плотную, непрерывную структуру. А вместе с тем структура у них, если можно так сказать, ажурная. Любое вещество – вода, бумага, мрамор, сталь – больше напоминает редкую волейбольную сетку, чем плотный клубок ниток. Мы, конечно, не можем увидеть эту ажурность, сетчатость, но точными физическими исследованиями установлено, что сгустки вещества – атомные ядра и электроны – находятся друг от друга на расстояниях, во много раз превышающих размеры этих частиц. Так, скажем, если предположить, что атомное ядро имеет размеры футбольного мяча, то для соблюдения истинных пропорций нужно представить себе, как вокруг этого мяча на расстояниях в сотни и тысячи метров (!) вращаются электроны размером с горошину. А все остальное – пустота. Ну, а расстояния между соседними атомами в этом масштабе совсем уже огромны – это десятки и сотни километров!

Ажурные атомные конструкции, огромные пространства между атомами – вот первая особенность строения вещества, которую важно знать конструкторам электрических заводов, где будут работать электроны.

А вот вторая.

В любом веществе всегда найдется некоторое количество атомов, потерявших электроны со своих внешних орбит. В твердом теле атомы как бы закреплены в определенных точках пространства, связаны друг с другом в прочный каркас. В жидкостях атомы связаны слабее, могут смещаться,

именно поэтому жидкость «мягкая», она легко изгибается, течет. Во всех случаях атомы совершают какие-то небольшие движения, колеблются, пошатываются, причем тем сильнее, чем выше температура вещества. Только при абсолютном нуле, при температуре 0 градусов по шкале Кельвина (0°K , или $-273,16^\circ\text{C}$; получить такую температуру пока никому не удалось, хотя подошли к ней очень близко – остались десятые доли градуса), собственные хаотические движения атомов затихают. В процессе этих хаотических, как их называют, тепловых колебаний атомы, грубо говоря, сбрасывают некоторые внешние электроны, те, что сильно удалены от ядра и слабее других привязаны к нему электрическими силами. Вырвавшиеся из атомов электроны беспорядочно слоняются (см. гл. 1; 8) в межатомном пространстве, они свободны, и эти свободные электроны вполне можно было бы использовать в качестве движущихся деталей электрических машин (рис. 3.1; 3).

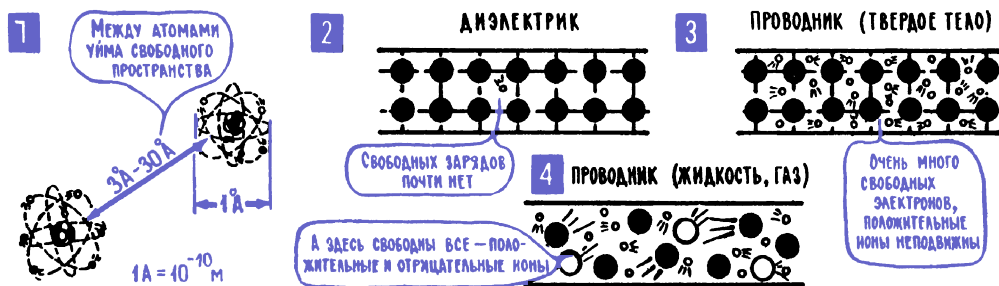


Рис. 3.1. Поведение зарядов в различных телах

Запомним, в твердом веществе могут быть свободные электроны. А теперь перейдем к жидкостям и газам.

Атом, потерявший один или несколько электронов, – это положительный ион. В твердых телах такие положительные ионы неподвижны, в жидкостях и особенно в газах они могут двигаться. Кроме того, в жидкостях и газах могут появиться подвижные отрицательные ионы – атомы, в которые попал лишний электрон. Таким образом, в жидкостях и газах может быть сразу три типа работающих деталей – свободные положительные ионы, свободные отрицательные ионы и, как всегда, еще свободные электроны (рис. 3.1; 4).

Итак, в веществе существуют свободные электрические заряды. И есть свободное пространство, где они могут двигаться. Теперь попробуем выяснить, какую пользу можно получить от такого движения зарядов, какую работу эти заряды могут выполнять.

2. Движущиеся свободные электроны (ионы) могут создавать тепло и свет, участвовать в транспортировке вещества. Если бить молотом по куску железа, то оба они сильно нагреются: энергия движущегося молота в

процессе удара превращается в тепло. По той же причине быстрый поток песчинок, выбрасываемый пескоструйным аппаратом, попав на гранитную плиту, не только очищает ее, но еще и нагревает.

Если в каком-либо веществе создать поток электронов или свободных ионов, то, сталкиваясь с атомами вещества и друг с другом, эти движущиеся частицы будут нагревать вещество – удар всегда удар. Тепловое действие, нагревание – первая профессия движущихся зарядов (рис. 3.2; 1, 2). Вторая их профессия – излучение света. Если хорошо разогнать свободные заряды, то они будут ударять по атомам вещества с такой силой, что те начнут светиться, как, скажем, светится сильно нагретый кусок железа.

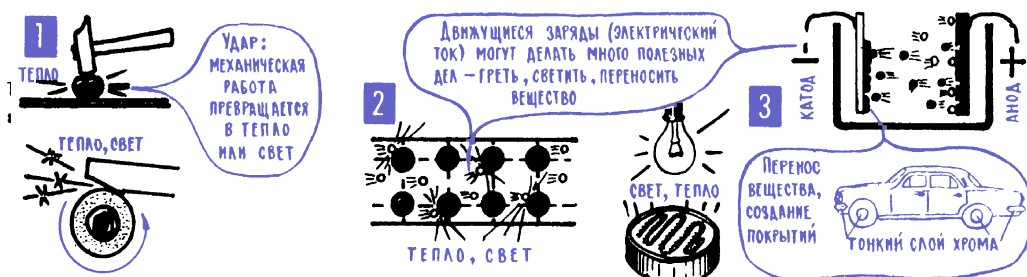


Рис. 3.2. «Профессии» электрических зарядов

Примечание редактора. Автор говорит об электрическом свете на примере ламп накаливания, которые по принципу устройства мало чем отличаются от электронагревательных приборов. В настоящее время лампы накаливания уже почти вытеснены из практики: в них определяющая часть энергии расходуется на бесполезное нагревание окружающей среды (причем настолько интенсивное, что может приводить к пожарам). Уже во времена первого издания книг автора – в 1960–1970-е годы, – широко применялись источники электрического света на иных принципах: люминесцентные лампы, которые намного экономичнее. В то время они были недостаточно совершенными и в быту применялись редко, но часто использовались для освещения производственных помещений и улиц. Сейчас и люминесцентные источники света постепенно вытесняются еще более экономичными и не содержащими вредных веществ светодиодными источниками на основе полупроводников. Однако во всех разновидностях электроосветительных приборов эффект излучения света обусловлен все тем же движением зарядов, хотя и разными физическими механизмами, лежащими в его основе.

И еще одна профессия движущихся зарядов. Создать поток ионов – это означает создать поток вещества, ионы – это ведь тоже атомы, а тот факт, что у них недостает электронов или есть лишние электроны, не мешает организовать его переброску из одного района в другой. Так, например, перебрасывая из растворов на поверхность какого-либо предмета ионы меди, никеля, хрома, серебра, золота, наносят на этот предмет тонкие

металлические покрытия (рис. 3.2; 3). Или наоборот – если создать поток ионов из какого-либо вещества в раствор, можно очистить это вещество от тех или иных примесей.

Мы пока еще, к сожалению, не готовы к рассказу о главной профессии свободных электронов и ионов – они еще умеют выполнять механическую работу, вращать диск электрофона, двигать диффузор громкоговорителя, тянуть электропоезда. И даже известная уже нам продукция движущихся зарядов – тепло, свет, транспорт вещества – стоит того, чтобы подробнее познакомиться с машинами и установками, где эти движущиеся заряды работают.

3. Проводники, полупроводники, изоляторы – вещества с различным содержанием свободных электрических зарядов. Количество свободных зарядов в каком-либо веществе зависит от многих факторов. Например, от чистоты вещества – бывает, что небольшие количества примеси способствуют или, наоборот, препятствуют появлению свободных электронов или ионов. У некоторых веществ число свободных электронов можно увеличить, если облучать эти вещества светом – свет просто выбивает электроны из атомов. У других веществ такой же эффект наблюдается под действием рентгеновского излучения. Количество свободных зарядов зависит также от температуры – чем она выше, тем интенсивнее собственные колебания атомов и молекул, тем больше слетает с них электронов. И конечно же, число свободных зарядов в веществе зависит от того, какое это вещество, насколько крепко в его атомах внешние электроны привязаны к ядру, насколько легко им вырваться на свободу. И от того, насколько велики атомы, насколько густо они расположены и долго ли сможет свободный электрон бродить в межатомном пространстве, не подвергаясь опасности наткнуться на свободное место в атоме и вновь очутиться на орбите.

Специалисты по электричеству привыкли делить все вещества на три основные группы – проводники, полупроводники и диэлектрики (изоляторы). К проводникам относятся вещества, в которых свободных зарядов очень много. Полупроводники – это те вещества, в которых свободных зарядов немного, но все же они есть. В диэлектриках свободных зарядов очень мало, почти нет (рис. 3.3).

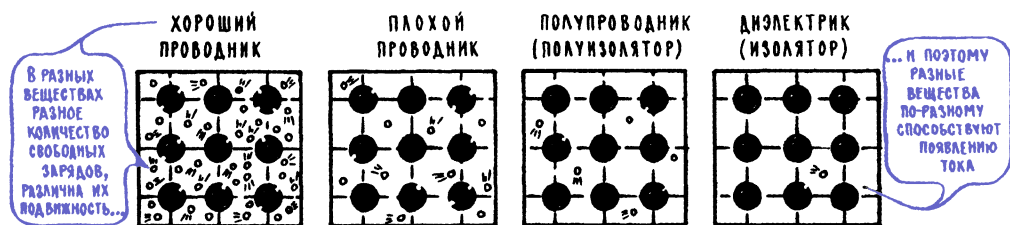


Рис. 3.3. Проводники, полупроводники и диэлектрики

В диэлектриках все электроны крепко связаны с ядром, и редко какой-то из них может вырваться на свободу. Нужно пересмотреть миллиарды миллиардов атомов диэлектрика, чтобы отыскать среди них один положительный ион, один атом, упустивший какой-нибудь свой электрон.

Теперь о проводниках.

К проводникам относятся все металлы. У них внешние электроны связаны с ядром очень слабо и почти каждый атом превратился в положительный ион, выпустил в межатомное пространство один или даже несколько электронов. В металлах так много свободных электронов, что по отношению к ним применяют выражение «электронный газ».

Проводниками могут быть жидкости и газы. «Могут быть» в данном случае нужно понимать так: количество свободных зарядов в жидкости (или в газе) зависит от того, какие вещества в ней растворены, какие химические процессы происходят. Например, дистиллированная вода – это изолятор, свободных зарядов в ней очень мало. Но стоит бросить в воду щепотку соли, как она становится проводником – соль растворяется, образует в воде большое количество свободных положительных и отрицательных ионов.

О полупроводниках пока умолчим. Это вещества со сложным характером. Придет время, и мы поговорим о них особо.

Не требуется, по-видимому, пояснять, что полноводная река работает лучше, чем тонкая струйка воды из водопроводного крана. Точно так же большое число движущихся свободных зарядов при прочих равных условиях могут выполнить большую работу, чем малое их количество. И если мы хотим увидеть от движущихся зарядов настоящую работу, нужно привлечь к делу как можно больше этих зарядов. А значит, нужно организовывать движение свободных зарядов не в диэлектрике, где их очень мало, а в проводнике, где зарядов-работников огромное количество.

4. Генератор и нагрузка – основные элементы электрической цепи.

Завод, где работают свободные электроны или ионы, получил название «электрическая цепь». Слово «цепь» в этом названии появилось потому, что заряды, как правило, последовательно, поочередно проходят по нескольким цехам, нескольким участкам.

Какой бы сложной ни была электрическая цепь, в ней обязательно есть два основных участка, два главных цеха. В одном из них свободные заряды получают энергию. Это генератор. На другом участке, в другом главном цехе заряды отдают полученную энергию. Этот цех называют нагрузкой – он нагружает генератор, отбирает у него энергию, использует ее для выполнения полезной работы. Так, например, в нагрузке свободные заряды – электроны и ионы, – которые генератор заставил двигаться, сталкиваются с «местными» атомами, ударяют по ним, и в результате этих ударов в нагрузке выделяется тепло или свет (рис. 3.4).

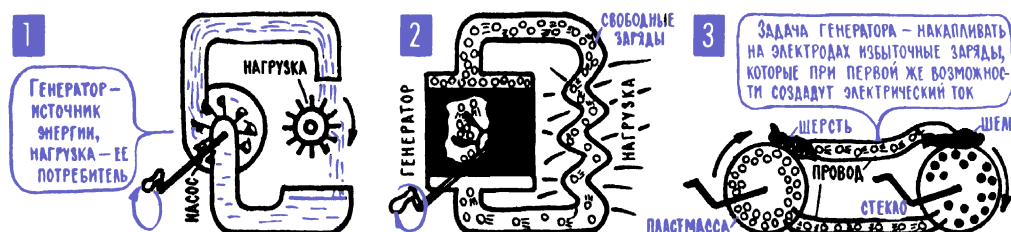


Рис. 3.4. Генератор и нагрузка в электрической цепи

Генератор и нагрузка – эти элементы входят в любую схему использования энергии, в любое устройство, предназначенное для выполнения каких-либо работ. Возьмем, к примеру, водяную мельницу. Могучие силы природы – солнце и ветер – испаряют воду с поверхности земли, собирают ее в прекрасные белые облака и выплескивают обратно на землю, в том числе на горные вершины. С гор вода течет вниз, сливается в русла быстрых рек. Так работает генератор, он создает потоки воды, снабжает их энергией. А мельничное колесо – нагрузка – эту энергию отбирает. Падающая вода вращает колесо, оно приводит в движение жернова, и они выполняют нужную работу – перемалывают зерно.

Две наэлектризованные палочки – стеклянная (+) и пластмассовая (–) – вот уже готов простейший генератор, который мог бы двигать свободные электрические заряды, заставляя их работать (вы уже, очевидно, обратили внимание – зарядами мы для краткости называем свободные электроны и ионы, наши микроскопические наэлектризованные детали). Стоит только соединить эти палочки проводником, как в нем сразу же появится электрический поток (принято говорить – ток, очевидно, тоже для краткости) – начнется упорядоченное движение свободных зарядов с одной палочки на другую. Проводник в этой системе играет роль нагрузки: проходя по нему, заряды работают, выделяют, вырабатывают какое-то количество тепла. А это значит, что наша цель достигнута, завод, где работают движущиеся заряды, построен.

Давайте для определенности предположим, что к наэлектризованным палочкам (генератор) подключен именно металлический проводник (нагрузка), и попробуем более подробно рассмотреть, как работает наш завод и какими показателями нужно оценивать его работу.

5. Наряду с веществом существует и такая форма материи, как поле. Этот небольшой раздел, пожалуй, самый сложный во всем нашем повествовании, и в значительной степени из-за него это повествование пришлось начинать издалека. С того, что человек нелегко и непросто постигал устройство мира. Что мир устроен намного сложнее, чем кажется с первого взгляда. И что нужно уметь считаться с реальностью, какой бы

непривычной она ни казалась, уметь подчиняться неотвратимым аргументам опыта. Уметь ограждать себя от неверия и внутренних протестов спокойной формулой – «так устроен этот мир...».

Как конкретно, через каких посредников взаимодействуют электрические заряды? Как наэлектризованная палочка тянет клочки бумаги? Ведь они находятся на значительном расстоянии, непосредственно не соприкасаются. Не может же палочка действовать на бумажки через Ничто, обязательно должно существовать Нечто, через которое один заряд тянет к себе другой...

Проще всего было бы предположить, что заряды как-то взаимодействуют через вещество, которое находится между ними, в нашем примере через воздух. Например, тянут или толкают друг друга через молекулы, атомы, электроны или еще какие-нибудь частицы, подобно тому, как паровоз передает свою тягу последнему вагону через все промежуточные вагоны. Но достаточно перенести эксперимент в безвоздушное пространство, и эта гипотеза безнадежно отпадает – в вакууме, в пустоте, где никакого промежуточного вещества нет, палочка притягивает клочки бумаги с такой же силой, как и в воздухе. А это значит...

А это значит, что, кроме реальности «вещество», к которому мы привыкли миллионы лет и прекрасно знаем все его свойства и повадки – массу, объем, геометрические формы, гравитационное притяжение, движение по инерции, плотность, температуру, – так вот, кроме вещества, кроме этой привычной реальности, есть еще совершенно иная, бестелесная, размазанная по пространству реальность, которой не заготовлено место в нашем сознании. Этой реальности, этой особой форме материи дано название «поле».

Поля бывают разные, разных, если можно так сказать, сортов. Вокруг электрического заряда существует электрическое поле, вокруг магнитов, с которыми мы начнем подробно знакомиться очень скоро, существуют магнитные поля, каждую массу – протон, яблоко, планету – окружает гравитационное поле. И именно через поля происходят все взаимодействия на расстоянии – взаимное притяжение масс, взаимодействие магнитов, притяжение или отталкивание электрических зарядов (рис. 3.5 и 3.6).

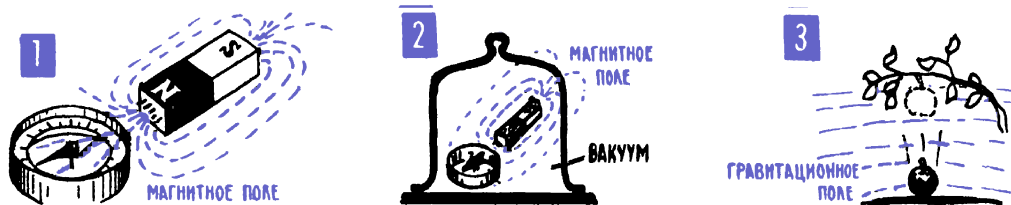


Рис. 3.5. Магнитное и гравитационное поля



Рис. 3.6. Электрическое поле

6. В замкнутой электрической цепи можно создать непрерывный ток, упорядоченное движение свободных зарядов. Как только мы подключим к наэлектризованным палочкам (генератору) металлический проводник (нагрузку), в этом проводнике сразу же начнется упорядоченное движение свободных электронов. Слово «упорядоченное» в данном случае должно подчеркнуть, что речь идет не просто о движении электронов, а о том движении, которое возникает под действием внешних электрических сил, под действием электрических полей наэлектризованных палочек. Свободные электроны никогда не стоят на месте, они, как всегда, непрерывно совершают свои хаотические рывки в разные стороны, рывки тем более энергичные, чем выше температура проводника. Но под действием электрических сил электроны, кроме этих хаотических движений, непрерывно смещаются в одном определенном направлении, и именно это смещение, именно это упорядоченное движение в одну сторону как раз и называется электрическим током.

Нетрудно сообразить, куда будут двигаться свободные электроны в нашем проводнике – пластмассовая палочка своим отрицательным зарядом (–) будет отталкивать электроны (–), и они будут уходить от нее, стеклянная палочка своим положительным зарядом (+) будет тянуть к себе электроны (–), и они будут двигаться к ней. Таким образом, поток электронов в проводнике будет направлен от того места, где их слишком много (–), к месту, где их не хватает (+). Короче, поток электронов будет двигаться от пластмассовой палочки к стеклянной, от «минуса» к «плюсу». Но вот проходит некоторое время, и ток в проводнике прекращается. Избыточные, лишние электроны, которые как раз и создавали отрицательный заряд пластмассовой палочки, уйдут из нее в проводник, а из него свободные электроны, в свою очередь, уйдут в стеклянную палочку и займут пустовавшие там места – положительный заряд стекла появлялся именно из-за нехватки электронов. В итоге все атомы пластмассы, отдав лишние электроны, станут нейтральными, все положительные ионы стекла, получив недостающие электроны, станут нейтральными, и ток в проводнике прекратится. Произойдет это все практически мгновенно, и ток в нагрузке ничего наработать не успеет.

Можно придумать несколько типов электрических генераторов, которые, в отличие от наших палочек, могли бы длительное время поддерживать ток в нагрузке. В самом простом из них можно производить непрерывную электризацию двух дисков – стеклянного и пластмассового, прижав к ним для этого куски шерсти и шелка (рис. 3.4; 3).

Теперь, как только с пластмассового диска в проводниках начнут уходить избыточные электроны и отрицательный заряд диска начнет уменьшаться, прижатый кусок шерсти добавит в пластмассу еще какое-то количество электронов – в этом-то и состоит процесс электризации пластмассы, при натирании в нее попадают лишние электроны, выдираемые из атомов шерсти. Точно так же, когда из проводника начнут поступать электроны в стеклянный диск, прижатый к нему кусок шерсти будет эти электроны убирать – электризация стекла состоит именно в том, что при натирании из его атомов вырываются электроны и переходят на натирающий предмет, то есть на кусок шерсти (шелка). Казалось бы, что благодаря всему этому избыток и недостаток электронов на дисках генератора будет все время поддерживаться, и в проводнике, подключенном к такому генератору, будет существовать непрерывный, непрекращающийся ток.

Но это только «казалось бы...». Между электрическими зарядами наэлектризованных дисков, кусков шерсти и свободных электронов, бегающих по проводнику, существуют довольно сложные отношения, и они порой приводят к странным на первый взгляд результатам, которые, однако, всегда объяснимы и справедливы. В электрической цепи неукоснительно действуют железные законы хозрасчета, и всякое событие происходит или не происходит в зависимости от соотношения многих разных сил, выступающих «за» или «против».

Мы подключили к нашему дисковому генератору металлический проводник-нагрузку, раскрутили диски, и по проводнику пошел ток. Однако, проникнув мысленным взором в проводник, мы увидим, что интенсивность упорядоченного движения электронов в нем постепенно снижается, и через какое-то время тока уже вообще нет. Почему? А потому, что через некоторое время на куске шелка, собирающем электроны со стеклянного диска, скопилось так много этих электронов, что ни одной новой частицы шелк принять уже не может. Это легко понять – по мере накопления электронов на шелке его отрицательный заряд (–) увеличивается, и каждому новому электрону все труднее преодолеть отталкивающее действие этого заряда, выйти из стекла в шелковую тряпку. Точно так же, по мере выдирания электронов из куска шерсти, примыкающего к пластмассе, у этого куска будет все больший положительный заряд (+), и он со все возрастающей силой будет удерживать электроны (–), пытающиеся уйти в пластмассу. Устранить эти неприятности и создать в проводнике-нагрузке непрерывный ток очень просто: соедините шерсть и шелк – тот кусок, что электризует стекло, и тот, что электризует пластмассу, – еще одним проводником.

По этому проводнику «сверхнормативные» электроны будут переходить с куска шелка (–) на шерсть (+), а вместе с этим исчезнет препятствие для непрерывной электризации дисков и непрерывного движения зарядов по цепи. Теперь уже по замкнутой (рис. 3.4).

Электрическая цепь с генератором, который мы до сих пор применяли, имеет ряд особенностей, и детально разобраться в том, что происходит в такой цепи, не очень просто. Трудности главным образом связаны с тем, что в генераторе использованы электроды из диэлектриков – стекла и пластмассы. (Электродами принято называть самые разные детали самых разных электрических машин и электронных приборов, в частности детали, к которым приходят или с которых уходят электрические заряды.) Нам, пожалуй, нет смысла тратить время для знакомства с данным типом искусственно придуманного генератора, а лучше перейти к генераторам, которые часто встречаются на практике.

7. В аккумуляторах и гальванических элементах для электризации электродов используются химические реакции. Что требуется от генератора? Во-первых, требуется, чтобы на электродах генератора был избыток электрических зарядов – на одном электроде избыток отрицательных зарядов (такой электрод называют отрицательным, или сокращенно «минусом»), на другом электроде – избыток положительных зарядов (это положительный электрод, «плюс»). Во-вторых, по мере того как свободные электроны будут уходить с «минуса» генератора в нагрузку и приходить с нагрузки на «плюс», нужно каким-то образом добавлять электроны в «минус» и убирать их из «плюса». Одним словом, нужно, чтобы в электродах генератора поддерживался избыток электрических зарядов.

Чтобы накопить на электродах генератора избыточные ионы и электроны, чтобы создать на электродах заметный суммарный заряд, нужно поработать. Первый же избыточный электрон (–), который вы втолкнете в отрицательный электрод, будет препятствовать вталкиванию следующего электрона (–): ничего не поделаешь, одноименные заряды отталкиваются. И первый же положительный ион (+), который после удаления электрона (–) появится в положительном электроде, будет препятствовать удалению следующих электронов (–): разноименные заряды, как всегда, притягиваются. Нет, конечно же, избыточные заряды на электродах генератора не появятся сами собой, чтобы накопить их, нужно затратить определенную энергию.

Это, в принципе, может быть энергия разных сортов (рис. 3.7) – световая, тепловая, энергия атомных излучений, механическая работа. А еще энергия химических реакций.

Когда вы отпускаете тетиву лука, выпускаете из него стрелу, то лук, точнее его только что натянутая тетива, отдает свою энергию – распад системы на составные части (лук-стрела) сопровождается выделением энергии, ее

уносит стрела. Когда в ведро с водой падает камешек, то появление новой системы (камешек-вода), объединение этих двух только что еще разных объектов, тоже сопровождается выделением энергии, в частности в виде слабого звука, всплеска воды.

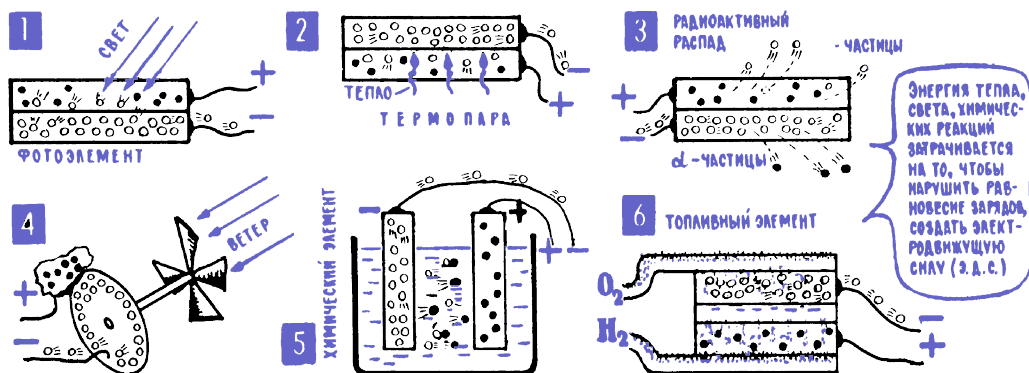


Рис. 3.7. Источники электрической энергии

Выделением энергии сопровождаются и химические превращения, распад молекул на части или объединение атомных комплексов в более крупные молекулярные системы. Энергия запасена в самой структуре химических веществ, подобно тому как она запасена в натянутой тетиве лука или в поднятом над водой камешке. Химические реакции в генераторе используют эти запасы энергии именно на то, чтобы непрерывно ввозить электроны в отрицательный электрод и вывозить их из положительного. То есть для того, чтобы накапливать электрические заряды на электродах.

Типичный химический генератор – это хорошо всем знакомый гальванический элемент (рис. 3.8, табл. 3.1). Он получил свое название по имени итальянского естествоиспытателя Луиджи Гальвани, который около двухсот лет назад обнаружил взаимосвязь между химическими процессами и электрическим током. Устройство всех гальванических элементов одинаково: два электрода, вставленных в электролит, в жидкость, где как раз и происходят основные химические реакции, которые в итоге электризуют электроды. Различаются гальванические элементы самим веществом электродов и электролита и, следовательно, конкретным типом реакций.

В наиболее популярном марганцево-цинковом элементе в качестве отрицательного электрода, «минуса» (–), используется цинк (Zn), в качестве положительного, «плюса» (+), – порошкообразная двуокись марганца (MnO_2), а электролитом служит раствор хлористого аммония (NH_4Cl). Цинковый электрод (–) – это чаще всего стаканчик, в который спрятана вся «начинка» элемента. Двуокись марганца (+) смешана с графитом и

соединена с внешним миром через угольный стержень, который часто по ошибке принимают за положительный электрод. Электролит входит в кашеобразную массу, которая соприкасается и с цинком (–), и с двуокисью марганца (+).

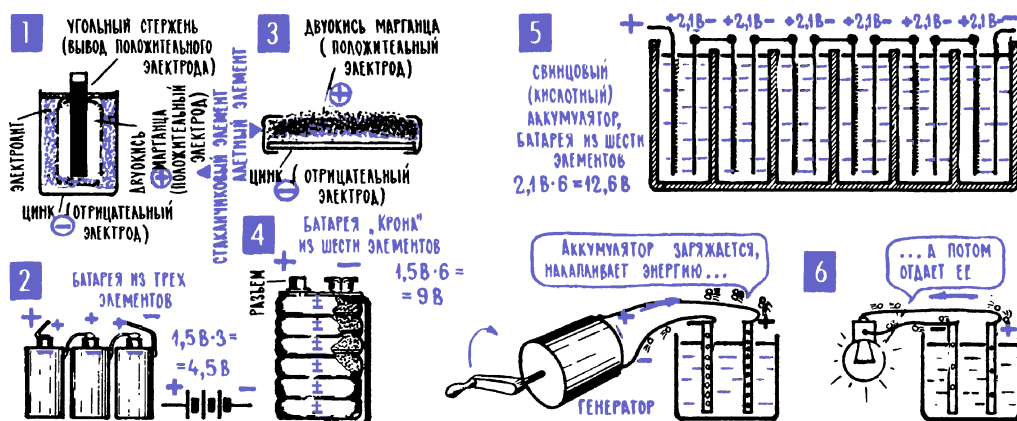


Рис. 3.8. Химические (гальванические) элементы

Процессы в гальваническом элементе в самом упрощенном виде можно описать так. В результате химических реакций между цинком и электролитом из отрицательного электрода уходят положительные ионы цинка (Zn^{++} – атом с двумя недостающими электронами; их отбирает атом хлора, который уходит из NH_4Cl и соединяется с Zn), и в электроде остаются избыточные свободные электроны. Так на цинковом электроде образуется значительный отрицательный заряд «минус». Одновременно совсем другие положительные ионы (NH_4^+ – молекулярный блок с одним недостающим электроном), которые появляются в электролите из-за его самопроизвольного химического распада, отбирают свободные электроны из двуокиси марганца, и у нее появляется значительный положительный заряд, «плюс».

Когда гальванический элемент никуда не подключен, то на его электродах накапливается некоторое количество избыточных зарядов, и после этого химические реакции в основном прекращаются. Потому что химическая реакция может вталкивать на электрод заряды лишь до тех пор, пока у нее хватит сил, чтобы преодолеть отталкивающее действие таких же зарядов, уже скопившихся на электроде. Но как только к химическому генератору будет подключена нагрузка и в цепи начнется ток, то есть в ней начнется движение электронов от цинка (–) к двуокиси марганца (+), то тут же химические реакции заработают, убирая с одного электрода положительные ионы, а с другого – свободные электроны. Одновременно внутри генератора будут пополняться запасы «отбирателей» зарядов (Cl и NH_4^+),

причем именно за счет химических реакций (распад NH_4Cl). «Отбиратели» будут двигаться каждый к «своему» электроду и соединяться каждый со «своим» зарядом (Cl^- с ионом цинка, NH_4^+ – с электроном). И до тех пор, пока эти реакции будут идти, до тех пор, пока хватит химического сырья, наш генератор будет работать, будет происходить электризация электродов, и они будут создавать ток во внешней цепи, в нагрузке.

А когда запасы сырья кончатся или появятся какие-либо другие помехи для химических реакций, то эти реакции прекратятся, и генератор перестанет быть генератором. Важная характеристика химического источника тока – его емкость (рис. 3.9, табл. 3.1), она говорит о том, как долго этот источник может создавать ток той или иной величины. Понять эту характеристику будет нетрудно, после того как мы познакомимся с единицами измерения тока (гл. 3; 10).

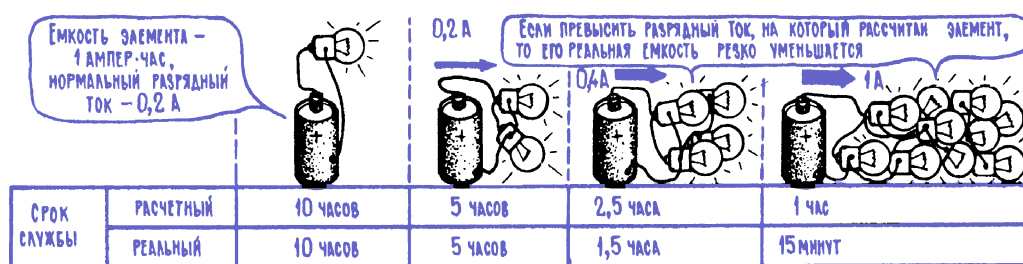


Рис. 3.9. Емкость химического элемента

Примечание редактора. Автор описал устройство простейшего марганец-цинкового гальванического элемента. Подобные элементы называются еще «солевыми» (так как электролит в них – раствор соли, в данном случае хлористого аммония), импортные элементы такого типа маркируются как «General purpose» (общего назначения). Более распространены в настоящее время т. н. щелочные (alkaline) марганец-цинковые элементы, они имеют большую емкость и срок хранения. По принципу работы они мало чем отличаются от описанных автором солевых, только электролитом в них служит раствор щелочи, обычно гидроксида калия. Основные характеристики современных типов гальванических элементов приведены в табл. 3.1.

Если вы разберете негодный гальванический элемент, то увидите в нем частично разрушенный цинковый стакан – часть цинка уже израсходовалась, ушла в электролит в виде положительных ионов. Это одна из причин того, что элемент вышел из строя, разрядился. В этом отношении аккумуляторы выгодно отличаются от гальванических элементов – разрядившийся аккумулятор можно вновь зарядить, накачать его энергией от другого источника. При этом восстановится состав электродов и электролита, аккумулятор вновь сможет создавать ток в нагрузке (рис. 3.8; 6).

Таблица 3.1. Некоторые разновидности одноразовых гальванических элементов

Напря- жение, В	Обозначение (типоразмер)			Размеры, мм		Примерная емкость, мА·ч**
	Торговое (ANSI)	Международное (МЭК)*	Отечественное, (устар. ГОСТ)	Диаметр (высота × ширина), мм	Длина (толщина), мм	
4,5	–	3R12, 3LR12	3336	62	22	6000
9	1604	6LR6 (щелочная), 6F22 (солевая, литиевая)	«Крона»	17,5	48	600 750***
1,5	AAA	R03, LR03, FR03	286	10,5	45	1200
1,5	AA	R6, LR6, FR6	316	14,5	50,5	2500
1,5	C	R14, LR14	343	26,2	50	7500
1,5	D	R20, LR20	373	34,2	61,8	15 000– 18 000

* Добавление буквы L означает щелочной элемент, F – литиевый (литий-железо-дисульфидный Li/FeS₂), отсутствие этих букв означает простейший солевой элемент.

** Для щелочных элементов.

*** Литиевый элемент 1604LC.

Главная, пожалуй, характеристика химических источников тока, как, впрочем, и всех других источников электрической энергии, говорит о том, насколько интенсивно на электродах происходит накопление избыточных зарядов. Чем больше силы, которые производят электризацию электродов (трение, химические реакции, тепло, свет), тем больше суммарный заряд, который на этих электродах накопится. Тем, следовательно, сильнее будут выталкиваться свободные электроны с «минуса» в нагрузку, тем сильнее они будут втягиваться из нагрузки в «плюс». И тем, значит, энергичнее будет движение электронов в нагрузке, электрический ток.

Эта характеристика, этот показатель уровня электризации, называется электродвижущей силой генератора, и именно с нее мы начинаем знакомство с конкретными характеристиками электрической цепи.

8. Электродвижущая сила (ЭДС), ток и сопротивление – важнейшие характеристики электрической цепи. Важнейшие характеристики грузового автомобиля: грузоподъемность, размеры кузова, мощность двигателя, максимальная скорость, расход горючего, стоимость. Важнейшие характеристики водяной мельницы: высота подъема воды (высота, с которой вода падает на мельничное колесо); расход воды (количество воды, которое падает на колесо в единицу времени, например в секунду); скорость вращения жерновов; рабочая поверхность жерновов; трение в подшипниках водяного колеса, в подшипниках жерновов и другие потери энергии; производительность – количество зерна, перемалываемого в час...

Важнейшие характеристики электрической цепи (рис. 3.10) – электродвижущая сила генератора, сила тока в цепи, сопротивление нагрузки, общее сопротивление цепи...

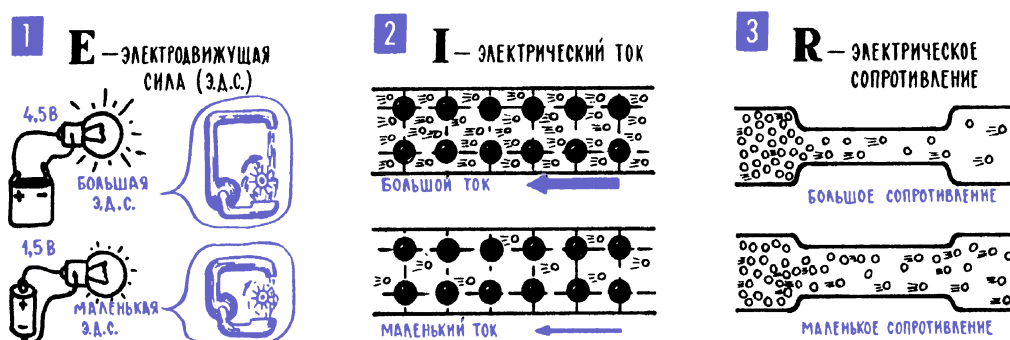


Рис. 3.10. Важнейшие характеристики электрической цепи

В названиях двух первых характеристик встречается слово «сила», однако в обоих случаях оно скорее литературное украшение, чем точный физический термин. В физике «сила» – совершенно определенное, точное понятие, она может быть точно измерена, выражена точными цифрами. В повседневной речи слово «сила» хотя и имеет всегда один и тот же общий смысл, однако употребляется в самых разных конкретных значениях, часто не имеющих ничего общего с «силой», как ее понимают физики. Вспомните выражения «сильный дождь», «знание – сила», «вооруженные силы», «сильный ученик». В названии «электродвижущая сила» слово «сила» тоже введено как бы для образа. Сама же электродвижущая сила – сокращенно ЭДС – показывает совсем не силу, а работу, которую может выполнить генератор, перемещая заряды по электрической цепи.

Примечание редактора. Автор на протяжении всей этой главы и значительной части следующей (вплоть до раздела гл. 4; 7) употребляет понятие «электродвижущая сила» вместо привычного «напряжения». Строго говоря, это более корректно, так как напряжение, по определению, есть всего лишь разность потенциалов на определенном участке цепи, то есть только часть общей ЭДС. Например, для электрохимических источников тока (гальванических элементов, батареек) ЭДС равна напряжению на их контактах, измеренному на холостом ходу, без подключения нагрузки (см. также гл. 4; 9). Как только мы подключим нагрузку, часть ЭДС «сядет» на внутреннем сопротивлении батарейки, и напряжение на контактах будет меньше величины ЭДС, причем потеря будет тем больше, чем более мощная нагрузка и менее мощная батарейка (при этом величина ЭДС сама по себе остается прежней, см. рис. 4.10; 4 в следующей главе). Так как вольтметр, подключенный к батарейке на холостом ходу, тоже потребляет ток, хоть и очень малый, то, вообще говоря, теоретическую величину ЭДС данного источника тока мы на практике точно измерить

не можем. А даже если как-то исхитримся ее узнать, то все равно эта величина нам мало что даст – нам на практике важна именно та часть ЭДС, которая делает полезную работу, а не впустую теряется на нагрев батареек. Именно поэтому в инженерной практике, в отличие от науки физики, понятие электродвижущей силы употребляется очень редко – вместо этого привыкли говорить о «напряжении генератора», «напряжении гальванического элемента», подразумевая величину на контактах, которую покажет вольтметр при данных условиях работы (см. рис. 4.10). Условия эти при необходимости могут уточняться отдельно – «на холостом ходу», «под нагрузкой 1 Ом», «при токе в 0,5 А» и т. п.

Точно так же автор именует все источники электрической энергии «генераторами», хотя под генератором в настоящее время понимается определенная конструкция для преобразования тепловой или механической энергии в электрическую (подробнее см. гл. 5; 16), а источники электрической энергии называют «источниками тока» (может уточняться – постоянного или переменного) или «источниками питания».

Тем не менее мы не сочли необходимым нарушать авторский замысел и сохранили авторскую терминологию.

Перечисляя важнейшие характеристики водяной мельницы, мы назвали высоту подъема воды. Это действительно важнейшая характеристика, она говорит о том, насколько работоспособна поднятая плотиной вода: чем с большей высоты падает вода на мельничное колесо, тем лучше оно работает. Ясно, что получение полезной работы – главная цель сооружения мельничной плотины, подъема воды на высоту. А значит, вместо характеристики «высота подъема воды» вполне можно было бы ввести другую характеристику – «вододвижущая сила» или, точнее, «работоспособность одного литра воды», которая сразу давала бы конечный результат, показывала бы, какую работу может выполнить каждый литр воды, падающий с плотины на мельничное колесо. Мы же не стали пользоваться этой удобной «работоспособностью» и выбрали «высоту подъема» только потому, что эта характеристика, по-видимому, более удобна для строителей мельничных плотин.

У любого электрического генератора одна задача – создавать ток в цепи, но о том, насколько успешно он готов справиться с данной задачей, могли бы рассказать разные характеристики генератора. Скажем, концентрация избыточных зарядов на его электродах: чем больше эта концентрация, тем энергичнее заряды движутся по цепи; сила электрического поля, которое эти электроды создают; энергия, которую получает каждый единичный заряд – каждый электрон при его выталкивании из «минуса» и втягивании в «плюс». Или, что, по сути дела, то же самое, работа, которую каждый электрон может совершить, двигаясь по цепи. (Это очень похоже на работоспособность литра падающей воды.) Вот эта последняя характеристика и признана наиболее удобной, она очень точно показывает, насколько хорошо генератор может справляться с главными своими обязанностями:

выполнять работу, двигая заряды по электрической цепи. И именно эта характеристика – работоспособность генератора, точнее работоспособность зарядов, которые он двигает по цепи, – и называется электродвижущей силой генератора, или сокращенно ЭДС.

Чтобы иметь точное представление о величине тока в каком-нибудь участке электрической цепи, этот участок мысленно перегораживают, устраивают в нем своего рода пограничный контрольный пункт. А затем подсчитывают, сколько свободных электронов или ионов проходит через эту воображаемую границу за единицу времени, скажем за секунду. И чем больше зарядов пройдет через «перегородку», тем, значит, интенсивнее движение зарядов, тем больше величина тока, больше (сильнее) ток. Чуть забегаая вперед, отметим, что величина тока зависит от ЭДС генератора – чем большую энергию может передать генератор свободным зарядам, тем быстрее они будут двигаться и тем большее количество зарядов включится в электрический ток. Тем сильнее этот ток.

Сопротивление, или, как еще говорят, электрическое сопротивление, – характеристика и всей цепи в целом, и отдельных ее участков. Сопротивление – итоговая характеристика, в которой учтено множество различных сложных процессов. Таких, например, как уход электронов с внешних орбит некоторых атомов, или собственные тепловые колебания атомов и молекул, или еще сложность атомов, из которых состоит вещество, наличие в этом веществе каких-либо примесей. Просуммировав все эти факторы, характеристика «сопротивление» говорит о том, насколько легко генератору создавать ток в данном участке электрической цепи. Даже не вдаваясь в подробности, можно представить себе, что ток создается тем легче, чем легче внешние электроны покидают атом и чем больше этой свободной рабочей силы блуждает в межатомном пространстве. И еще ток создается тем легче, чем меньше размеры атома и чем дальше атомы расположены один от другого – в этом случае электрону легче двигаться в межатомном пространстве.

Сопротивление, как говорит сам смысл этого слова, показывает, насколько данный участок цепи или вся цепь в целом сопротивляются созданию электрического тока. И чем меньше сопротивление какого-либо проводника, тем легче генератору создавать в нем ток, тем больше будет этот ток при прочих равных условиях.

Не кажется ли вам, что в нашем рассказе об электрической цепи слишком часто используются слова там, где должны быть цифры? Мы говорим «много», «мало», «сильный», «слабый», «больше», «меньше», вместо того чтобы точно сказать, сколько, на сколько, во сколько раз. Слова помогают понять суть дела, понять, как говорится, качественную сторону. Это очень важно, но не всегда достаточно. Можно понимать всю важность щедрого приема гостей, но нельзя прийти в магазин и сказать: «Продайте мне, по-

жалуйста, много печенья и очень много конфет». Вместо этих слов нужно назвать точные цифры 2 и 8 или 2 и 3 и добавить к ним единицы измерения – «килограмма».

Если в своем путешествии в мир электротехники и электроники вы ставите перед собой практические задачи, скажем, изучение конкретных электронных приборов, знакомство с конкретными электронными установками или даже самостоятельное изготовление некоторых из них, то вам необходимо сделать следующий шаг – от общих представлений об электрическом заряде, токе, ЭДС, сопротивлении перейти к их количественной оценке.

9. Единица длины – метр, массы – килограмм, силы – ньютон, работы – джоуль, мощности – ватт. Если длину измерять в метрах, время в секундах, а скорость в километрах в час, то всякий раз, вычисляя скорость по известным пути и времени или путь по известным времени и скорости, придется производить утомительный пересчет, перевод километров в метры или часов в секунды. Особенно неудобны такие пересчеты, когда сталкиваются вместе в одной задаче много разных характеристик, например мощность, сила, расстояние, скорость, время, работа, энергия.

Чтобы избежать лишних пересчетов, переводов одних единиц в другие (было время, когда приходилось переводить футы в метры, метры в мили, мили в сантиметры, сантиметры в дюймы, дюймы в аршины, аршины в морские мили, килограммометры в дюймофунты, дюймофунты в тонно-мили – запутаешься!), созданы системы единиц, в рамках каждой такой системы самые разные единицы связаны предельно простыми соотношениями.

Для практических целей чаще всего употребляется система СИ – «система интернациональная», или иначе система МКСА – метр-килограмм-секунда-ампер (рис. 3.11). Единица длины в этой системе – *метр*. Его получили так: измерили длину меридиана, который проходит через Париж, разделили ее на 40 000 000 равных частей и объявили: «Отныне отрезок, равный одной сорокамиллионной парижского меридиана, будет служить единицей при измерении длины и называться метром». Конечно, метром пользоваться не всегда удобно – очень громоздкие цифры получаются, если измерять в метрах расстояние до Солнца или размеры атома. Поэтому было введено последовательное десятикратное уменьшение и увеличение метра в 10, 100, 1000 и большее число раз. Из метра легко были получены более мелкие единички с приставками: деци – десятая часть, санти – сотая часть, мили – тысячная и т. д. И более крупные единицы с приставками кило – в тысячу раз больше, мега – в миллион раз больше и т. д. Эти приставки позволяют легко получить единицы более крупные и более мелкие, в зависимости от того, что в данном случае удобнее (табл. 3.2).



Рис. 3.11. Международная система единиц СИ

Таблица 3.2. Кратные и дольные приставки к единицам измерения

Название	Обозначение		Величина
	русское	международное	
тера	Т	<i>T</i>	$10^{12} = 1\,000\,000\,000\,000$
гига	Г	<i>G</i>	$10^9 = 1\,000\,000\,000$
мега	М	<i>M</i>	$10^6 = 1\,000\,000$
кило	к	<i>k</i>	$10^3 = 1000$
гекто	г	<i>h</i>	$10^2 = 100$
дека	да	<i>da</i>	10
деци	д	<i>d</i>	$10^{-1} = 0,1$
санти	с	<i>c</i>	$10^{-2} = 0,01$
милли	м	<i>m</i>	$10^{-3} = 0,001$
микро	мк	μ	$10^{-6} = 0,000\,001$
нано	н	<i>n</i>	$10^{-9} = 0,000\,000\,001$
пико	п	<i>p</i>	$10^{-12} = 0,000\,000\,000\,001$

Примеры: 1 мкА (микроампер) = 10^{-6} А = 0,000 001 А (ампера);

5 МГц (мегагерц) = $5 \cdot 10^6$ Гц = 5 000 000 Гц (герц);

0,02 В (вольта) = 20 мВ (милливольт);

3 мг (миллиграмма) = 0,003 г (грамма);

0,05 м (метра) = 5 см (сантиметров) = 50 мм (миллиметров);

1 пФ (пикофарад) = 10^{-12} Ф (фарад) = 10^{-6} мкФ = 0,000 001 мкФ (микрофарада);

10 000 нФ (нанофарад) = 10 мкФ (микрофарад);

2 нс (наносекунды) = $2 \cdot 10^{-9}$ с = 0,000 000 002 с.

Единица длины помогла получить и единицу массы – килограмм: это масса литра (кубического дециметра) обычной воды при температуре 4 °С. А из единицы массы получилась и единица силы для системы СИ – это *ньютон*, сила, с которой притягивается к Земле масса в 102 грамма (цифра эта появилась из соотношения: 1 килограмм силы = 9,8 ньютона; число 9,8 берет свое начало от земного ускорения 9,8 м/с²).

Ньютон – единица непривычная, долгие годы единица силы, или, что более понятно, единица веса (вес – это есть сила, с которой данное тело притягивается к Земле), была крупнее и называлась так же, как и единица массы, – килограмм. Просто единицей веса выбрали вес литра воды и дали этой единице такое же название, какое было у единицы массы. Это очень неудобно: одинаково называть две совершенно разные единицы, определяя две совершенно разные характеристики. Приходилось каждый раз к слову «килограмм» давать пояснения, к чему он относится – к массе или к весу. Так и говорили: «килограмм массы» или «килограмм силы». В системе СИ такой путаницы быть не может, здесь для силы (веса) есть своя собственная единица. А если вам придется переводить килограммы веса в ньютоны, то нетрудно запомнить, что килограмм – это примерно 10 ньютонов, а ньютон – примерно 100 граммов веса.

Примечание редактора. Широкое применение килограмма силы вместо ньютона обусловлено удобством оценки массы по величине ее веса на поверхности Земли – в этом случае с достаточной для практики точностью значение массы в килограммах или граммах будет численно совпадать со значением веса в килограммах или, соответственно, граммах силы. Чтобы отличить «грамм силы» от «грамма массы», первый сокращенно обозначают или большой буквой Г, или сокращением гс (в стандартах предусмотрено и то, и другое обозначение). Поэтому правильно писать «вес медного цилиндра равен 5 кГ (кгс)», но «масса медного цилиндра равна 5 кг», «удельный вес бензина 0,7 кГ/л (кгс/л)», но «удельная масса бензина 0,7 кг/дм³», «атмосферное давление на уровне моря равно 1 кГ/см² (кгс/см²)». Аналогичное правило относится к тоннам массы (т) и тоннам силы (Т, тс). В старой зарубежной литературе для килограмма силы иногда можно встретить устаревшее сокращение *kp* («килопонд») – его не надо путать с «килофунтом», хотя фунт по-английски также произносится как «понд» (*pound*). Просто и фунт (сокращенно *lb* – для массы и *lbf* – для силы), и «килопонд» произошли от одного и того же латинского слова *pondus* (вес, тяжесть), однако фунт с приставкой «кило» никогда не употребляется, для больших величин в британско-американской системе мер есть другие единицы измерения.

Промелькнувшая чуть раньше единица времени секунда получена как 1/86 400 часть суток, то есть времени одного оборота Земли вокруг своей оси. Разумеется, в наше время, когда секунды, метры, килограммы нужно отмерять с очень высокой точностью, пользуются и чрезвычайно точными эталонами времени, длины, массы и всех других физических величин. Эталоны эти часто берут из мира атомов, отсчитывая, например, время по

очень стабильному «маятнику» – электромагнитным колебаниям, возникающим, в частности, при переходе электрона с одной орбиты на другую.

Единица работы в системе СИ – *джоуль*. Это работа, которую производит сила в 1 ньютон на пути в 1 метр, то есть, например, работа, которую нужно выполнить, чтобы поднять на высоту в 1 метр полстакана воды (без учета веса стакана). Легко получается в системе СИ и единица мощности. Напомним, мощность – это работа, которая выполняется за единицу времени, например за секунду. Мощность – характеристика очень важная как для поставщиков, так и для потребителей энергии. Конечно, и общий объем работы очень важен, но иногда нужно еще знать, насколько интенсивно ведутся работы, сколько чего делается за определенное время, например за час или за секунду.

Когда мы говорим, что какой-то генератор может выполнить работу в 1 джоуль, то этого еще недостаточно, чтобы представить себе такой генератор. За сколько времени он наработает этот джоуль? Если за секунду – неплохо. Если за сотую долю секунды – еще лучше, это значит, что генератор работает энергичнее, быстрее выполняет данный объем работ. А если работа в 1 джоуль будет выполнена за месяц, то, значит, генератор работает чрезвычайно слабо, вяло.

То же самое и в отношении потребителей энергии. Если, например, известно, что в электрической лампочке ток выполняет работу в 1000 джоулей, то вы не сможете представить себе яркость лампочки, пока не узнаете, за сколько времени выполняется эта работа. Если за секунду – хорошо, такая лампочка светит очень ярко, ее эквивалент – тысяча свечей. Если работа в 1000 джоулей растянута на минуту, то лампочка светит достаточно тускло. Ну а если лампочка только за час выполняет работу в 1000 джоулей, превращая электрическую энергию в свет, то светит такая лампочка, скорее всего, как одинокий тлеющий уголек.

В системе СИ единица мощности – *ватт*. Это работа в 1 джоуль, выполненная за 1 секунду. Если генератор нарабатывает 1 джоуль за 2 секунды, то мощность этого генератора уже меньше – всего 0,5 ватта. А если работа в 1 джоуль выполняется за 0,1 секунды, то, значит, генератор работает энергичнее, его мощность 10 ватт.

Как видите, большую группу важных единиц мы получили, начав с метра, единицы длины. Другую группу мы сейчас получим, начав с единицы электрического заряда.

10. Единица электрического заряда – кулон, величины тока – ампер, электродвижущей силы – вольт, сопротивления – ом. С метром дело было просто – отмерил меридиан, разделил на 40 000 000, и метр готов. А где взять единицу электрических свойств, электрического заряда? Как практически получить такой единичный заряд? Или, по крайней мере, как его представить себе?

Единицу электрического заряда лучше всего взять в атоме. Там находятся частицы, у которых имеются самые минимальные порции электрических свойств, причем электрические свойства этих частиц, их электрический заряд, всегда одинаковы, всегда стабильны. Вы, конечно, вспомнили: это протон, частица с минимальным положительным зарядом, и электрон, частица с точно таким же по величине, но уже отрицательным зарядом (см. также гл. 4; 7).

Заряд электрона (или, что количественно то же самое, заряд протона) – очень удобная единица заряда. Но очень маленькая. Пользоваться ею на практике было бы так же неудобно, как, скажем, измерять в миллиметрах расстояние между планетами. Поэтому единица заряда выбрана значительно более крупная – единицей признан электрический заряд, равный суммарному заряду $6\,241\,516\,000\,000\,000\,000$ электронов (сокращенная запись – $6,24151 \cdot 10^{18}$). Эта единица, вобравшая в себя около 6 миллиардов миллиардов зарядов электрона, получила название *кулон*.

Имея единицу заряда, легко ввести и другие недостающие нам электрические единицы. Единица силы тока (величины тока, тока) – *ампер* – получается так: если через поперечное сечение проводника за одну секунду проходит суммарный электрический заряд в 1 кулон, то ток в таком проводнике равен 1 амперу¹. Теперь представим себе, что движение электронов проходит более вяло, и в результате за секунду через сечение проводника проходит уже не кулон, а полкулона, то есть не 6, а 3 миллиарда миллиардов электронов (или, что то же самое, 6 миллиардов миллиардов электронов проходит за 2 секунды). В этом случае ток в цепи – 0,5 ампера.

Здесь уместно вспомнить, что в некоторых проводниках под действием электрических сил движутся и создают ток не только свободные электроны, но еще и свободные положительные ионы (рис. 3.2). Причем если электроны двигаются от выталкивающего их «минуса» к притягивающему их «плюсу», то положительные ионы идут в противоположном направлении: «плюс» их выталкивает, «минус», наоборот, притягивает. Как же в этом случае определяется величина тока? Какие учитываются заряды?

На первый взгляд может показаться, что в счет нужно принимать разность между положительными и отрицательными зарядами. Потому что одни идут туда, другие – обратно, и какое движение преобладает, то в итоге и создает ток.

Такая арифметика, однако же, несправедлива, а значит, и неверна. Потому что независимо от того, в какую сторону идут заряды и какие это заряды – электроны или положительные ионы, – они всегда работают. И те, и другие, к примеру, в процессе своего движения ударяют по атомам, вы-

¹ В системе СИ первичной величиной считается ампер (А), который определен через величину элементарного заряда, а кулон определяется как величина заряда, прошедшего через проводник при силе тока 1 А за время 1 с.

рабатывают тепло, свет. Поэтому, определяя ток в цепи, где движутся разные типы зарядов, нужно учитывать общее их количество, учитывать не разность, а сумму. Если по проводнику за 1 секунду в одну сторону прошло 6 миллиардов миллиардов электронов (1 кулон) и за то же время в другую сторону прошло столько же положительных однозарядных ионов (атомов с одним потерянным электроном), то ток в такой цепи составляет 2 ампера. Потому что всего через поперечное сечение проводника за 1 секунду прошел заряд в 2 кулона.

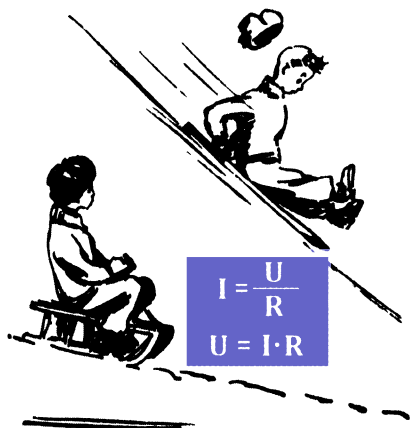
Следующая на очереди – единица электродвижущей силы, *вольт*. Чтобы лучше понять, что она означает, можно в порядке шутки ввести аналогичную единицу, которая позволит оценить работоспособность мельничной плотины. Будем считать, что если литр воды, падая с этой плотины, может выполнять работу в 1 джоуль, то ее «вододвижущая» сила, то есть сокращенно ВДС плотины, составляет 1 мельник. А если тот же литр воды, падая вниз, наработает 5 джоулей, то ВДС плотины будет уже в 5 раз больше – 5 мельников. На эту характеристику, на ВДС, очень похожа наша электродвижущая сила – работа, которую может выполнить генератор, перемещающий по цепи определенный электрический заряд (см. гл. 3; 28). Единица заряда у нас теперь есть – это кулон. Единица работы тоже есть – джоуль. Отсюда и выходит, что единица ЭДС – вольт – это такая электродвижущая сила, при которой каждый заряд в 1 кулон, пройдя по цепи, совершит работу в 1 джоуль.

После введения вольта можно другими глазами посмотреть на уже знакомые нам генераторы, в частности на батарейку для карманного фонаря. Ее ЭДС – около 4 вольт, а значит, каждый кулон зарядов, которые эта батарейка протолкнет по цепи, может выполнить работу в 4 джоуля. Это немало, когда дело касается механической работы: вспомните, что одного джоуля достаточно, чтобы поднять полстакана воды на метровую высоту. Но вот для тепловых работ 4 джоуля – величина очень небольшая: чтобы вскипятить полстакана воды, нужно выполнить работу в 10–20 тысяч джоулей.

Единица сопротивления – *ом* – тоже произвольная величина. Сама характеристика «сопротивление» говорит о том, насколько легко генератору создавать ток в данном проводнике. Так вот, если под действием ЭДС в 1 вольт в проводнике идет ток в 1 ампер, то сопротивление такого проводника принимается за единицу сопротивления – 1 ом. Если при той же ЭДС ток меньше, значит, сопротивление больше одного ома, если ток больше, значит, сопротивление меньше ома. Например, если при ЭДС 1 вольт ток в проводнике 10 ампер, то, значит, сопротивление проводника в десять раз меньше единичного, то есть составляет 0,1 ома. А если при ЭДС 1 вольт ток всего 0,001 ампера, то сопротивление 1000 ом, или 1 килоом. В заключение знакомства с набором единиц, так сказать, первой необходимости отметим, что все эти единицы имеют сокращенные обозна-

чения, которыми в дальнейшем мы будем широко пользоваться. Вот эти обозначения: метр – м, килограмм – кг, секунда – с (иногда в нарушение правил для наглядности пишут сек), ньютон – Н, джоуль – Дж, ватт – Вт, кулон – Кл, вольт – В, ампер – А, ом – Ом.

Обратите внимание: названия единиц, которые произошли от собственных имен, при сокращении пишутся с большой буквы. Это дань уважения людям, чьи имена присвоены этим единицам измерения.



ГЛАВА 4

Конституция электрической цепи

1. Закон Ома: чем больше ЭДС, тем больше ток; чем больше сопротивление, тем меньше ток. То, о чем рассказано в этой главе, есть нечто очень важное, а может быть, даже самое важное на вашем пути в электронике. Вам сейчас предстоит познакомиться с основными законами электрических цепей, и прежде всего с законом Ома. Выучить и пересказать законы электрических цепей несложно. Но этого мало – вам нужно понять и прочувствовать все описанные этими законами взаимозависимости и взаимные влияния электрических величин. Вчитываясь в объяснения и всматриваясь в рисунки, вы должны при каждом удобном случае спрашивать себя: «А почему именно так?» – и отвечать себе на все эти «почему?» обстоятельно и точно. Если вы преодолеете эту главу, если поймете существо законов электрических цепей и привыкнете к ним, то можете смело считать, что путь в электронику для вас открыт.

Торжественные слова «Закон Кулона», или «Третий закон Ньютона», или «Закон Ома для участка цепи» мы часто воспринимаем так, будто бы Кулон, Ньютон и Ом придумали какие-то законы, которым теперь подчиняется природа и которые поэтому нужно учить и знать на экзаменах. В действительности же дело обстоит совсем не так. И вообще, в выражении «закон природы» смысл слова «закон» не имеет ничего общего с его привычным, житейским смыслом.

Когда мы говорим «закон», то имеем в виду определенные правила, которые придумали сами люди, для того чтобы упростить и упорядочить какие-то свои отношения. Законы природы никто не придумывает, люди только записывают их под диктовку реальности. Законом природы принято называть подмеченную человеком некоторую общую, одинаковую черту в какой-то группе явлений, некоторые правила, которые действуют в природе только потому, что все в ней устроено именно так, а не иначе. Если бросать с высокой башни камень, медный подсвечник и кусок мыла, то эти разные предметы, падая на землю, будут постепенно ускорять свое

движение, причем одинаково – каждую секунду их скорость будет увеличиваться на 9,8 м/с. Одинаковое ускорение всех падающих предметов может быть подтверждено в любых других подобных экспериментах, и именно такую одинаковость, разумеется после того, как она замечена и точно описана, можно называть законом природы.

Закон Ома не относится к числу фундаментальных законов природы. Он рассказывает о довольно узком круге явлений в достаточно скромной системе – в электрической цепи. Рассказывает о том, как электрический ток в этой цепи зависит от действия генератора (ЭДС) и от свойств самой цепи (сопротивление). Зависимости эти, утверждает закон Ома, очень просты: ток прямо пропорционален электродвижущей силе генератора и обратно пропорционален сопротивлению цепи (рис. 4.1).

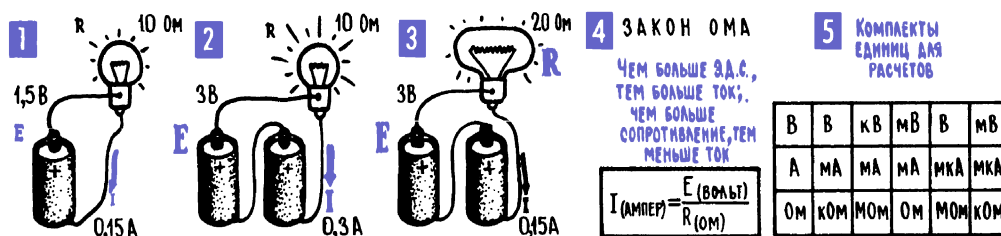


Рис. 4.1. Закон Ома

То, что ток должен возрасть с увеличением ЭДС, в принципе понятно, и то, что он должен уменьшаться с ростом сопротивления, тоже не вызывает сомнений. Но заметьте, закон Ома не просто устанавливает характер зависимости, ее качественную сторону, не просто утверждает, что с ростом ЭДС ток растет, а с ростом сопротивления уменьшается. Немецкий физик Георг Ом полтора столетия назад подметил и описал точную количественную связь между ЭДС, током и сопротивлением. Он подметил: во сколько раз возрастает ЭДС, во столько же раз возрастает ток; во сколько раз возрастает сопротивление, во столько же раз ток уменьшается. Никаких общих соображений, точно и определенно – «во сколько раз... во столько же раз...». В этой точной количественной связи – главный смысл закона Ома и его важное практическое значение.

2. Из закона Ома можно получить две удобные расчетные формулы для вычисления ЭДС и сопротивления цепи. Все, о чем говорит закон Ома, можно записать в виде короткого алгебраического выражения, так называемой формулы. Для этого прежде всего введем условные обозначения – ЭДС обозначим буквой E , ток – буквой I и сопротивление буквой R . Краткая алгебраическая запись, формула закона Ома, приведена на рис. 4.1; 4. Из формулы видно, что ток I зависит от двух величин: от электродвижущей силы E и сопротивления R . В этой зависимости E находится в числи-

теле дроби, и, значит, с увеличением E ток I возрастает. Так записывается прямая зависимость тока I от ЭДС E . Величина R стоит в знаменателе, а значит, с увеличением R ток I уменьшается.

Как видите, зависимость, для записи которой словами понадобилась чуть ли не сотня букв, на языке математики записана всего тремя буквами.

Формула – не только очень короткий, лаконичный способ записи различных зависимостей, но еще и удобный способ. Удобство его, во-первых, состоит в том, что, одним взглядом окинув формулу, часто можно сразу же почувствовать, какая величина от какой зависит. И как зависит. Если какая-либо величина в числителе, она работает на увеличение результата (как E в формуле закона Ома), если в знаменателе – работает на уменьшение (как R в этой же формуле). Извинившись перед читателями, хорошо знающими алгебру, мы сейчас напомним некоторые типичные зависимости одних величин от других. Это микроотступление в математику очень пригодится нам в дальнейшем.

На рис. 4.2 приведено несколько возможных зависимостей между тремя величинами, обозначенными буквами A , B и C . Зависимость 1 – точная копия закона Ома: A возрастает с увеличением B и падает с увеличением C . В зависимости 2 все наоборот: величина C уже старается увеличить величину A , а величина B старается ее уменьшить. Зависимость 3 говорит о том, что A совершенно одинаково зависит от B и C , причем с увеличением любой из них A тоже увеличивается. В зависимости 4 обе величины, B и C , тоже одинаково влияют на A , но, в отличие от предыдущего примера, обе они стоят в знаменателе, и поэтому с ростом B и C величина A уменьшается.

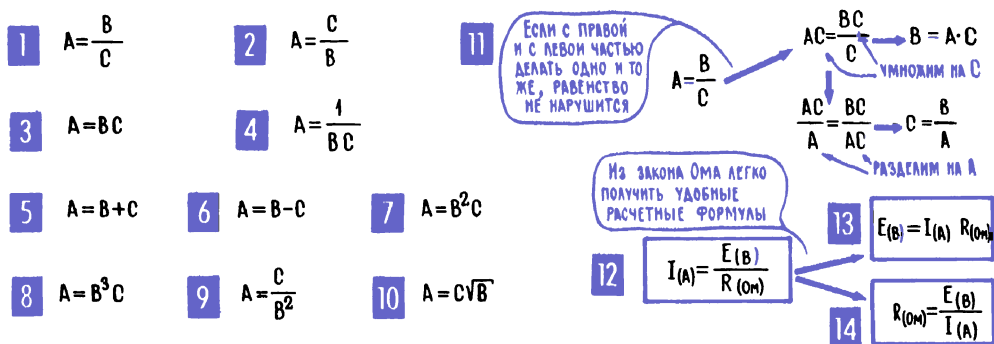


Рис. 4.2. Некоторые математические зависимости и преобразования закона Ома

В формуле 5 величина A равна сумме B и C ; увеличьте любую из них, и A возрастет, правда, не так резко, как в зависимости 3.

А вот в зависимость 6 величина C входит со знаком «минус», и чем она больше по абсолютной величине, тем меньше A .

Во все предыдущие формулы B и C входили в первой степени, в следующую формулу 7 одна из них входит во второй степени, в квадрате. Это значит, что A особо сильно зависит от B : увеличьте B в 2 раза, и A увеличится в 4 раза, увеличьте B в 10 раз, и A возрастет в 100 раз. Зависимость 8 уже не квадратичная, а кубическая: B входит в нее в третьей степени и еще сильнее влияет на A : если B возрастает в 2 раза, то A увеличивается в 8 раз, если B растет в 10 раз, то A – в 1000 раз. Зависимость 9 тоже квадратичная, но B находится в знаменателе и со всей своей силой старается уменьшить A .

В формуле 10 влияние величины, попавшей под знак корня, резко уменьшается: величина B влияет на A значительно слабее, чем в формуле 3: если увеличить B в 4 раза, то в зависимости 3 величина A возрастет в те же 4 раза, в зависимости 10 – всего в 2 раза.

Мы лишь несколькими словами коснулись нескольких простейших математических зависимостей. Но даже наши простейшие примеры демонстрируют одно из удобств математического языка, показывают, как много важной информации можно легко и быстро извлечь из записей, сделанных в виде формул.

Другое удобство математического языка заключается в том, что, используя известные способы преобразования алгебраических выражений, можно из одной зависимости получить другую, в каком-то отношении более удобную. Причем делается это быстро и, можно сказать, просто, механически, без рассуждений о том, какие конкретные величины обозначены той или иной буквой. И во всех случаях, если делать преобразования правильно и исходная формула верна, новая формула тоже будет правильной.

Разные способы преобразования математических зависимостей глубоко и в большом объеме в течение нескольких лет изучаются в школе, в курсе алгебры. Мы же приведем одно простое правило, которое в некоторых случаях может оказаться полезным для того, чтобы преобразовать какую-нибудь формулу и получить из нее другую, более удобную. Правило это можно изложить так: «Если из формулы, которая показывает, как величина a зависит от величин b, c, d, e и так далее, вам нужно получить другую формулу, которая показывала бы, как от всех этих величин зависит, например, величина b , то нужно **одновременно с обеими частями формулы** производить любые полезные, по вашему мнению, операции до тех пор, пока величина b не будет отделена от всех других величин и не останется в одиночестве». Слова «одновременно с обеими частями формулы» выделены потому, что это важнейшее условие, нарушение которого может привести к совершенно неверному результату.

3. Из закона Ома можно получить две удобные расчетные формулы: для вычисления ЭДС и сопротивления цепи. На рис. 4.2; 11 приведены примеры применения нашего «самодельного» правила для преобразования

формул. Пользуясь этим же правилом, можно из формулы закона Ома (рис. 4.2; 12) получить две новые формулы (рис. 4.2; 13 и рис. 4.2; 14). Первая получается, если в формуле закона Ома обе части умножить на R , вторая – если обе части одновременно умножить на R и разделить на I . Обе эти формулы получены нами с помощью математических фокусов и физического смысла не имеют, их нельзя читать так, как первую, основную формулу закона Ома: «Ток в цепи зависит от...» и т. д. Действительно, было смешно прочитать вторую формулу так: «Электродвижущая сила зависит от сопротивления цепи...» Электродвижущая сила – это есть характеристика генератора, и от сопротивления цепи она никак не зависит. Но, несмотря на все это, полученные нами из закона Ома две новые формулы очень полезны. Это расчетные формулы, которые позволяют при необходимости подсчитать неизвестную ЭДС E по известным I и R или подсчитать неизвестное сопротивление R по известным E и I .

Примечание редактора. В дальнейшем (см. раздел 7 в этой главе), когда автор перейдет от абстрактной величины – электродвижущей силы E – к напряжению U , определяемому для участка цепи, то все формулировки закона Ома обретут физический смысл. В частности, «напряжение участка цепи» (или, более строго, «падение напряжения на участке цепи») как раз определяется его сопротивлением (ну и естественно, величиной протекающего тока: $U = I \cdot R$).

4. Принципиальная схема – чертеж, на котором условными обозначениями показаны элементы электрической цепи и их соединения. До сих пор мы считали, что электрическая цепь состоит всего из двух элементов – генератора и нагрузки. Но чаще всего такого не бывает. Хотя бы потому, что нагрузка несколько удалена от генератора и в цепи появляется еще один элемент – соединительные провода. По этим проводам электроны идут на работу и с работы и, естественно, теряют в проводах некоторую часть своей энергии (рис. 4.3). Иными словами, соединительные провода обладают некоторым сопротивлением, которое входит в общее сопротивление цепи и которое иногда необходимо учитывать. Кроме того, некоторым сопротивлением обладает и сам генератор: внутри генератора, между его электродами тоже идет ток, тоже движутся заряды. Они, как обычно, сталкиваются с атомами среды и, как обычно, теряют какую-то часть энергии. Так что если рисовать полную схему даже самой простой цепи, то в нее нужно включить несколько новых элементов, в которых отражалось бы сопротивление проводов и внутреннее сопротивление генератора.

Можно нарисовать упрощенный чертеж электрической цепи, не вдаваясь в то, как устроен тот или иной элемент, а лишь показав условными знаками (в цепи) такие-то элементы и как они соединены. Такой чертеж называется *принципиальной схемой*. Примеры условных обозначений,

принятых при составлении принципиальных схем, показаны на рис. 1.1 и 1.2 в главе 1. Элемент, обладающий электрическим сопротивлением, независимо от того, что это за элемент (лампочка, электроплитка, кусок провода), в некоторых случаях на принципиальной схеме изображают в виде небольшого прямоугольника и обозначают латинской буквой R (от слова resistance – сопротивление). Этим как бы хотят сказать: «В данном случае для нас важно, что этот элемент оказывает сопротивление току. И ничего больше». В схеме простейшей электрической цепи на рис. 4.3 должно быть пять таких элементов: R_H – элемент, отображающий нагрузку, $R_{пр1}$, $R_{пр2}$ и $R_{пр3}$ – сопротивление кусков провода, $R_{внутр}$ – внутреннее сопротивление генератора. Если почему-либо сопротивление проводов учитывать не нужно, то элементы $R_{пр}$ не рисуют (рис. 4.3; 3). Но во всех случаях прямые линии, соединяющие на схеме один элемент с другим, принято считать идеальными проводниками, не имеющими никакого сопротивления.

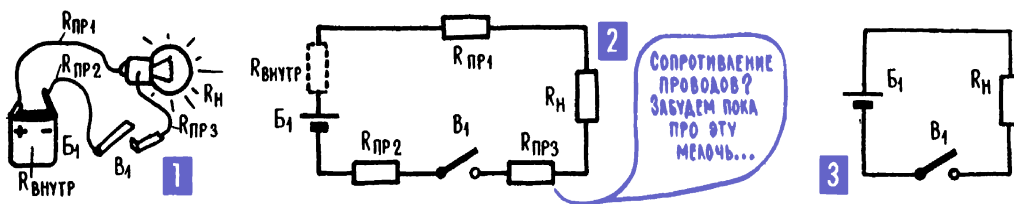


Рис. 4.3. Принципиальная схема электрической цепи

5. Резистор – элемент электрической цепи, основное назначение которого – оказывать сопротивление току. Представьте себе такую ситуацию: нужно уменьшить ток в цепи, а генератор при этом трогать нельзя. Что делать? Решение подсказывает закон Ома: нужно увеличить сопротивление цепи, ввести в нее дополнительный трудный участок. Есть детали, основное назначение которых именно в том, чтобы оказывать сопротивление току, они называются резисторами. Сопротивление таких деталей строго дозировано, и почти всегда прямо на самой детали написано, чему оно равно.

Резисторы можно делать из металлической проволоки. Чем длиннее и тоньше проволока, которой намотан резистор, и чем больше удельное сопротивление металла (сопротивление куска провода длиной 1 м и диаметром 1 мм), тем сопротивление такого резистора больше (рис. 4.4). Другой способ изготовления резисторов – напы-

1	НА СХЕМАХ ТАКИЕ СОКРАЩЕННЫЕ ЗАПИСИ:
10M	– это 10 MΩ
240к	– это 240 kΩ
18к	– это 18 kΩ
330	– это 330 Ω
27	– это 27 Ω

Рис. 4.4. Обозначения величины резисторов на схемах

ление слоев металла дозированной толщины на тонкую керамическую трубочку. Проволочные, металлопленочные (а также родственные им фольговые) резисторы в настоящее время используются только для специальных целей – это особо точные, а также очень мощные типы резисторов. Обычные резисторы широкого применения – углеродистые, проводящий слой которых образован вместо металла графитоподобной пленкой, осажденной на керамическое основание.

Особое место занимают переменные резисторы, или, иначе, резисторы переменного сопротивления. Их сопротивление можно менять, перемещая подвижный контакт и изменяя тем самым ту часть резистора, которая включена в цепь (см. далее рис. 4.11; 5).

6. Сложная электрическая цепь – система из последовательно и параллельно соединенных элементов. Уже попытка нарисовать реальную схему карманного фонаря приводит к сравнительно сложной цепи из семи последовательно соединенных элементов (рис. 4.3). На практике же приходится иметь дело с цепями более сложными, и значительно более сложными. Что такое, например, телевизор или компьютер? Это тоже электрическая цепь, но состоящая из сотен или тысяч элементов, сложным образом соединенных между собой. Даже простенький карманный плеер представляет собой электрическую цепь, в которой десятки деталей соединены сложным образом и подключены к общему генератору электрической энергии – гальваническому элементу или аккумулятору.

Рассматривать сложные и очень сложные электрические цепи сразу целиком, к счастью, почти никогда не приходится. В большой сложной машине, как правило, можно выделить самостоятельные узлы и агрегаты. В автомобиле, например, это двигатель, коробка переключения передач, передний мост, задний мост, рулевое управление, тормозная система... В сложной электрической цепи, как правило, тоже можно выделить свои узлы и блоки. Каждый из них представляет собой самостоятельную сложную цепь, но состоящую уже не из сотен и даже не из десятков, а чаще всего из нескольких элементов. С некоторыми такими простыми цепями мы сейчас познакомимся. При этом отвлечемся от того, какие элементы входят в цепь, и будем считать, что она состоит из генератора (источника электрической энергии – для конкретности гальванического элемента) и нескольких различным образом соединенных резисторов.

Начнем с цепи с последовательным соединением резисторов (рис. 4.5; 1). Ее общее сопротивление равно сумме всех сопротивлений: ток последовательно проходит по всем участкам цепи, и «препятствия», которые он встречает в каждом участке, в итоге суммируются. Из двух последовательно соединенных резисторов главный тот, чье сопротивление больше, он в основном определяет общее сопротивление.

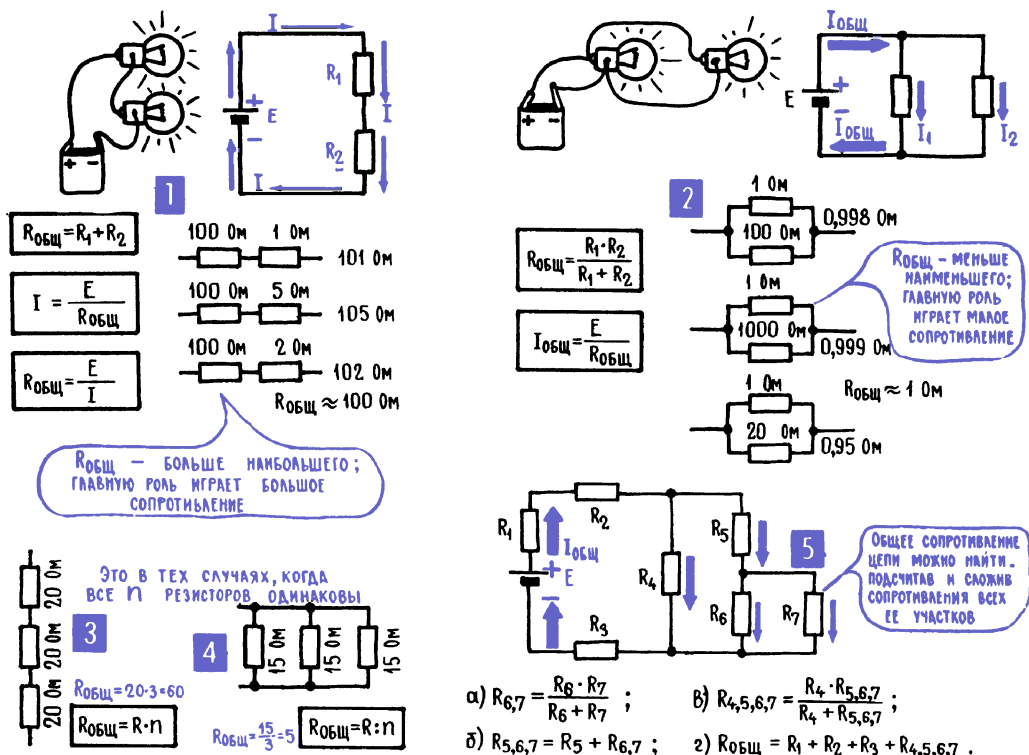


Рис. 4.5. Цепи с последовательным и параллельным соединением резисторов

По всем элементам последовательной цепи идет один и тот же ток: если бы по двум соседним резисторам шел разный ток, то к месту их соединения приходило бы больше свободных зарядов, чем ушло, или наоборот — уходило бы больше зарядов, чем пришло. Ни то, ни другое невозможно. В первом случае заряды непрерывно накапливались бы в месте соединения резисторов, во втором — это место должно было бы быть неистощимым поставщиком зарядов.

При параллельном соединении элементов цепи их общее сопротивление меньше любого из сопротивлений (рис. 4.5; 2); если параллельно какому-нибудь резистору подключить другой резистор, то откроется дополнительный обходной путь для зарядов, и двигаться им будет легче. Чтобы подсчитать сопротивление двух элементов цепи, соединенных параллельно, нужно произведение их сопротивлений разделить на их сумму. При параллельном соединении двух резисторов главный тот, чье сопротивление меньше, именно он в основном определяет общее сопротивление. Подойдя к параллельно соединенным элементам цепи, поток свободных зарядов разветвляется — большая часть тока идет по меньшему сопротивлению, так же как в разветвляющемся трубопроводе большая часть потока

пойдет по более широкой трубе. Сумма тока в параллельных ветвях равна току до разветвления и току после разветвления (см. далее рис. 4.8; 3).

Общий ток любой сложной цепи, как бы он в этой цепи ни разветвлялся, определяется общим количеством зарядов, которое двигает генератор. Этот общий ток подсчитывается по формуле закона Ома, в которую, естественно, уже входит общее сопротивление всей цепи. Общее сопротивление сложной цепи, в которой есть и параллельные, и последовательные участки, можно подсчитать постепенно, шаг за шагом, например сначала разделить общее сопротивление параллельного участка и затем сложить его со всеми последовательными сопротивлениями (рис. 4.5; 5).

7. Напряжение на участке цепи можно рассматривать как часть ЭДС, доставшуюся этому участку. Чтобы глубже понять то, что происходит в электрической цепи, можно привлечь на помощь силу воображения и мысленным взором просматривать кинофильмы с участием легких и быстрых пылинок-электронов, неповоротливых тяжелых ионов, неподвижных атомов, невидимых электрических полей и других положительных и отрицательных героев. Конечно, такие кинофильмы будут страшным упрощением истинной картины, но это не должно бросать тень на их учебную полезность. Ведь мы понимаем, что чертеж – это упрощение реальной машины, но вместе с тем прекрасно пользуемся чертежами, чтобы понять, как эта машина устроена.

Мысленно заглядывая во внешнюю электрическую цепь (нагрузка и соединительные провода), вы рано или поздно наткнетесь на вопрос: а где, собственно говоря, эта внешняя цепь начинается, где проходит ее граница с генератором? Это не в смысле геометрических форм, а в смысле электрического состояния. Мы знаем, что на электродах генератора скопились избыточные заряды, они-то и создают электродвижущую силу. Известно также, что в куске провода как таковом избыточных зарядов нет, свободных электронов в нем ровно столько же, сколько и покинутых ими атомов, положительных ионов. Так, может быть, граница между электродами генератора и внешней цепью – это своего рода электрический обрыв, пропасть? Может быть, на электродах есть скопление зарядов и они ни на шаг не выходят за пределы электрода? А что же тогда будет, если и электроды, и проводник сделать из одного и того же материала и соединить сваркой? Как в этом случае заряды узнают, где кончается электрод и начинается провод, где именно проходит та граница, через которую переступать нельзя? А как представить себе те «пограничные войска, которые смогут удерживать избыточные заряды в пределах электрода?

И еще одно сомнение: если избыточные заряды не выходят за пределы генератора, то, значит, электрическое поле, которым генератор, собственно говоря, и подталкивает свободные электроны, должно доставать до любой, даже самой удаленной точки цепи... А если генератор находится в

Москве и к нему проводами подключена нагрузка, которая находится во Владивостоке?

Рассказывают, что однажды Наполеон приехал в артиллерийскую часть, которая накануне подвела его в очень важном сражении, и спросил тамошних командиров: «Вы почему же, такие-сякие, вчера в самый ответственный момент перестали стрелять?» – «У нас на то было, – отвечали артиллеристы, – восемнадцать причин». – «Ну-ка, давайте выкладывайте, называйте свои причины». – «Во-первых, у нас не было снарядов, во-вторых...» – «Стоп, хватит, – прервал артиллеристов Наполеон, – дальше рассказывать не нужно. Все остальное уже не имеет значения...»

Этим рассказом обычно хотят подчеркнуть, что во всяком деле есть стороны более важные и менее важные и есть самые важные, принципиально важные, такие, что если их не учитывать, то «все остальное уже не имеет значения». Одна из чрезвычайно важных особенностей всякой электрической цепи – это то, что ток во всех ее участках одинаков; при разветвлении имеется в виду сумма тока в ветвях (см. далее рис. 4.11; 6, 7). Другая принципиально важная особенность цепи связана с вопросом, который мы только что пытались обсуждать: где фактически заканчивается область со скоплением избыточных зарядов, где кончаются электроды генератора?

Разобраться в этом нам поможет довольно простая аналогия; захватив санки, мы заберемся на высокую снежную гору и, на время забыв об электрических цепях, прокатимся вниз (рис. 4.6).

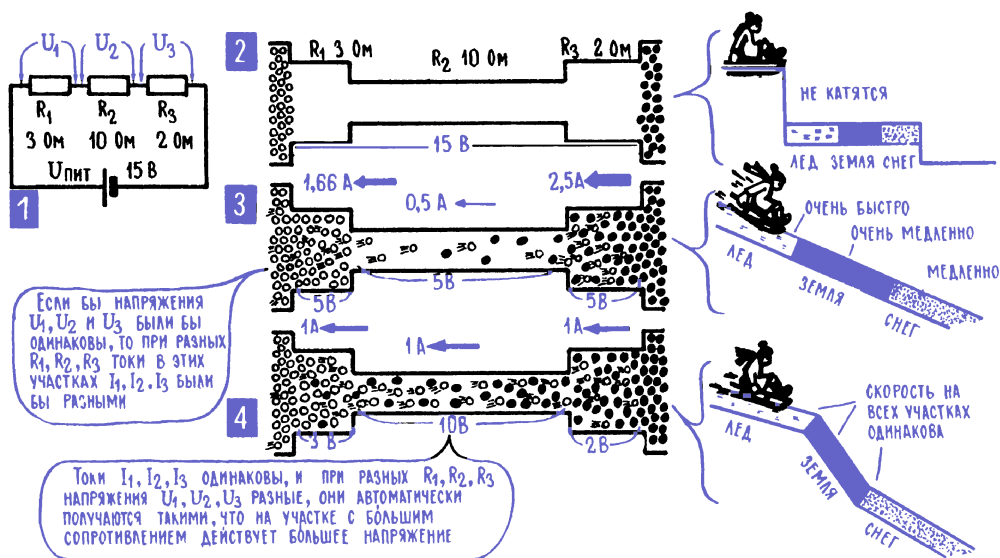


Рис. 4.6. Движение зарядов в электрической цепи

Прокатимся? Возможно... Но только не в этот раз. Мы подходим к краю снежной горы и вместо покатого склона видим резкий обрыв, затем совер-

шенно ровное снежное плато и опять обрыв. О том, чтобы прокатиться на санках с такой горки, и речи быть не может, с нее можно только упасть. Находим другой спуск, на этот раз очень пологий и ровный, без единого бугорка или впадины. Но при внимательном рассмотрении оказывается, что и этот спуск не очень-то хорош для катания на санках: участки рыхлого снега чередуются на нем с гладким, блестящим льдом и с голой оттаявшей землей. По такой дорожке санки будут двигаться рывками – по льду они мчатся быстро, по рыхлому снегу им двигаться труднее, а на голой земле могут совсем остановиться.

После долгих поисков находится, наконец, горка, хорошая во всех отношениях. На ней, правда, как и на предыдущей, тоже чередуются лед, снег и оттаявшая земля, но наклон этих разных участков тоже разный: там, где лед, дорога пологая, где снег, она идет несколько более круто, а там, где появилась голая земля, спуск совсем крутой. Одним словом, там, где санкам труднее двигаться, там спуск круче.

Три придуманные нами горки иллюстрируют три варианта распределения избыточных зарядов в электрической цепи (рис. 4.6; 2, 3, 4). Первый вариант: все избыточные заряды, появившиеся в генераторе, сконцентрированы на его электродах. Этот вариант уже забракован нами: в замкнутой цепи не может быть электрического обрыва. Второй вариант – избыточные заряды после подключения цепи равномерно распределяются по всем ее участкам, и свободные электроны, создающие ток, подталкиваются на всем своем пути с одинаковой силой. Но и такое тоже невозможно: на участках с разным сопротивлением свободные электроны в этом случае двигались бы с разными скоростями, подобно санкам, спускающимся со второй нашей горки. То есть в последовательной цепи на участках с разным сопротивлением шел бы разный ток, чего, конечно, быть не может.

От неудачного второго варианта остается всего один шаг до следующего, третьего, который в точности соответствует действительности. Знакомство с этим третьим вариантом мы начнем с прокручивания очередного учебного кинофильма.

Представьте, что мы движемся вдоль последовательной электрической цепи и всякий раз берем из нее пробу вещества, подобно тому, как геолог берет для химических анализов пробу грунта. Начнем с «минуса» генератора, с отрицательного электрода.

В пробе, взятой из него, естественно, обнаружится избыток отрицательных зарядов, ну, скажем, лишняя тысяча электронов (эта цифра, как и все последующие, – чистая выдумка, цифры подобраны так, чтобы пояснить суть дела, его качественную сторону). Движемся в сторону положительного электрода и еще раз берем пробу, на этот раз уже в соединительном проводнике. Здесь избыток отрицательных зарядов несколько меньше – в том месте, где проводник соединяется с нагрузкой, с лампочкой, в пробе оказалось 990 электронов. Как видите, разница в количестве избыточных

зарядов на концах соединительного провода невелика – на одном его конце всего на 10 зарядов больше, чем на другом.

А вот пройдя по нити лампочки, мы обнаружим большое различие в количестве избыточных электронов – на одном конце нити их, как мы только что установили, 990, а на другом оказывается уже 590 – разница в 400 избыточных электронов. Двигаясь дальше, мы в какой-то момент обнаружим участок цепи, где избыточных электронов вообще нет, а затем начнут появляться избыточные положительные заряды, положительные ионы самого металла. По мере продвижения к «плюсу» количество избыточных положительных зарядов будет все возрастать и на положительном электроде достигнет своего максимума.

Учебный фильм «Путешествие вдоль электрической цепи» так же, как и наш третий вариант санного спуска (крутизна отдельных участков тем больше, чем больше трение по их поверхности), иллюстрирует точно установленный порядок распределения избыточных зарядов. До тех пор, пока генератор находится в одиночестве, избыточные заряды сконцентрированы только на его электродах. Но подключите к генератору внешнюю цепь, и продукция генератора – избыточные заряды – появится во всей цепи, распределится по различным ее участкам. Однако неравномерно. Заряды автоматически распределятся так, что на участок с большим сопротивлением придется большее их количество. А это значит, что чем больше сопротивление участка, тем сильнее будут проталкиваться через него свободные электроны. И в итоге получится, что во всех участках, независимо от их сопротивления, установится одинаковый ток. Так же, как может установиться одинаковая скорость движения саней на горке с разным покрытием (лед, снег, земля) и с разной крутизной спуска.

Хочется обратить особое внимание на слово «автоматически». Скопление зарядов на разных участках цепи регулируется самим током. Если вдруг в какой-нибудь точке избыточных зарядов станет чуть больше или чуть меньше, например потому, что по каким-то причинам сопротивление одного из участков цепи изменилось, ток тут же на мгновение изменится и исправит нарушение баланса, добавит немного зарядов или убавит. Причем всегда с таким расчетом, чтобы восстановить свое неизменное значение во всей цепи.

Теперь мы должны другими глазами взглянуть на электрическую цепь, по которой идет ток. На каждом участке такой цепи, а не только на электродах генератора, есть избыточные заряды, а значит, между любыми двумя точками цепи действует электродвижущая сила. Конечно же, первопричина всех этих местных электродвижущих сил – генератор. Именно в нем за счет других видов энергии (свет, тепло, химические реакции, механическая работа) происходит электризация атомов, накапливаются избыточные электроны или положительные ионы. Но в итоге все избыточные заряды, вся электрическая энергия, вырабатываемая генератором, распре-

деляется между участками цепи. А могло ли быть иначе? Нужно же как-то двигать свободные заряды по этим участкам, создавать в них ток...

Ту часть ЭДС, которая достается какому-либо участку цепи, принято называть напряжением на этом участке и обозначать буквой U (рис. 4.6 и 4.7). Как уже несколько раз подчеркивалось, разница в избыточных зарядах на концах какого-либо участка последовательной цепи автоматически оказывается тем больше, чем больше сопротивление этого участка. То есть, иными словами, напряжение на участке цепи пропорционально сопротивлению участка. Ну а кроме того, по абсолютной величине это напряжение тем больше, чем больше сама ЭДС, – если делить на несколько человек большой каравай хлеба, то каждому достанется больше, чем если бы делить маленькую булочку (см. далее рис. 4.11; 2). И еще – между током I , напряжением U на участке и сопротивлением R действуют соотношения закона Ома, в этом случае их называют законом Ома для участка цепи (рис. 4.7 и 4.8).

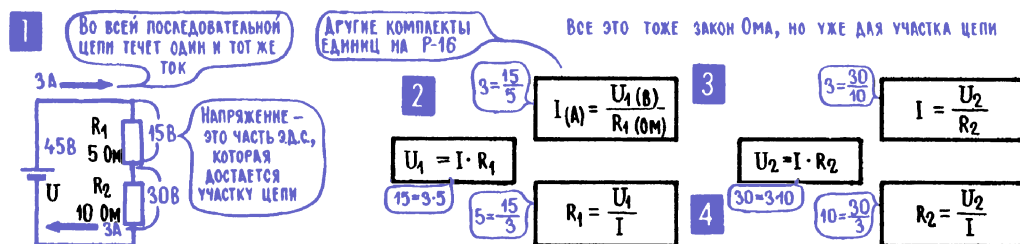


Рис. 4.7. Закон Ома для последовательной цепи

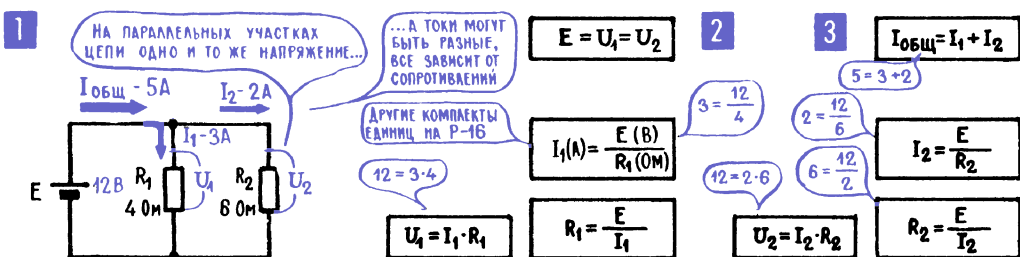


Рис. 4.8. Закон Ома для параллельной цепи

Если отвлечься от того, что происходит во всей последовательной цепи, и рассматривать только события на одном ее участке, то из формулировок закона Ома наиболее удобной становится такая: напряжение на участке цепи тем больше, чем больше его сопротивление и чем больший ток по нему идет (рис. 4.7; 2). Вот в этом самом «...чем больший ток по нему идет» отражены сразу все сложные взаимные связи между элементами цепи. В частности, отражено то, что на напряжение влияет ЭДС генератора: чем она больше, тем больше ток в цепи и, значит, напряжение во всех ее участках.

Местная ЭДС, то есть напряжение на участке цепи (часто говорят – «падение напряжения»), – это не выдумка, помогающая что-то объяснить или подсчитать. Это реальность. Причем настолько реальность, что к любому участку цепи, как к генератору, можно подключить свою нагрузку и образовать свою местную цепь в большой общей цепи. При подключении такой местной нагрузки, как при всяком параллельном подключении, несколько уменьшится общее сопротивление этого участка, а значит, и реально действующее на нем напряжение.

Напряжение, так же как и ЭДС, говорит о той энергии, с которой толкается каждый кулон свободных электрических зарядов (а если строго – о той работе, которую он выполняет), но, конечно, уже по какому-либо участку, а не по всей цепи. Поэтому напряжение, так же как и ЭДС, измеряется в вольтах. Очевидно, что общая работа, выполняемая единичным зарядом во всей цепи, равна сумме работ, выполненных на отдельных ее участках, то есть ЭДС равна сумме всех напряжений на участках цепи (см. рис. 4.11; 2).

8. Вольтметр, амперметр и омметр – приборы для измерения ЭДС (напряжения), тока и сопротивления. Напряжение на участке цепи, сопротивление участка и ток, который проходит по этому участку, можно подсчитать по одной из формул закона Ома (рис. 4.7 и 4.8). А можно и измерить. Приборы для измерения напряжения (ЭДС) и тока – вольтметр и амперметр – сегодня обычно объединяют в одном устройстве – мультиметре. Будем считать, что вольтметр измеряет разницу между количеством избыточных зарядов в двух участках цепи, определяет, каких зарядов и где больше, и насколько. И тут же вычисляет, какую работу выполнит каждый кулон электричества при такой разнице концентрации зарядов. Результаты измерений и вычислений прибор выдает сразу в вольтах, за что он и получил название вольтметр. Подключается вольтметр к тем двум точкам, напряжение между которыми нужно измерить (рис. 4.9; 1). При этом важно выполнить такое условие: собственное сопротивление вольтметра должно быть во много раз больше, чем сопротивление, к которому он подключен. Вольтметр с недостаточно большим сопротивлением может заметно уменьшить общее сопротивление участка, а значит, и напряжение на этом участке, и в итоге прибор покажет меньшее напряжение, чем было до его подключения (рис. 4.9; 2).

Амперметр – это своего рода счетчик движущихся зарядов со встроенным секундомером. Подсчитав количество зарядов, которые проходят по цепи за одну секунду, прибор показывает величину тока сразу в амперах, за что он и получил название амперметр. Прибор включается последовательно в цепь, в которой нужно измерить ток (рис. 4.9; 3). Собственное сопротивление амперметра должно быть во много раз меньше, чем общее

сопротивление цепи, иначе он сам заметно изменит общее сопротивление цепи и покажет ток значительно меньший, чем был до его включения (рис. 4.9; 4).

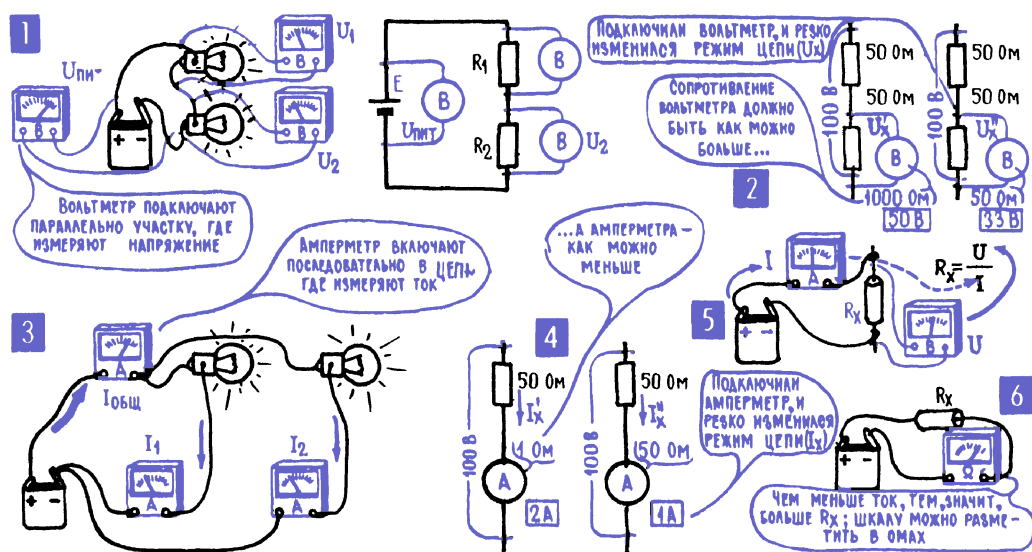


Рис. 4.9. Вольтметр, амперметр и омметр

Омметр можно представить себе как комбинированный прибор, который одновременно измеряет напряжение и ток и сразу же по формуле закона Ома вычисляет сопротивление (рис. 4.9; 5). Возможен и более простой вариант: элемент цепи, сопротивление которого нужно измерить, подключается к генератору, ЭДС которого известна, и тогда омметр определяет сопротивление только по величине тока (рис. 4.9; 6).

9. Чем больше потребляемый ток, тем меньше напряжение на выходе генератора. Внутреннее сопротивление генератора $R_{\text{внутр}}$ — такой же элемент цепи, как и все остальные. И на нем так же, как и на других участках, создается какое-то напряжение (рис. 4.10). При этом всей внешней цепи теперь уже достается напряжение несколько меньшее, чем ЭДС, меньшее как раз на величину внутреннего падения напряжения. Если увеличится потребляемый от генератора ток, то в полном согласии с законом Ома увеличится и внутреннее падение напряжения в генераторе, а значит, уменьшится напряжение U_r на выходе генератора (рис. 4.10; 3, 4). Чтобы изменение нагрузки как можно меньше влияло на выходное напряжение генератора, его внутреннее сопротивление стараются свести к минимуму.

Кстати, напряжение на выходе батарейки уменьшается и при ее старении, так как со временем увеличивается $R_{\text{внутр}}$ (рис. 4.10; 4).

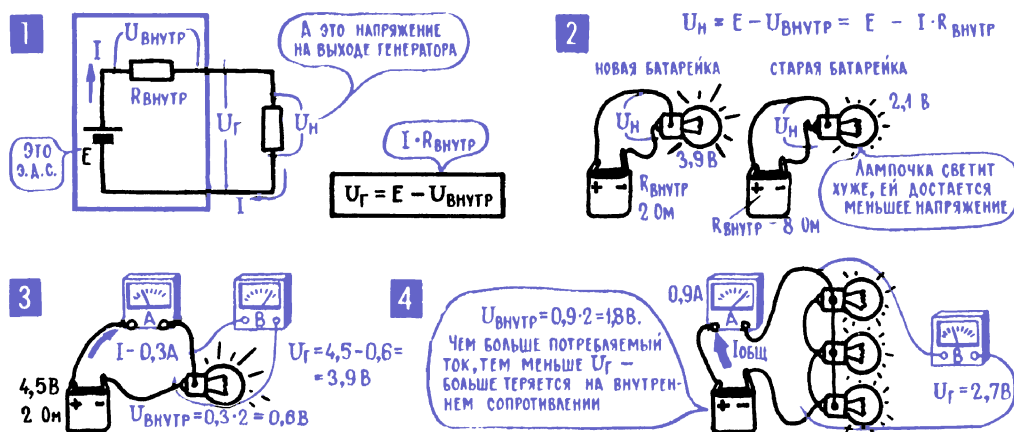


Рис. 4.10. Переход от ЭДС генератора к напряжению

Примечание редактора. Из последней фразы можно сделать вывод, что старение батареек (электрохимического элемента) отражается только на величине внутреннего сопротивления, а сама по себе ЭДС остается постоянной. Это не так: существенно больший вклад в старение электрохимических элементов вносит явление саморазряда, которое заключается в снижении именно ЭДС, т. е. напряжения холостого хода, точно так же, как при истощении батареек во время работы, только медленнее. Это касается любых электрохимических источников – и одно-разовых батареек, и перезаряжаемых аккумуляторов. Интенсивность саморазряда очень сильно зависит от типа электрохимической системы – в частности, у дешевых солевых элементов саморазряд в разы больше, чем у более дорогих щелочных. Соответственно, срок годности солевых батареек не превышает 2–3 лет с момента производства, а у щелочных он достигает 7–8 лет. У литиевых батареек саморазряд еще ниже, и срок годности у них может составлять более 10 лет, при этом они до последнего держат уровень напряжения (ЭДС), близкий к начальному.

10. Последовательная цепь – делитель напряжения, параллельная – делитель тока. Можно так подобрать элементы последовательной цепи, чтобы на каком-нибудь из них получить напряжение, уменьшенное по сравнению с исходным во сколько угодно раз (рис. 4.11; 1, 2). Чем меньшую часть исходного напряжения мы хотим получить и подать на нагрузку, тем меньше должно быть сопротивление участка, с которого оно снимается. Кроме того, сопротивление участка делителя, с которого снимается напряжение, должно быть значительно меньше, чем сопротивление нагрузки, которая к этому участку будет подключена (рис. 4.11; 3). Иначе подключение нагрузки изменит сопротивление всего участка, и напряжение на нем снизится еще больше. В одной из разновидностей делителя частью его является сама нагрузка (рис. 4.11; 4). В этом случае второе сопротивление

делителя, то, на котором гасится избыток напряжения, называют гасящим сопротивлением. Еще одна разновидность делителя – с резисторами переменного сопротивления (рис. 4.11; 5), с помощью которых можно плавно менять напряжение.

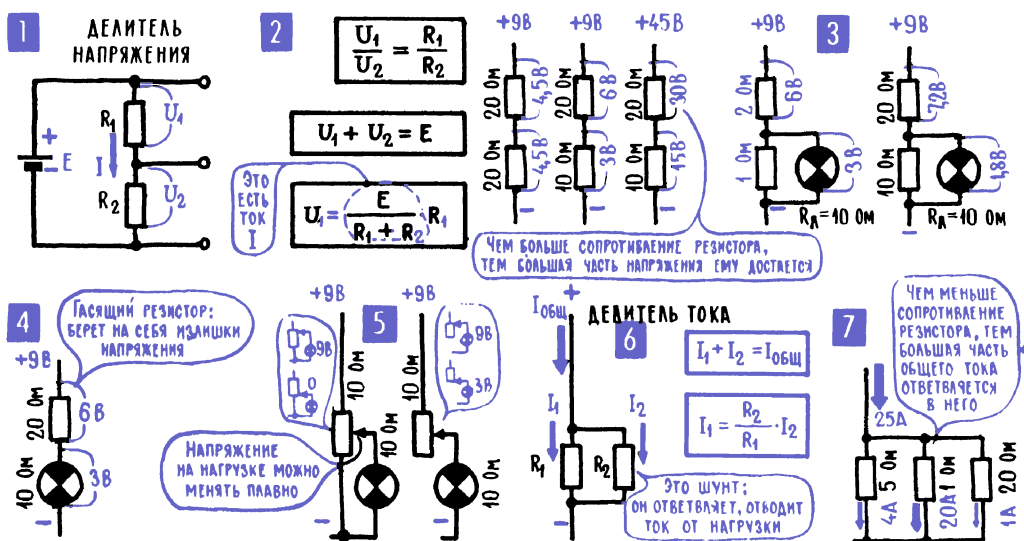


Рис. 4.11. Делители напряжения и тока

Подключив резистор параллельно нагрузке, можно уменьшить идущий в нее ток (рис. 4.11; 6). Резистор, который мы включили для ответвления лишнего тока, называется шунтом («шунт» в переводе на русский – обходной путь), а сам процесс уменьшения тока с помощью шунта называют шунтированием. Чем меньше сопротивление шунта, тем большая часть тока пойдет в него и меньшая – в нагрузку.

11. Электрическая мощность – произведение напряжения на ток; единица измерения мощности – ватт. С одной стороны, мы знаем, что мощность – это работа, выполненная за единицу времени, и что единица измерения мощности – ватт соответствует работе в 1 джоуль за 1 секунду (гл. 3; 9). С другой стороны, напряжение – это есть работа, которую выполняет в электрической цепи каждый кулон движущихся зарядов, а ток – число кулонов, которое проходит по цепи каждую секунду (гл. 3; 10). Отсюда следует, что мощность, потребляемая участком цепи, – это произведение тока на напряжение, произведение числа кулонов в секунду на число джоулей, которое нарабатывает каждый кулон (рис. 4.12). Мощность возрастает и с увеличением напряжения, и с увеличением тока.

Если неизвестен один из сомножителей в формуле мощности (ток или напряжение), можно определить его по одной из формул закона Ома

(рис. 4.7; 2, 3). И тогда получатся две новые формулы для подсчета мощности (рис. 4.12; 2, 3). Они поясняют, что при неизменном сопротивлении участка R выделяемая в нем мощность P связана с током I или напряжением U квадратичной зависимостью: при увеличении тока в два раза мощность возрастет в четыре раза; повышение напряжения в пять раз увеличит мощность в двадцать пять раз (рис. 4.12; 4, 5).

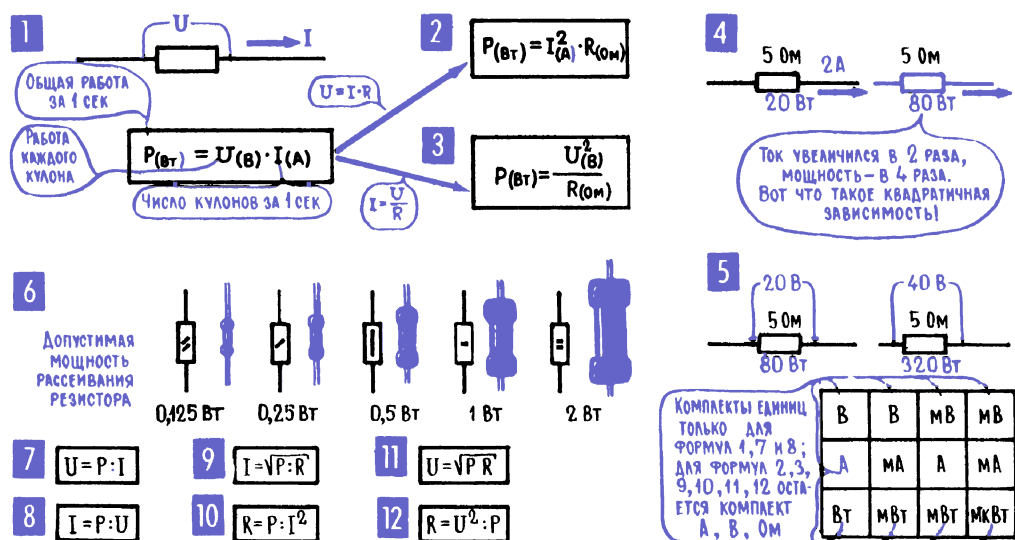


Рис. 4.12. Мощность на участках электрической цепи

Здесь нет никакого противоречия с тем, что говорит первая формула для подсчета мощности ($P = U \cdot I$). Потому что с увеличением тока в цепи всегда возрастает напряжение на участке, и, значит, увеличение тока сразу по двум каналам, двумя «рычагами», влияет на мощность: само по себе (растет число кулонов в секунду) и повышая напряжение (растет работоспособность каждого кулона). Напряжение также двумя «рычагами» влияет на мощность: если увеличить напряжение на участке цепи, не меняя его сопротивления, то при этом сразу же мощность поднимется за счет увеличения работоспособности каждого заряда, и еще она увеличится потому, что с ростом напряжения возрастет и ток, увеличится число работающих кулонов.

Сама эта характеристика – «мощность» – может относиться и к генератору, и к нагрузке, и к любому другому элементу цепи. Мощность генератора говорит о том, какое количество работы он может выполнить в электрической цепи каждую секунду. Мощность, которая указана на пассивных элементах электрической цепи, на потребителях энергии, – это то, что в нормальном режиме может переварить этот элемент. Например, если на лампочке написано «100 Вт», это значит, что каждую секунду она может

превращать в свет (и, к сожалению, в тепло) 100 джоулей электрической энергии. А если подвести к такой лампочке большую мощность, увеличив, например, напряжение на ней, то лампочка просто выйдет из строя: количество тепла, выделяемого в ней, возрастет, температура нити превысит расчетную величину, и она сгорит.

Мощность, определяемая размерами корпуса резисторов, также предупреждает от нарушения теплового режима: если превысить допустимую мощность, резистор может перегреться, его проводящий слой разрушится (это заметно внешне – чернеет окраска корпуса), и деталь выйдет из строя. На схемах допустимую мощность резисторов указывают условными знаками (рис. 4.12; 6). Если же условного знака нет, то, значит, в данной цепи на резисторе выделяется ничтожно малая мощность, и можно применять деталь любого типа.

12. Условное направление тока от «плюса» к «минусу». В цепи, где есть жидкий или газообразный проводник, можно наблюдать движение зарядов одновременно в двух противоположных направлениях – свободные электроны идут от «минуса» к «плюсу», положительные ионы – от «плюса» к «минусу» (рис. 4.13; 1). В то же время, рассматривая схемы электрических цепей, как правило, совсем не нужно знать подробности, не нужно знать, какие именно заряды создают ток: электроны, положительные ионы или те и другие одновременно. Поэтому, рассматривая схемы, обычно забывают о конкретных носителях заряда и представляют себе, что ток создается только одним сортом частиц, а именно положительно заряженными частицами.

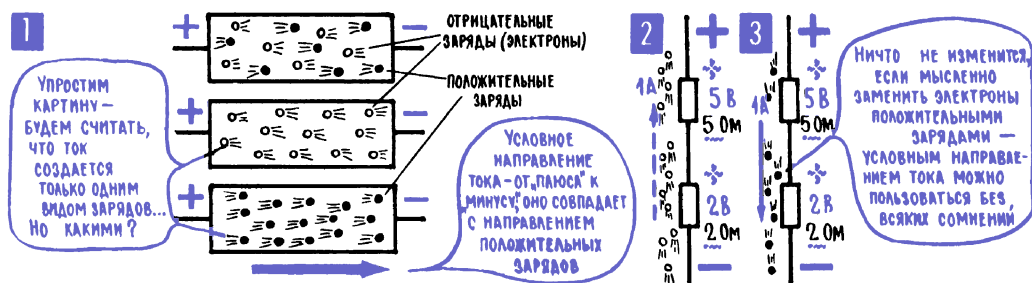


Рис. 4.13. Ток в проводящих жидкостях (электролитах)

Это, может быть, и несправедливо, потому что в большинстве реальных цепей ток создается электронами, отрицательно заряженными частицами. Однако исторически получилось так, что главными были названы положительные частицы: в то время не имели представления об электронной природе тока в проводниках. И теперь нам ничего другого не остается, как считать, зачастую вопреки истине, что ток создают не электроны, а какие-то положительно заряженные шарики и что, конечно же, идет та-

кой ток от «плюса» к «минусу». Тому, кто будет испытывать в связи с этим неудобства, ощущать внутренние протесты, можно предложить два утешения. Во-первых, условное направление тока – не более чем условное направление тока, мы пользуемся им в основном тогда, когда нужно водить пальцем по схеме, а при этом в реальной цепи жизнь идет своим чередом. Во-вторых, рассматривая электрическую цепь и считая, что в ней от «плюса» к «минусу» двигаются положительные «шарики», мы получим точно те же результаты (те же величины токов и напряжений, те же полярности напряжений), как и в том случае, если бы считали, что ток создают электроны и идут они от «минуса» к «плюсу» (рис. 4.13; 2, 3).

13. Конденсатор – устройство для накопления электрических зарядов. Если расположить одну над другой две металлические пластины и на короткое время подключить их к генератору, то на пластинах накопится какое-то количество зарядов, и они будут оставаться там довольно долго. То, что заряды не уходят с пластин, можно упрощенно объяснить так: пластины эти находятся близко, и разноименные заряды своими электрическими полями притягиваются друг к другу и не дают друг другу уйти с пластин. Такой пластинчатый накопитель зарядов называют конденсатором (рис. 4.14; 1) и на схемах обозначают буквой *C* (от слова capacitor – накопитель). Конденсаторы различаются формой пластин и веществом (изолятором), которое находится между ними. Обкладки конденсатора – так часто называют его пластины – в простейших случаях выполняют в виде дисков, вставленных друг в друга трубок или свернутых в спираль металлических лент из фольги.

14. Емкость конденсатора характеризует его способность накапливать заряды; единица измерения емкости – фарад. Количество зарядов, которое накапливается на конденсаторе, зависит от того, каким напряжением его заряжали: чем больше это напряжение, тем больший заряд оно втолкнет на пластины при прочих равных условиях. А еще количество накопленных зарядов зависит от свойств самого конденсатора. О его способности накапливать заряды говорит особая характеристика – емкость конденсатора. Единица электрической емкости – *фарад*, такая емкость будет у некоторого условного конденсатора, в котором под действием зарядного напряжения 1 вольт накопится заряд в 1 кулон (рис. 4.14; 5). Емкость конденсатора тем больше, чем больше площадь его пластин (иногда для увеличения этой площади делают конденсаторы с большим числом параллельно соединенных пластин) и чем меньше расстояние между ними (чем ближе пластины, тем сильнее притягивающее поле одной из них действует на заряды, которые находятся на другой). Кроме того, емкость определяется свойствами вещества между пластинами. О них говорит характеристика вещества, которая называется *диэлектрической проницаемостью ϵ* : чем она

больше, тем, при прочих равных условиях, больше емкость. Так, например, если воздушный конденсатор (между пластинами – воздух) поместить в масло, то его емкость увеличится в два-три раза: ϵ масла в два-три раза больше, чем воздуха.

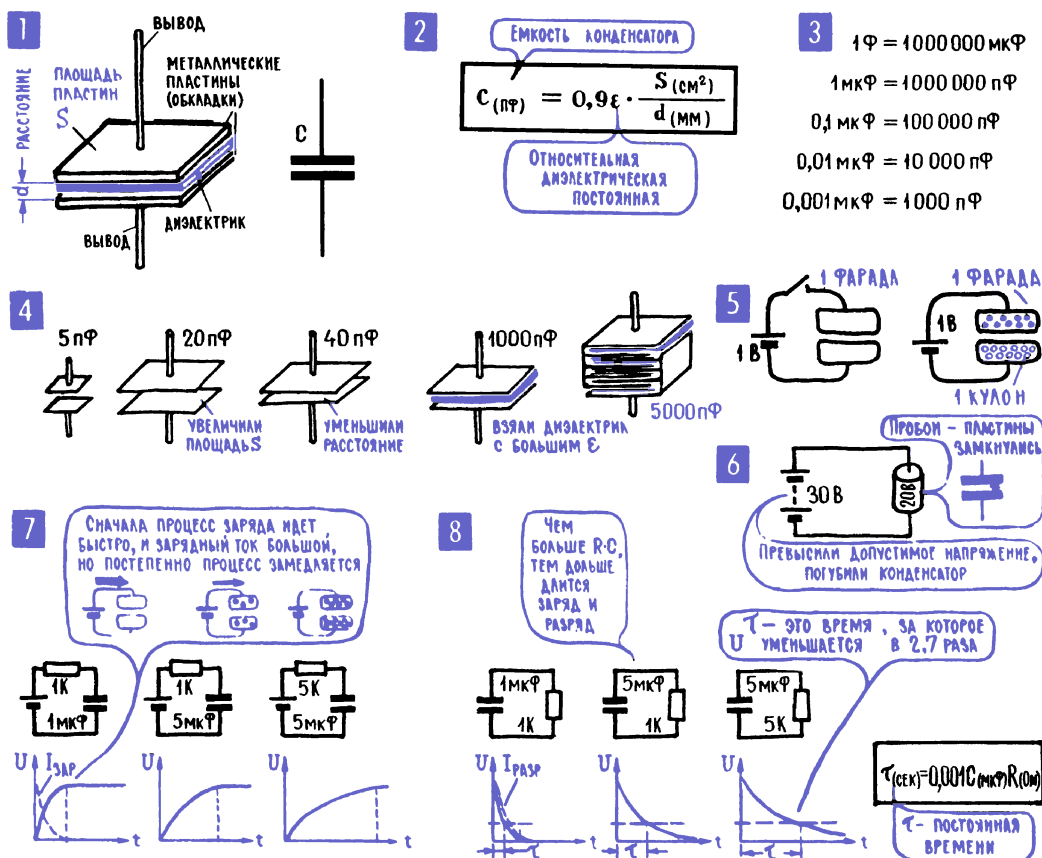


Рис. 4.14. Конденсаторы

Особое место занимают электролитические конденсаторы, у которых много общего с химическими источниками тока. В электролитических конденсаторах под действием приложенного постоянного напряжения происходят определенные электрохимические процессы, благодаря которым резко увеличивается емкость. Поэтому электролитические конденсаторы включают в цепь таким образом, чтобы на них действовало постоянное напряжение. Причем в определенной полярности: положительный вывод конденсатора обязательно должен быть направлен в сторону «плюса» источника питания, отрицательный – к «минусу». Если у электролитического конденсатора гибкие выводы, то положительный вывод всегда делается длиннее отрицательного; кроме того, на корпусах современных

конденсаторов отрицательный вывод часто обозначен большим жирным «минусом».

Фарад (сокращенно – Ф) – единица чрезвычайно большая. Если принять расстояние между пластинами в 1 мм, то для получения емкости в 1 Ф нужно было бы взять дисковые пластины диаметром чуть ли не в 30 км. Употребляемые на практике конденсаторы (электролитические) имеют емкость в несколько тысяч или, в лучшем случае, несколько десятков тысяч микрофарад (мкФ). Встречаются и специальные типы конденсаторов под названием ионисторы (в западной литературе их называют SuperCaps), обладающие недостижимой для обычных типов емкостью в единицы фарад. На практике они употребляются в качестве резервных источников питания для маломощных устройств.

Важная характеристика конденсатора – его рабочее напряжение. Оно обычно указано на корпусе, и превышать его при зарядке конденсатора нельзя. Это может привести к пробое или к разрушению диэлектрика, пластины конденсатора замкнутся, и он превратится в обычный проводник (рис. 4.14; 6).

15. Время заряда (разряда) конденсатора зависит от его емкости и от сопротивления зарядной (разрядной) цепи. В момент, когда мы подключаем конденсатор к электрическому генератору, в цепи появляется некоторый зарядный ток – это свободные электроны идут к одной обкладке конденсатора и уходят с другой, происходит накапливание зарядов на обкладках (рис. 4.14; 7). Зарядный ток будет протекать до тех пор, пока конденсатор не примет все, что он может принять, пока не запасет столько зарядов, сколько позволяет его емкость. Чем больше емкость, чем больше зарядов должен накопить конденсатор, тем дольше будет продолжаться процесс заряда, тем дольше будет существовать в цепи зарядный ток. Но как только заряд конденсатора закончится, этот ток прекратится. Если последовательно с конденсатором в зарядную цепь включить резистор, то он ограничит ток в цепи, и процесс заряда конденсатора будет длиться дольше.

Если соединить обкладки заряженного конденсатора резистором, то начнется процесс разряда, по внешней цепи избыточные заряды будут переходить с одной обкладки на другую, стремясь нейтрализовать друг друга. Во время разряда в цепи тоже течет ток, и его величина также зависит от емкости и также ограничивается сопротивлением резистора. Разряд конденсатора, подобно заряду, будет длиться тем дольше, чем больше емкость конденсатора (то есть чем больше зарядов должно уйти с обкладок) и чем больше общее сопротивление разрядной цепи.

Быстрее всего разряд произойдет, если соединить обкладки накоротко.

Наблюдая за зарядом и разрядом конденсатора, мы впервые сталкиваемся с тем, что элементы электрической цепи определяют продолжительность тех или иных процессов, в данном случае время заряда и разря-

да. Электрическая цепь, состоящая из C и R , или, как ее часто называют, RC -цепочка, в данном случае чем-то напоминает песочные часы, время «разряда» которых зависит от количества песка и диаметра отверстия, по которому он течет. Не случайно произведение RC называют постоянной времени.

16. Любой элемент электрической цепи может влиять на режим (напряжение, ток, мощность) всех других ее элементов. Обдумывая очередной ход в шахматной партии, приходится учитывать множество возможных его последствий. Точно так же, изменяя сопротивление какого-либо участка сложной электрической цепи, приходится думать о том, что произойдет на всех других участках. Потому, что элементы сложной цепи взаимосвязаны, они разными путями и в разной степени влияют на условия жизни своих близких и далеких соседей. Научиться разбираться в электронных схемах, научиться, как принято говорить, свободно читать схемы – это прежде всего значит научиться быстро оценивать, как именно связаны между собой элементы сложной цепи, как они влияют на токи, напряжения, потребляемые мощности, одним словом, на режим других элементов. Именно на это направлено наше постепенное, шаг за шагом, путешествие в мир электротехники и электроники. Первые шаги на этом пути уже сделаны. Несколько полезных шагов поможет сделать рис. 4.15, где на некоторых примерах показано, как тот или иной элемент, в зависимости от его «места под солнцем», влияет на режим всех остальных.

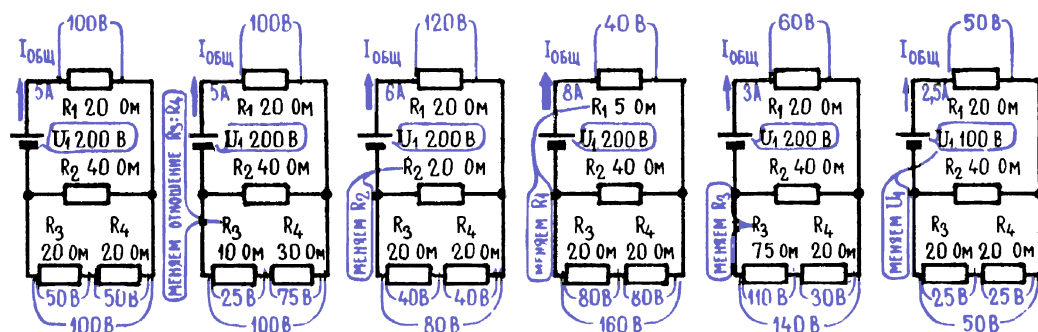


Рис. 4.15. Примеры взаимовлияния элементов электрической цепи

Вдумайтесь в эти примеры, присмотритесь внимательно к тому, какие изменения происходят при переходе от одного из них к другому, и попробуйте объяснить, почему именно так должны были измениться токи и напряжения, – для этого вам понадобится не более чем закон Ома. Если ваши собственные расчеты совпадут с тем, что указано на рисунках, то можете считать, что получили пятерку на важном экзамене и сделали серьезный шаг вперед. Но, конечно, главные шаги в изучении языка электрических и электронных схем еще впереди.

Практикум. Изучаем закон Ома и свойства конденсатора

Эксперимент 1. Измерение тока с помощью вольтметра

Мультиметром называют настольные или портативные приборы для измерения различных электрических величин: прежде всего напряжения, тока и сопротивления. Это обязательная принадлежность любой электротехнической или электромонтажной лаборатории, причем зачастую мультиметра оказывается достаточно для наладки даже довольно сложных схем.

Фирменные мультиметры в большинстве случаев устроены так, что вывести их из строя (как говорится, «спалить») при неправильном подключении почти невозможно. Хотя в руководствах по работе с мультиметром рекомендуется соблюдать определенный порядок подключения, но, как правило, ничего не произойдет, если вы перепутаете постоянное напряжение с переменным или подключите к источнику напряжения прибор, настроенный на измерение сопротивления.

Из этого правила есть единственное исключение, которое касается измерения тока. Обратите внимание, что клеммы для подключения щупов в режиме измерения тока вынесены отдельно. Почему? А потому что, как следует из рис. 4.5; 1, ток последовательно проходит по всем участкам цепи, и прибор для его измерения – амперметр – включается в цепь всегда последовательно источнику питания и нагрузке (см. гл. 4; 8). Поэтому амперметр должен иметь очень маленькое собственное (внутреннее) сопротивление, иначе на нем образуется большое падение напряжения, что внесет искажения в измеряемую величину тока. То есть если перепутать и включить амперметр не последовательно с нагрузкой, а параллельно источнику питания, через него, в полном соответствии с законом Ома, потечет огромный ток, ограниченный только возможностями источника. Сопротивление амперметра при измерении больших токов составляет порядка нескольких сотых ома, что даже при 5-вольтовом источнике дает токи в 100 А и более!

Чтобы не повредить мультиметр при такой ошибке, внутри его обычно ставят плавкий предохранитель. Поэтому если ваш прибор вдруг перестал показывать ток (а вы можете и не заметить, как случайно подсоединили его в режиме измерения тока к выводам питания), то прежде всего вскройте его корпус и проверьте этот самый предохранитель.

Но надо ли вообще мучиться с такой ненадежной функцией мультиметра? Представьте себе, что вы хотите проверить токи и напряжения в схеме, приведенной на рис. 4.7; 1: общее напряжение источника питания

(45 вольт), падение напряжения на резисторе R1 (15 вольт) и R2 (30 вольт) и общий ток в цепи, равный 3 амперам. Так как мультиметров у вас вряд ли больше одного, то придется переходить от измерения напряжения к измерению тока, каждый раз переключая щупы к другим клеммам и устанавливая новый режим измерений на мультиметре. Мало того, что это долго и неудобно, так еще и, оказывается, очень легко сделать ту самую ошибку, о которой упоминалось выше: подключить мультиметр, настроенный на измерение тока, к клеммам источника питания. Кроме того, необходимость разрывать цепь для подключения прибора нарушает работу схемы, и просто проверить ток без отключения схемы у вас не получится.

Этого можно избежать, если вообще не использовать режим измерения тока, а производить такое измерение мультиметром, настроенным на измерение напряжения. Тогда мультиметр всегда оказывается включенным в безопасном режиме вольтметра, и щупы не требуется переключать из одного гнезда в другие. Соорудить амперметр из вольтметра можно, если запастись точным резистором с номинальным значением сопротивления, например ровно 1 Ом, что подойдет для измерения токов в единицы-десятки-сотни миллиампер, – обычные значения для наших схем (для токов в других диапазонах нужен больший или меньший номинал резистора – 10 Ом или 0,1 Ом). Мощность этого резистора должна быть как можно выше – не менее 1–2 Вт (см. рис. 4.12), а если достанете огромный резистор мощностью в 10 Вт, то это будет просто прекрасно.

Если не сможете приобрести такой резистор, то в крайнем случае можно его изготовить самостоятельно. Лучше всего использовать нихромовую проволоку толщиной 0,2–0,4 мм. Приобрести такую проволоку можно в интернет-магазинах, торгующих радиокомпонентами (например, в «Чипе-Дипе») или аксессуарами к электронным сигаретам – из нее делают спирали испарителей. Возьмите кусок этой проволоки подлиннее (как минимум несколько метров) и измерьте его сопротивление. Величина эта составит порядка нескольких десятков ом. Затем растяните и измерьте рулеткой длину. Поделив одно на другое, вы получите сопротивление одного метра проволоки в Ом/м. Осталось отмерить как можно точнее нужный кусок, соответствующий одному ому (скорее всего, получится порядка 4–12 см), свернуть его спиралькой, намотав на карандаш и затем аккуратно сняв, – и сопротивление, причем достаточно точное, готово. Чтобы оно было более долговечным, следует взять любой достаточно крупный резистор (например, мощностью 2 Вт) с высоким сопротивлением (более нескольких килоом), намотать на него этот отрезок нихрома так, чтобы витки не касались друг друга, и туго обернуть его кончики вокруг имеющихся выводов. Затем их следует пропаять с помощью кислотного флюса (того, что подходит для пайки обычной углеродистой стали).

Теперь заранее включите этот одноомный резистор последовательно в измеряемую цепь, а при необходимости измерить ток параллельно ему

подключите вольтметр, как показано на рис. 4.16. Величина тока в цепи будет численно равна показаниям вольтметра: если вольтметр установлен на диапазон в вольтах, то, значит, ток в амперах, если в милливольт-тах – то в миллиамперах (в примере на рисунке измеряется ток 170 мА). Думаю, вы легко сообразите, почему это так, и сами сможете придумать, как подсчитать напряжение, если резистор имеет номинал, отличающийся от 1 Ом.

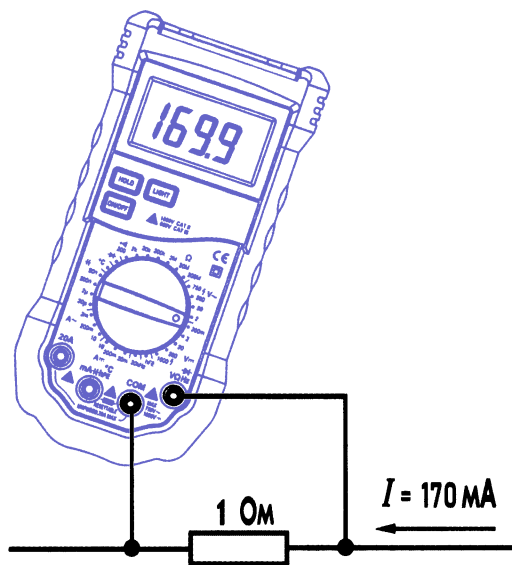


Рис. 4.16. Измерение тока с помощью вольтметра

Легко также подсчитать, при каких условиях резистор не будет вносить существенную погрешность в измеряемый ток: для этого падение напряжения на нем должно быть много меньше общего напряжения питания схемы: $U_{1\text{ом}} \ll U_{\text{пит}}$. Это условие будет соблюдаться как раз при указанных выше значениях токов: вплоть до сотен миллиампер падение напряжения на резисторе не превысит долей вольта, то есть от общего напряжения питания отнимется совсем немного. При токах в единицы ампер и выше сопротивление резистора следует снизить до 0,1 Ом, а, наоборот, при токах в единицы миллиампер и ниже сопротивление следует увеличить до 10 Ом (при этом измеренное значение нужно, соответственно, умножать или делить на 10).

Эксперимент 2. Исследование заряда и разряда конденсатора

Как указывалось выше (см. раздел 15 в этой главе), время заряда (разряда) конденсатора зависит от его емкости и от сопротивления зарядной

(разрядной) цепи. Произведение сопротивления R (в омах) на емкость C (в фарадах) называется *постоянной времени* T (в секундах). Постоянная времени также будет получаться в секундах, если подставлять емкость в более приближенных к практике микрофарадах, а сопротивление при этом измерять в мегаомах.

Что физически представляет собой постоянная времени T ? Ответ на этот вопрос может дать измерение напряжения на конденсаторе, подключенном к источнику питания по схеме рис. 4.17; 1. Переключатель $K1$ подключает цепочку из последовательно соединенных резистора R и электролитического конденсатора C либо к общему проводу (нулю напряжения), либо к источнику питания $+12$ В. Для наглядного представления процессов зарядки и разрядки сопротивление резистора R можно выбрать в пределах от 100 кОм до 1 МОм, емкость конденсатора C – в пределах от 100 до 1000 мкФ. Большие значения емкости лучше не использовать, процесс заряда/разряда может искажаться из-за большого значения собственных токов утечки у электролитических конденсаторов большой емкости. Для отслеживания процессов, происходящих при заряде/разряде конденсатора, вам потребуется также секундомер, в качестве которого можно использовать любые часы с отображением секунд.

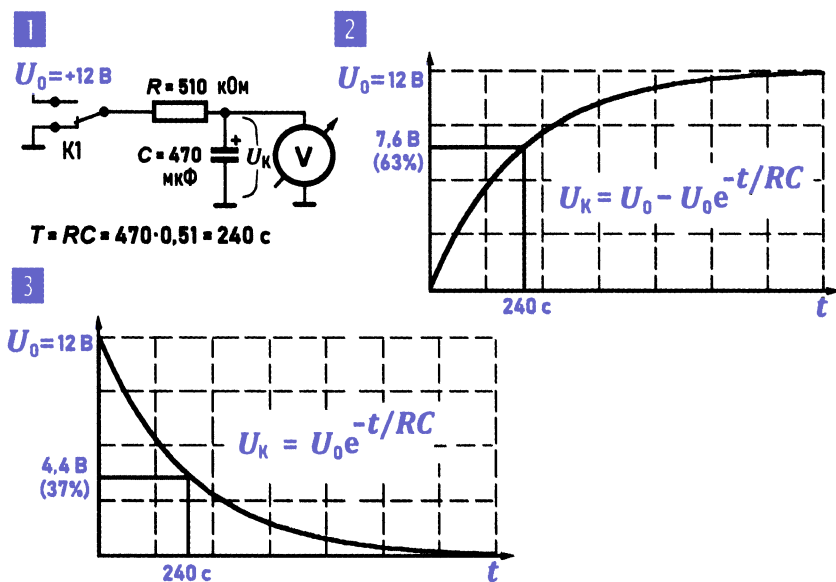


Рис. 4.17. Заряд и разряд конденсатора

Первоначально переключатель $K1$ находится в нижнем (по схеме) положении, конденсатор обесточен, напряжение U_K равно нулю. Подайте на резистор R напряжение 12 В, переключив $K1$ в верхнее положение, и одновременно запустите секундомер. Отметьте количество секунд, прошедшее

до момента достижения напряжением U_k величины, равной $1 - 1/e$ доли от напряжения питания (где e – основание натуральных логарифмов); эта доля будет примерно равна 63 % от U_0 (7,6 В при питании 12 В). Отмеченное количество секунд и будет равно постоянной времени T . При указанных на схеме величинах сопротивления резистора 510 кОм и емкости конденсатора 470 мкФ она составит 240 секунд.

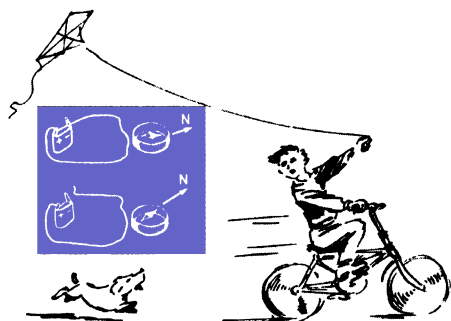
График нарастания напряжения при зарядке конденсатора показан на рис. 14.7; 2. Он представляет собой экспоненту, то есть обладает тем свойством, что за каждый последующий промежуток времени, равный постоянной времени T , величина U_k увеличится на ту же самую долю, равную $1 - 1/e$ (примерно 63 %) от оставшегося значения в начале промежутка. Иными словами, за первые 240 секунд напряжение возрастет до 63 % от 12 В (до 7,6 В), за следующие 240 секунд – еще на 63 % от величины $12 - 7,6 = 4,4$ В, то есть на $4,4 \cdot 0,63 = 2,8$ В (до $7,6 + 2,8 = 10,4$ В), и так далее, пока в бесконечно далеком будущем напряжение на конденсаторе не сравняется с напряжением питания. Слова «в бесконечно далеком будущем» не следует понимать буквально – примерно за 4–5 постоянных времени (то есть минут за 15–20 в данном случае) напряжение на конденсаторе окажется практически равным напряжению питания.

Дождавшись этого момента (если терпения не хватит, можно обеспечить полный заряд быстрее, ненадолго перемкнув резистор R пинцетом), можно затем наблюдать процесс разряда конденсатора, установив переключатель $K1$ обратно в нижнее положение. При этом конденсатор будет разряжаться через тот же резистор R , то есть с той же постоянной времени T .

График напряжения U_k при разряде показан на рис. 14.7; 3. Он представляет собой «перевернутый» (точнее, зеркально отображенный относительно горизонтальной оси) график заряда. Напряжение U_k за каждый промежуток времени, равный постоянной времени, убывает на те же 63 % относительно оставшегося значения – вначале оно достигает величины 37 % от $U_0 = 12$ В (примерно 4,4 В) и т. д. Как и заряд, разряд конденсатора теоретически длится бесконечное время, практически же напряжение U_k обнулится примерно за 4–5 постоянных времени.

Из формул, показанных на рис. 14.7; 2, 3, можно вывести одно интересное следствие: при мгновенном заряде и разряде конденсатора (то есть при нулевом значении сопротивления R) ток в цепи будет равен бесконечно большой величине. Понятно, что в реальности достичь такого можно лишь при нулевом сопротивлении всех остальных участков цепи: выводов конденсатора, подводящих проводов, контактов переключателя, а при заряде, кроме того, еще и при нулевом внутреннем сопротивлении источника питания (что равносильно требованию его бесконечно большой мощности). Так как в реальности ни одно из этих условий обеспечить невозможно, то разряд и заряд конденсатора на практике никогда не происходят мгновенно.

венно. Однако надо учитывать, что ток в цепи при таком режиме может достигать весьма больших значений, поэтому у конденсаторов большой емкости и рассчитанных на высокие напряжения часто оговаривается минимально допустимое время заряда и разряда – чтобы не перегрузить выводы слишком большим током.



ГЛАВА 5

Созданный движением

1. Первопричина всех магнитных явлений – движение электрических зарядов. Знакомство с магнетизмом так же, как и с электричеством, начинается с простейших опытов (рис. 5.1). Магнит притягивает к себе железную булавку, и та, преодолевая силу тяжести, подскакивает вверх.

Магнитная стрелка компаса, как бы вы этот компас ни повернули, всегда смотрит в одну сторону, как будто ее острие тянет какая-то невидимая сила. А если поднести к компасу магнит, то стрелка, позабыв обо всем на свете, поворачивается к этому магниту и потом уже неотступно следует за ним, если магнит двигать вокруг компаса. Все это не гравитационные взаимодействия (масса Земли тянула булавку вниз, а она все же подскочила к магниту), не электрические (магнит не притягивает клочки бумаги, как наэлектризованная расческа), это нечто совсем иное, новое, не похожее ни на что другое.



Рис. 5.1. Простые опыты с магнитным полем

Магнетизм относится к числу основных, фундаментальных явлений природы, и магнитные свойства вещества могут быть поставлены в один ряд с массой и электрическим зарядом. Магнетизм так же, как и электричество, был замечен человеком несколько тысячелетий назад. Разумеется, этот новый вид притягивающих сил так же, как и электричество, в те времена нельзя было объяснить. Их можно было только назвать. И назвали новые,

ни на что другое не похожие свойства вещества магнитными свойствами, магнетизмом. Потому что эти свойства, эта загадочная способность притягивать железо, были обнаружены у руды из месторождений вблизи города Магнезия, одного из древних городов Малой Азии. От этой Магнезии и пошло слово «магнит»¹.

Понять происхождение магнитных свойств тоже помогают простейшие опыты. Но для таких объясняющих опытов придется уже добыть кое-какое современное лабораторное оборудование – батарейку для карманного фонаря, кусок провода и пару лампочек.

Соберите из этих элементов простейшую электрическую цепь, показанную на рис. 5.1; 3, и поднесите к проводу, по которому идет ток, компас (рис. 5.1; 4). Стрелка компаса повернется в сторону проводника. Подключите параллельно первой лампочке вторую, увеличив тем самым ток в общем проводе (рис. 5.1; 5), стрелка отклонится сильнее. Уменьшите ток, включив лампочку последовательно, – отклонение стрелки уменьшится. Смените полярность подключения батареи, и тем самым измените направление тока (рис. 5.1; 6) – стрелка повернется в противоположную сторону. И последнее: разорвите цепь, прекратите ток в ней – и стрелка компаса тут же вернется в исходное состояние: забыв о проводнике, на который она только что равнялась, стрелка будет, как всегда, показывать на север (рис. 5.1; 2).

Из всех этих опытов можно сделать вывод: магнетизм порождается электрическим током, и чем сильнее ток в проводнике, тем более сильным магнитом становится этот проводник. Глубокие исследования привели к еще более категорическому выводу: никакого самостоятельного магнетизма вообще нет, магнетизм порождается электричеством, магнитные свойства появляются у движущихся электрических зарядов, и только у движущихся электрических зарядов.

Но откуда же тогда берутся магнитные свойства у постоянных, железных магнитов, скажем у стрелки компаса? Их тоже создает движение зарядов, но на этот раз движение зарядов в мире атомов и молекул.

Каждый электрон сам по себе обладает некоторыми магнитными свойствами, и, кроме того, в каждом атоме есть свои внутренние электрические токи – движение электронов по орбитам. Именно эти орбитальные токи вместе с собственным магнетизмом электронов могут превратить атом в микроскопический магнит. Но у всех веществ эти микроскопические магнетики как-то взаимно уравнивают друг друга, а у постоянных магнитов магнитные свойства многих атомных токов-магнитов сумми-

¹ Вероятнее всего, первоисточником всех названий с корнем «магн» был город Магнезия на северо-востоке Греции (в том числе от него произошло и название двух одноименных городов в Малой Азии). Именно около этого греческого города находили залежи минерала магнетита. Интересно, что этому городу, кроме «магнита» и «магнетизма», мы обязаны названиями элементов магния и марганца, соединения которых под общим названием «магнезия» также встречались поблизости.

руются. Конечно, в действительности все происходит не так-то просто, но результат именно такой: постоянные магниты своими магнитными свойствами обязаны движению зарядов (рис. 5.2; 7,8).



Рис. 5.2. Свойства магнитного поля

Пытаясь подвести итог и несколько утрируя для этого истинную картину, отметим: янтарная палочка – это всего лишь янтарная палочка; натертая янтарная палочка – это электрический заряд, и, наконец, натертая янтарная палочка, если ею размахивать в воздухе, – это уже магнит.

2. Магнитное поле всегда замкнуто. Вокруг всякого движущегося заряда существует уже не только электрическое поле, как вокруг неподвижного (гл. 3; 5), но также магнитное поле, еще одна особая форма материи, еще одно невидимое, неслышимое, неосоздаемое Нечто. Чтобы убедиться, что в какой-то точке пространства есть электрическое поле, достаточно сунуть в эту точку пробный электрический заряд: если электрическое поле есть, то оно будет пытаться сдвинуть этот заряд с места. Обнаружить магнитное поле можно с помощью пробной магнитной стрелки: если магнитное поле есть, то стрелка будет поворачиваться в сторону действия магнитных сил.

Эксперименты с магнитной стрелкой убеждают, что магнитное поле всегда замкнуто, что у него, как у бублика, нет начала и нет конца (рис. 5.2; 1). Слово «замкнуто» в данном случае надо понимать так: если двигать пробную магнитную стрелку в ту сторону, куда ее поворачивает магнитное поле, то мы придем в ту же точку, из которой вышли. Этому факту не нужно искать объяснения – так устроен мир. Замкнутость магнитного поля – это его основное свойство: оно из той же серии, что и существование двух сортов электрического заряда и только одного сорта массы.

3. Возле проволочного витка с током можно выделить две особые области – северный и южный магнитные полюсы. Направление магнитного поля определяется направлением тока, который это поле создал; это направление поля можно узнать по правилу буравчика, или по правилу часов (рис. 5.2; 2). А если расположить рядом два проводника с током, то в любой точке между ними магнитные силы, действующие на пробную магнитную стрелку, будут определяться магнитными полями обоих проводников. Причем в зависимости от направления тока эти два магнитных поля могут либо действовать друг против друга и взаимно уничтожаться (рис. 5.2; 4), либо действовать согласованно (рис. 5.2; 3). При согласованном действии магнитных полей их усилия складываются, они с удвоенной силой действуют на магнитную стрелку, помещенную между проводами.

Есть простой способ складывания магнитных полей, которые создаются разными участками одного и того же проводника: нужно просто свернуть проводник в кольцо (рис. 5.2; 5). При этом магнитное поле внутри такого кольца станет суммой многих согласованно действующих магнитных полей и усилится во много раз по сравнению с полем ровного, неизогнутого проводника. Наиболее сильное суммарное поле – в районе центра витка. Причем если приближать стрелку компаса к району центра то с одной стороны, то с другой, то поле будет поворачивать эту стрелку в разных направлениях (рис. 5.2; 6). Если поднести стрелку к центру витка с одной его стороны, то стрелка повернется к витку своим северным полюсом, а если поднести стрелку к центру витка с другой стороны, она повернется к витку южным полюсом. Это различие долго объяснять словами, но оно станет сразу же понятным, если подробно проследить, как складываются магнитные поля отдельных участков кольцевого проводника (рис. 5.2; 5). И тот факт, что направление магнитных сил с одной стороны витка отличается от направления магнитных сил с другой стороны витка, заставляет выделить в его магнитном поле две качественно отличающиеся области (примерно так же мы обнаружили некоторые качественные различия у электрических зарядов и выделили два сорта зарядов – «+» и «-») и дать этим областям свои названия: область северного магнетизма – это та, которая притягивает стрелку компаса ее синей стороной, и область южного магнетизма – это та, которая притягивает стрелку ее красной стороной². Кстати, само различие магнитных свойств двух заостренных концов стрелки связано с теми же явлениями, которые наблюдались при складывании магнитных полей кольцевого тока.

4. Разноименные магнитные полюсы (северный и южный) притягиваются, одноименные – отталкиваются. Магнитное поле постоянного магнита создается суммой некоторых кольцевых токов в атомах, молекулах и

² См. «Примечание редактора» в следующем разделе.

молекулярных блоках (доменах). При этом поля отдельных микроскопических кольцевых токов складываются так, что у магнита появляются две области с особо сильными магнитными полями. Их и называют полюсами магнита (рис. 5.2; 7).

Рожденные бесчисленными атомными кольцевыми токами полюсы постоянного магнита имеют те же особенности, что и северная и южная области кольцевого тока, – они притягивают к себе магнитную стрелку разными ее концами. Общее правило, не имеющее исключений, отмечает, что разноименные полюсы магнитов (или разноименные области кольцевых токов) притягиваются, одноименные – отталкиваются.

Где у какого магнита северный полюс, а где южный, можно легко определить, если поднести к нему другой магнит, полюсы которого известны.

Остается лишь пояснить, как при этом можно дать названия полюсам самого первого магнита, скажем стрелке самого первого компаса. Здесь есть два пути. Вот первый: северным полюсом назвать то острие стрелки (оно окрашено в красный цвет), которое поворачивается к Северному географическому полюсу Земли, а южным полюсом стрелки назвать то ее острие (окрашено в синий цвет), которое смотрит на Южный географический полюс. Мы знаем, что Земля – большой магнит, полюсы которого находятся примерно там же, где и географические полюсы. Причем на месте Северного географического полюса находится южный магнитный полюс этого большого магнита. И этот южный полюс (Северный географический полюс Земли) тянет к себе острие стрелки компаса, которое мы называем северным.

Примечание редактора. По поводу цвета компасной стрелки существует большой разнобой. У большинства обычных компасов северный конец как-то выделен (формой, нанесением светящихся точек или полосок и т. п.). Часто северный конец выделяют красным цветом, как и написано у автора (при этом южный необязательно синий, чаще всего он бесцветный, черный или белый). Разнобой в это дело вносят цвета, принятые для демонстрационных магнитов в школьных опытах, – у них северный полюс всегда синий, а южный – красный (согласно ассоциации «красный» – «теплый», «синий» – «холодный»). Соответственно, для многих простейших «школьных» компасов была принята такая же расцветка, и она сохранилась в памяти у многих. Если цвета стрелки компаса соответствуют цветам демонстрационного магнита (северный полюс – синий, а южный – красный), то северный полюс у проверяемого магнита (см. предыдущий раздел) будет притягивать южный (красный) конец стрелки. Во избежание подобной путаницы при пользовании компасом стоит ориентироваться не на цвета, а на каким-то образом выделенный конец стрелки, который будет указывать на географический север, или на южный полюс поднесенного магнита.

А вот и второй способ. Зная направление тока, всегда можно по правилу буравчика, или по правилу часов (рис. 5.2; 2), определить, где у кольцевого тока северная магнитная область, а где южная (их часто тоже называют

полюсами). И если внести компас в магнитное поле кольцевого тока, то можно дать названия полюсам стрелки.

5. Катушка: ток последовательно проходит по нескольким виткам провода, и их магнитные поля суммируются. Если можно складывать магнитные поля отдельных участков проводника, свернув его в кольцо, то, конечно, можно еще больше усилить суммарное магнитное поле, если свернуть из проводника несколько колец и сблизить их (рис. 5.3; 1). Такой спиралевидный элемент называют катушкой индуктивности или просто катушкой. Ясно, чем больше витков у катушки, тем сильнее ее суммарное магнитное поле. А кроме того, поле, как всегда, зависит от тока, и поэтому способность катушки создавать магнитное поле (при данной конкретной величине тока) иногда оценивают ампер-витками – произведением тока I в амперах на число витков w .

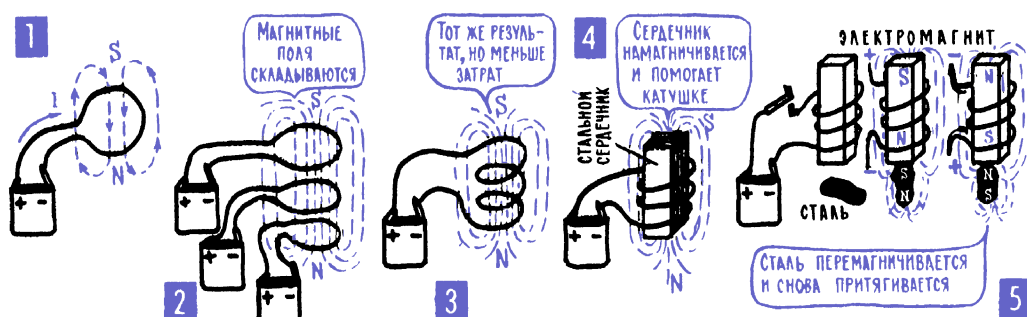


Рис. 5.3. Магнитные свойства катушки с током

6. Ферромагнитные и парамагнитные вещества в разной степени усиливают магнитное поле, диамагнитные ослабляют его. Можно во много раз усилить магнитное поле катушки, если вставить в нее сердечник (рис. 5.3; 4) из так называемых ферромагнитных веществ. К их числу относятся железо (сталь, чугун), никель, кобальт, редкоземельные элементы (гадолиний, диспрозий, тербий и др.), а также некоторые специальные сплавы и специальная керамика, содержащая окислы железа и кобальта. Мощные постоянные магниты в настоящее время делают из сплава элемента ниобия с железом и бором или самария с кобальтом.

Внешнее магнитное поле действует на кольцевые токи в атомах ферромагнитного вещества таким образом, что эти «микроскопические магнитики» поворачиваются в одну сторону и начинают создавать свое собственное магнитное поле, которое может оказаться во много раз сильнее внешнего, созданного током в катушке. Число, которое показывает, во сколько раз в том или ином веществе реальные магнитные силы превышают магнитные силы внешних полей, называют *относительной магнитной проницаемостью* μ . У стали магнитная проницаемость около 7000. Это значит, что

внутри стального сердечника, вставленного в катушку, магнитные силы поворачивали бы магнитную стрелку (это, конечно, мысленный эксперимент – стрелка внутри стального сердечника) в семь тысяч раз сильнее, чем внутри той же катушки, но без сердечника. Если в катушку вставлен стальной или иной ферромагнитный сердечник, то магнитное поле значительно усиливается и в нем самом, и во всей области вблизи катушки.

Примечание редактора. Относительная магнитная проницаемость ферромагнитных материалов очень сильно зависит, во-первых, от кристаллической структуры и химического состава, во-вторых, от напряженности магнитного поля (см. далее), при которой проводится измерение. Поэтому, говоря о величине магнитной проницаемости, обязательно следует уточнять, для какого именно материала и при каких условиях проводилось измерение. Так, для химически чистого железа величина μ составляет около 5000–20 000 в зависимости от чистоты и условий получения. Для мягкой стали (обычной конструкционной Ст3, например) в зависимости от напряженности поля величина μ составляет около 100–1000, для электротехнических сталей и специальной электротехнической керамики – ферритов – она возрастает до величин 300–10 000, а для некоторых специальных сплавов (пермаллой, альсифер и пр.) при определенных условиях может составить 100 000 и более. Величина 7000, на которую опирается автор, таким образом, очень приблизительная и характерна для электротехнических (трансформаторных) сталей только при определенных значениях интенсивности магнитного поля.

Все остальные вещества, кроме ферромагнитных, незначительно влияют на реальные магнитные силы. При этом некоторые вещества (парамагнитные) незначительно увеличивают эти силы, а другие (диамагнитные) незначительно ослабляют их.

7. Основные характеристики магнитного поля – напряженность, индукция и магнитный поток. Мы затратили довольно много усилий на знакомство с электрическими явлениями, с процессами в электрических цепях. Хочется верить, что это было интересное знакомство, но во всех случаях это было знакомство полезное. Можно даже сказать, необходимое. Потому что любая электронная установка – это не что иное, как электрическая цепь, и чувствовать себя свободно и легко в мире электроники может только тот, кто глубоко понимает законы электрических цепей.

Во многих электронных приборах и установках работает не только электричество, но и магнетизм, и именно поэтому нужно иметь хотя бы самое общее представление о некоторых важных магнитных характеристиках и единицах их измерения.

Когда нам понадобились единицы измерения различных электрических характеристик – напряжения, тока, сопротивления, мощности, – то мы начали с минимальной порции электрического заряда, с электрона. Из него была сформирована реальная единица заряда – кулон, и дальше уже все пошло легко и просто – ампер, вольт, ом, ватт, фарад, джоуль (гл. 3; 9, 10).

С единицей магнетизма дело обстоит сложнее. Во всяком случае, сделать эталоном какой-либо атомный кольцевой ток не удастся. И в качестве единицы магнитных свойств, единицы магнетизма выбраны магнитные свойства проводника, по которому идет ток в 1 А.

Знакомые нам электрические характеристики рассказывают о событиях в электрической цепи, об интенсивности движения зарядов (ток), их работоспособности (напряжение), а первопричину всех явлений – электрическое поле – мы оставили в стороне.

А вот все основные магнитные характеристики – это характеристики магнитного поля. Одна из них – *напряженность поля* (H) – показывает, с какой силой магнитное поле в данной точке действовало бы на определенный пробный магнит, скажем на проводник с током в 1 А, если бы действие происходило в вакууме (рис. 5.4; 1). События переносятся в вакуум, чтобы исключить всякое влияние среды, и поэтому можно считать, что напряженность поля – это абсолютно чистая характеристика: она говорит только о возможности магнита, который создает магнитное поле. И ни о чем другом. Единица напряженности – *ампер на метр* (А/м). Магнитное поле с такой напряженностью появляется на расстоянии 16 см³ от проводника, по которому идет ток в 1 ампер.

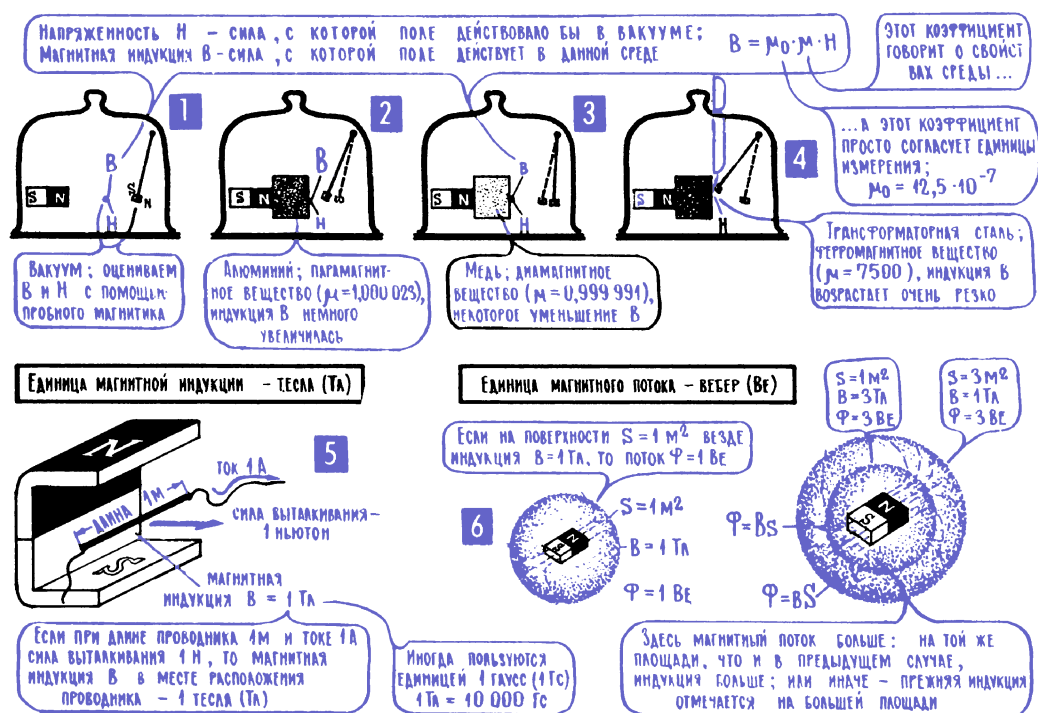


Рис. 5.4. Характеристики магнитного поля

³ Точное значение $1/2\pi$ метров.

Если напряженность говорит о том, что могло бы делать магнитное поле, то вторая характеристика – индукция – говорит о том, что оно делает реально, с учетом среды (рис. 5.4; 2). *Магнитная индукция* (B) показывает реальную силу, с которой поле в данной точке действует на пробный магнит. Единица магнитной индукции – *тесла* (Т или Тл).

Представьте себе, что в равномерное магнитное поле, созданное огромным магнитом, поместили проводник, по которому идет ток в 1 А. Так вот, если такое поле действует на такой проводник с током силой в 1 Н (ньютон), то мы говорим, что в каждой точке поля, через которую этот проводник проходит, магнитная индукция составляет 1 теслу. Довольно часто вместо теслы пользуются другой, более мелкой единицей магнитной индукции из другой системы единиц. Это *гаусс* (Гс), который в 10 000 раз меньше теслы ($1 \text{ Тл} = 10\,000 \text{ Гс}$; $1 \text{ Гс} = 0,0001 \text{ Тл}$).

Что такое метр или ампер, можно себе представить. А как представить себе магнитное поле с индукцией 1 Тл или 1 Гс? Для иллюстрации этих единиц отметим, что магнитное поле вблизи сильного магнита может достигать нескольких десятков тысяч гауссов, то есть нескольких тесл. Магнитное поле вблизи стрелки компаса едва превышает 100 Гс (0,01 Тл). Магнитное поле Земли вблизи ее поверхности может быть меньше 0,01 Гс (0,000 001 Тл).

Индукция говорит о реальных магнитных силах в определенной точке поля. А какие общие силовые возможности у данного магнита? Насколько велико пространство, где действует известная величина индукции? Об этом косвенно рассказывает такая характеристика магнитного поля, как магнитный поток (обозначается буквой Φ). Магнитный поток определяется так: выделяют площадку, перпендикулярную направлению магнитных сил, и смотрят, чему равна магнитная индукция не в одной какой-нибудь точке, а на всей площадке. Величина индукции, умноженная на площадь площадки, и называется магнитным потоком. Магнитную индукцию уместно сравнить с весом одной дождевой капли, а магнитный поток – с весом всех капель, ударяющих в данную минуту по району, где идет дождь. Единица магнитного потока в системе СИ – *вебер* (Вб), он соответствует индукции в 1 Тл, действующей на площади 1 м^2 .

8. Путь, по которому замыкается магнитное поле, часто называют магнитной цепью. Можно провести полезную аналогию между электрической цепью, по которой идет ток, и тем «бубликом», по которому замыкается магнитное поле (рис. 5.5; 1). Роль генератора в такой магнитной цепи играет сам магнит или электромагнит – катушка. Ток в электрической цепи можно сравнить с общим магнитным потоком, который как бы выходит из одного полюса магнита и входит в другой. А магнитное сопротивление будет отображать влияние среды на вели-

чину магнитного потока подобно тому, как сопротивление электрической цепи отображает влияние среды, где протекает ток, на величину этого тока. Существует даже закон Ома для магнитной цепи (рис. 5.5; 2), он имеет внешнее сходство с законом Ома для электрической цепи. Например, отмечается, что магнитный поток пропорционален так называемой магнитодвижущей силе, которую в случае электромагнита определяют ампер-витки катушки: чем больше эти ампер-витки, тем сильнее общий магнитный поток. Кроме того, магнитный поток обратно пропорционален магнитному сопротивлению: если полюсы магнита, который находился в воздухе, замкнуть магнитопроводом из стали, то резко (в 7000 раз⁴) уменьшится магнитное сопротивление цепи и увеличится магнитный поток.

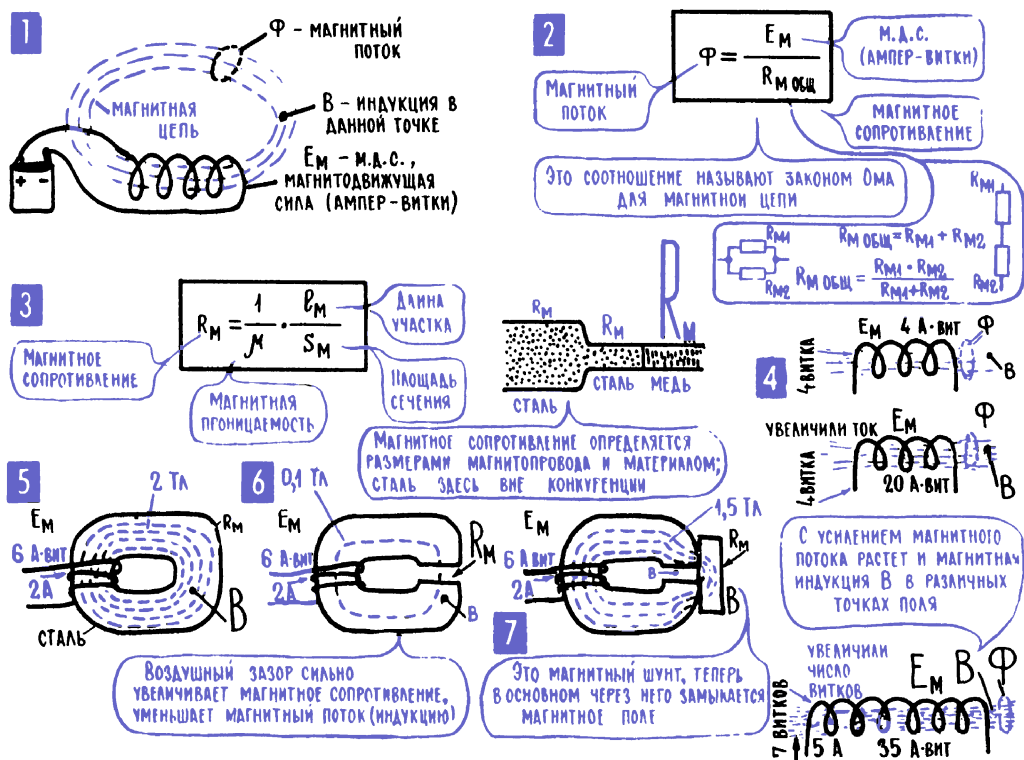


Рис. 5.5. Характеристики магнитного поля

Сравнение магнитной цепи с электрической приводит к некоторым очень важным практическим выводам. Вот один из них: если в замкнутой стальной магнитной цепи сделать небольшой воздушный зазор (рис. 5.5; 6), то он резко увеличит общее магнитное сопротивление цепи и ослабит об-

⁴ См. «Примечание редактора» к пункту 6 этой главы.

щий поток – так, участок с большим сопротивлением, последовательно включенный в электрическую цепь, резко уменьшает ток в ней. Очень важно, что при этом уменьшится и магнитная индукция в самой стали – это есть результат ослабления общего магнитного потока. А если параллельно воздушному зазору создать дополнительный путь с меньшим магнитным сопротивлением (рис. 5.5; 7), например приложить к зазору тонкую стальную пластинку, то магнитное сопротивление участка уменьшится (так уменьшалось сопротивление участка электрической цепи при ее шунтировании) и основной магнитный поток пойдет по пути наименьшего магнитного сопротивления (основной электрический ток в параллельной цепи тоже идет по пути наименьшего сопротивления), пойдет через магнитный шунт. Это интересное явление ранее использовалось для записи сигналов на магнитную ленту в магнитофонах и видеомэгнитофонах и до сих пор используется в обычных компьютерных жестких дисках.

9. Электромагнитные взаимодействия позволяют использовать электроэнергию для выполнения механической работы. До сих пор мы знали, что ток, работая в электрической цепи, может создавать тепло и свет, может переносить некоторые вещества с одного электрода на другой (гл. 3; 2). Теперь же, после знакомства с магнитными свойствами тока, нетрудно представить себе, как электрический ток выполняет тяжелую механическую работу в электродвигателях.

Двигатели бывают самые разные по устройству, режиму работы, потребляемой электрической мощности, разные по характеру питающего их тока (к некоторым двигателям нужно подводить неизменное, постоянное напряжение, к другим – обязательно меняющееся, переменное). Но во всех этих двигателях используется один и тот же принцип: по проводнику пропускают ток, магнитные силы внешнего магнита (или электромагнита) начинают двигать этот проводник, взаимодействуя с его собственным магнитным полем (рис. 5.6). Сила этого взаимодействия, а значит, и работоспособность двигателя зависит от тока в его рабочих движущихся обмотках и от индукции внешнего магнитного поля: чем больше этот ток и чем больше индукция внешнего поля, тем мощнее двигатель. Поэтому, между прочим, в двигателях так много стальных деталей: они уменьшают магнитное сопротивление тех магнитных цепей, по которым замыкаются поля, при этом усиливается магнитный поток и, следовательно, индукция (рис. 5.6; 3).

На принципиальных схемах двигатель имеет свое обозначение (рис. 5.6; 4). Для простоты его часто можно рассматривать как резистор и пользоваться всеми известными формулами, чтобы подсчитать ток в двигателе, его сопротивление, напряжение на зажимах или потребляемую двигателем мощность.

теля (в его опыте постоянный магнит вращался вокруг проводника с током). В том, что явление обратимо, был уверен не только Фарадей, но все попытки получить электричество из магнетизма разбивались об указанное автором непонимание ключевой роли движения в обоих процессах: ведь электрический ток тоже представляет собой движение (электрических зарядов в проводнике), но тогда это еще не было очевидно. В 1825 году швейцарский физик Жан-Даниэль Колладон, работавший в лаборатории Ампера в Париже, поставил простой опыт, который, несомненно, должен был иметь успех, но Колладон упустил результат из излишней аккуратности. Сейчас подобный эксперимент демонстрируют на уроках в школе: магнит передвигается внутри катушки из провода, подключенной к гальванометру. При движении магнита стрелка отклоняется. Однако Колладон решил исключить всякое влияние мощного магнита на гальванометр и разместил прибор в другой комнате. Пока он не спеша приходил взглянуть на стрелку, она, разумеется, уже успокаивалась. Заметим, что первые опыты Фарадея были безуспешными по аналогичной причине, а конечный эксперимент в 1831 году, в котором был, наконец, получен результат, гораздо сложнее по своему принципу – там в качестве источника магнитного поля использовался не постоянный магнит, а электромагнитная катушка с сердечником.



Рис. 5.7. Электромагнитная индукция

Появление индуцированной (наведенной) ЭДС в самом упрощенном виде можно объяснить так: каждый свободный электрон обладает магнитными свойствами в соответствии с законом Эрстеда, так как представляет собой элементарный электрический ток. Если поместить проводник во внешнее магнитное поле, то оно «схватит» свободные электроны проводника, взаимодействуя с ними, как с микроскопическими магнетиками. А если теперь двинуть проводник, то электроны как бы останутся на месте, удерживаемые внешним полем, и проводник сместится относительно этих свободных электронов. В итоге на одном конце проводника концентрация электронов увеличится, на другом – уменьшится. То есть на концах проводника появится скопление разноименных зарядов, а значит, электродвижущая сила. Если же остановить проводник, то электроны постепенно

вернутся в свои старые районы и вновь равномерно распределятся в проводнике. При этом, разумеется, ЭДС на его концах исчезнет. Еще раз отметим: это очень упрощенное объяснение, скорее даже намек на объяснение, чем истинная картина.

Величина наведенной ЭДС E зависит от длины проводника l , от индукции внешнего магнитного поля B и еще, конечно, от скорости движения проводника V . Чем быстрее он движется, тем больше наведенная электродвижущая сила (рис. 5.7; 3).

11. Различные способы наведения ЭДС – индукция, взаимоиנדукция, самоиндукция. Для того чтобы в проводнике навелась ЭДС, можно двигать его в магнитном поле, или, что то же самое, магнитное поле двигать относительно проводника. А можно еще поступить так: расположить рядом два проводника и в одном из них менять величину тока, например включив в цепь переменное сопротивление (рис. 5.7; 4). Раз в первом проводнике меняется ток, то, значит, меняется и его магнитное поле. А оно, это меняющееся поле, охватывает второй проводник и наводит в нем ЭДС точно так же, как это делало магнитное поле движущегося магнита. Такой способ наведения ЭДС называется взаимоиנדукцией.

Уберем второй проводник и внимательно посмотрим, что происходит в первом, когда в нем меняется ток. Этот меняющийся ток, как мы только что установили, создает меняющееся магнитное поле. Но ведь это поле не только действует в пространстве вокруг проводника, оно пронизывает и сам проводник. И когда собственное магнитное поле проводника меняется, то оно, по всем правилам электромагнитной индукции, наводит ЭДС в самом этом проводнике (рис. 5.7; 5). Такой способ наведения называют самоиндукцией, а наведенную ЭДС – электродвижущей силой самоиндукции.

Итак, в цепи при изменении тока действуют две электродвижущие силы – ЭДС генератора и ЭДС самоиндукции. Как же происходит их взаимодействие, каковы результаты такой совместной работы? Оказывается, что ЭДС самоиндукции всегда мешает генератору менять ток в цепи. (Интерес представляет только режим изменения тока: если ток не меняется, то остается неизменным и магнитное поле проводника, а значит, ЭДС самоиндукции вообще нет.) Если ток по какой-либо причине увеличивается, то ЭДС самоиндукции мешает этому увеличению, и ток уже возрастает не так резко. Если ток в цепи уменьшается, то ЭДС самоиндукции мешает этому уменьшению, поддерживает ток, и в итоге он падает более плавно. В этом отношении ЭДС самоиндукции можно сравнить с маховиком, который вначале трудно раскрутить, а затем непросто остановить. Особенно сильно возрастает ЭДС самоиндукции при резком изменении тока, например в момент размыкания цепи.

12. Чем больше число витков в катушке индуктивности, тем больше наведенная в ней ЭДС. Можно увеличить наведенную в проводнике ЭДС, если свернуть этот проводник в спираль, то есть сделать из него катушку индуктивности. В этом случае в каждом витке будет наводиться электродвижущая сила (ЭДС индукции, взаимной индукции или самоиндукции, в зависимости от выбранного способа наведения), и все эти ЭДС отдельных витков будут складываться так же, как складывается ЭДС последовательно включенных генераторов. Суммарная ЭДС, наведенная магнитным полем в катушке, пропорциональна числу ее витков.

То же самое можно сказать и о процессе взаимной индукции. Здесь для получения ЭДС располагают рядом две катушки (рис. 5.8; 4) – первичную I (в ней меняется ток и создается меняющееся магнитное поле) и вторичную II (в ней наводится ЭДС взаимной индукции). Чем больше витков в этой вторичной катушке, тем больше наведенная в ней ЭДС. Кстати, такое устройство из нескольких катушек (обмоток) называется трансформатором. Вскоре мы познакомимся с ним подробнее (гл. 6; 25).

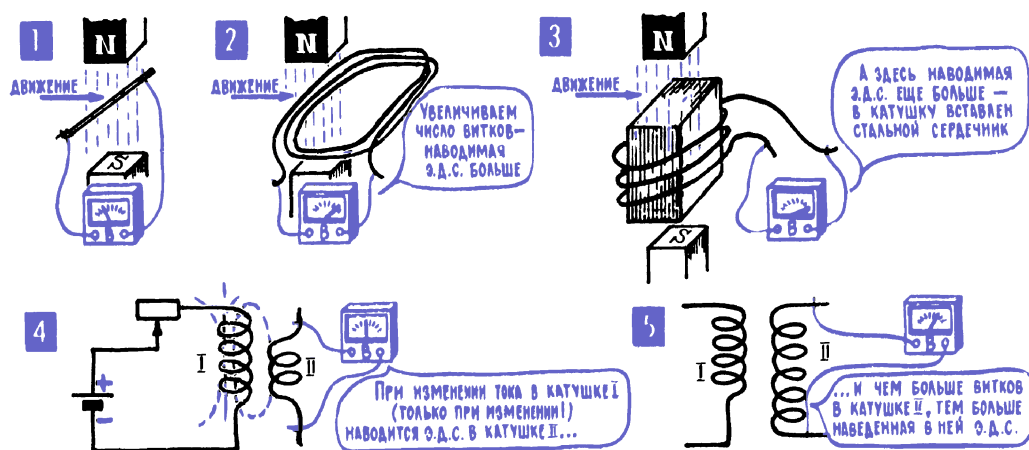


Рис. 5.8. Самоиндукция и взаимная индукция в катушках индуктивности

Наведенная ЭДС зависит и от скорости изменения индукции H магнитного поля, охватывающего витки. Обратите внимание: не от самой величины магнитной индукции, а от скорости ее изменения. Это настолько важная особенность многих процессов – зависимость чего-либо от скорости изменения, – что на ней стоит остановиться более подробно.

13. Во многих процессах решающую роль играет не абсолютное значение какой-либо величины, а скорость ее изменения. Вообразите себя героем арифметической задачи из популярной серии задач с бассейнами. По условиям нужно выбрать для купания один бассейн из трех возможных. При этом известно, что в первом бассейне уровень воды 30 см, во вто-

ром – 15 см и в третьем – 5 см. Из всех этих мелких водоемов вы, конечно, выбираете первый – лучше уж войти в воду по колено, чем по щиколотку. Но вот, почитав условия задачи чуть дальше, вы узнаете, что кран, наполняющий первый бассейн, закрыт, а во втором бассейне кран открыт (в задаче с бассейнами обязательно должны быть открытые и закрытые краны) и уровень воды поднимается на 1 см каждую минуту. Приходится на ходу менять решение – выбираем второй бассейн, через час здесь вода поднимется уже до 75 см, и можно будет поплавать по-настоящему.

В ожидании, пока это произойдет, вы наконец дочитываете условия задачи до конца, и выясняется, что и в третьем бассейне открыт кран, причем открыт очень сильно – уровень воды каждую минуту поднимается на 10 см. Теперь сомнений нет: лучше всех третий бассейн, он наполнится до тех же 75 см, что и второй, уже не за час, а всего за каких-нибудь 7 минут. Только успеешь раздеться, и уже можно нырять.

Этот простой пример показывает, что есть случаи, когда нужно не только знать «сколько?», но стоит также поинтересоваться, «меняется или не меняется?», а если окажется, что меняется, то необходимо выяснить, «насколько быстро меняется?», или, иными словами, «чему равна скорость изменения?».

14. Наведенная в катушке ЭДС тем больше, чем больше скорость изменения магнитного поля. До чего же все-таки это прекрасное изобретение человека – школа, система передачи знаний. То, на выяснение чего великий Фарадей потратил годы, мы узнаем в несколько минут. Заглянув в школьный учебник физики, мы узнаем, что ЭДС, которая наводится в проводнике или в катушке, зависит от того, насколько быстро меняется поле: чем больше скорость изменения магнитной индукции (или скорость движения проводника в равномерном поле с постоянной индукцией), тем больше наведенная ЭДС. Объяснить это можно, пользуясь крайне упрощенной картиной наведения ЭДС и ни на минуту не забывая о предупреждении в главе 1; 8. При движении проводника внешнее поле, схватившее его свободные электроны, старается сдвинуть их в один конец этого проводника, накопить в одной области. А электроны своими электрическими полями расталкиваются, стараются распределиться по проводнику равномерно. Здесь для магнитного поля, создающего ЭДС, самое главное – скорость: чем быстрее оно будет сдвигать электроны, тем большее их количество накопится на концах проводника (катушки), тем больше будет наведенная ЭДС индукции. Кое-что здесь может пояснить еще один пример с бассейнами. Представьте себе, что в бассейне два крана, через один вода наливается (внешнее магнитное поле, изменяясь, тянет за собой электроны), через другой кран – выливается. Ясно, что чем больше открыт первый кран, чем больше скорость наполнения бассейна, тем больше в нем успеет накопиться воды. А стоит перекрыть первый кран (скорость изменения магнитного

поля равна нулю), как бассейн быстро окажется пустым (наведенная ЭДС равна нулю).

В процессе взаимной индукции и самоиндукции магнитное поле меняется потому, что меняется ток в цепи, и поэтому чем быстрее меняется ток, тем больше и наведенная в катушке ЭДС (рис. 5.9; 1, 2). Подчеркнем смысл понятия «скорость изменения» еще одним примером, но уже не с бассейнами, а с более близкой нам теперь электрической цепью. По двум совершенно одинаковым катушкам идет ток – по первой 5 А, по второй – 1000 А. Токи в катушках постепенно меняются, и через секунду в первой катушке уже 10 А, во второй – 1001 А. Так вот, ЭДС самоиндукции во второй катушке, несмотря на устрашающую абсолютную величину тока (1000 А – это очень много!), будет меньше, чем в первой. Потому что скорость изменения тока в первой катушке больше – здесь ток изменился на 5 А за 1 с, а во второй катушке – всего на 1 А за 1 с.

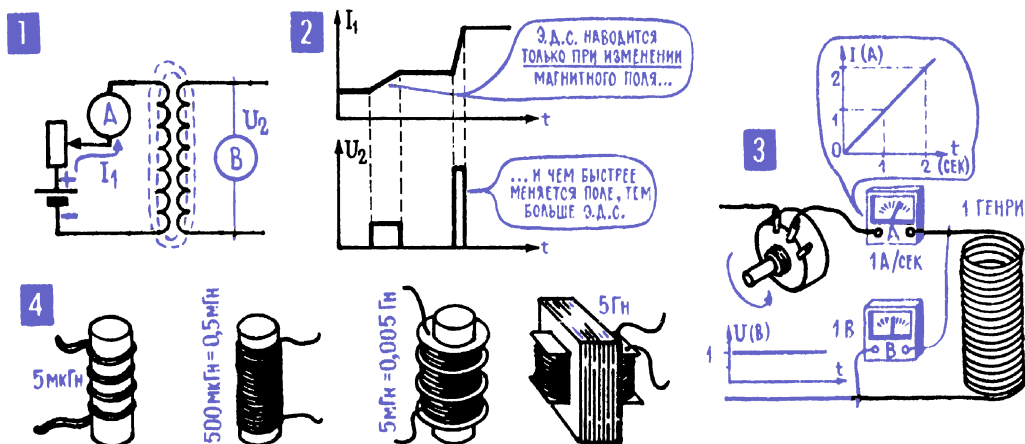


Рис. 5.9. Наведенная ЭДС и понятие индуктивности

15. Индуктивность характеризует способность катушки создавать магнитное поле, единица индуктивности – генри. Зависимость ЭДС самоиндукции от скорости изменения тока позволяет ввести точную характеристику тех свойств самой катушки, которые говорят об умении взаимодействовать с магнитным полем и создавать свое поле. Мы упоминали, что магнитное поле катушки тем сильнее, чем больше в ней витков, и что поле резко усиливается, если вставить в катушку ферромагнитный сердечник (гл. 5; 6; рис. 5.8; 3). Теперь мы можем о магнитных свойствах катушки судить по той ЭДС, которая в этой катушке наводится. Характеристика катушки, которая рассказывает об этом, называется ее коэффициентом самоиндукции, или, короче, коэффициентом индуктивности, или, еще короче, просто индуктивностью. Обозначается этот коэффициент буквой L ,

этой же буквой часто обозначаются на схемах и сами катушки. Единица индуктивности – генри. Такой индуктивностью обладает катушка, если при изменении в ней тока на 1 А за 1 с в катушке наводится ЭДС 1 В. О том, что реально могут представлять собой катушки той или иной индуктивности, показано на рис. 5.9.

16. В машинных генераторах ЭДС создается за счет перемещения проводников в магнитном поле. К арсеналу генераторов, в которых электризация электродов шла за счет химической, тепловой или световой энергии (гл. 3; 7), мы сейчас прибавим еще один тип источников электрической энергии. Это машинный генератор, в нем получают ЭДС, двигая проводник или систему проводников (обмотку) в магнитном поле. В реальных генераторах, правда, чаще поступают наоборот – обмотка, на которой должна наводиться ЭДС, стоит на месте, а относительно нее движутся мощные электромагниты. Но принцип работы всех машинных генераторов один и тот же: они используют энергию внешних источников (водяных или паровых турбин, двигателей внутреннего сгорания, ветродвигателей) для того, чтобы создавать ЭДС, направлять в электрические цепи заряды, которые могли бы выполнять разные виды работ – светить, греть, двигать.

Задумываясь над тем, что происходит в такой системе, можно натолкнуться на два простых вопроса, два наивных «почему?». Вот первое – почему для перемещения обмоток генератора в магнитном поле нужны мощные источники энергии, все эти гигантские паровые турбины, гигантские плотины, в которых работает падающая с огромной высоты вода? На это «почему?» можно ответить в общем виде, а можно ответить конкретно, с учетом конкретных процессов в электрогенераторе. Сначала общий ответ. Электрические заряды, которые электрогенератор направит в цепь, будут выполнять там большую работу. Откуда заряды возьмут необходимые для этого силы? Кто даст им необходимый запас энергии? Конечно же, генератор. Но генератор не может взять энергию из ниоткуда, он получает ее от внешнего источника, например от паровой турбины.

А теперь конкретно: мы знаем, что магнитное поле выталкивает проводник с током (гл. 5; 7, 9), а здесь, в генераторе, мы вынуждены вталкивать проводник с током в магнитное поле, которое, естественно, сопротивляется этому вталкиванию; чтобы преодолеть сопротивление магнитного поля, как раз и приходится затрачивать энергию – иначе не провернешь в магнитном поле обмотку, в которой должна навестись ЭДС.

Второе «почему?» не только наивно, оно еще и весьма коварно. Мы сжигаем на электростанциях топливо (почти 80 % всей электроэнергии мира вырабатывают тепловые электростанции⁶) для того, чтобы пришла в дви-

⁶ В тексте издания 1986 года указана ошибочная цифра 90 %. В 1973 году тепловые станции (уголь, газ и нефть) вырабатывали более 75 %, остальное делили между собой ГЭС (21 %) и атомные станции (более 3 %). В 2015 году тепловые электростанции вырабатывали около 67 %; атомные около 10 %, возобновляемые источники (ГЭС и альтернативная энергетика) – около 23 %.

жение паровая турбина и чтобы у нее были силы двигать обмотки в электрогенераторе. Генератор создает ток, который затем приходит на завод и приводит в движение станок. Или приходит в нашу квартиру и нагревает электроплитку. Так для чего же нужен этот посредник – электричество? Для чего нужны столь сложные преобразования тепло – механическая работа – электричество – тепло? Или тепло – механическая работа – электричество – механическая работа? Не проще ли сразу, без посредников использовать механическую работу или тепло?

Вы сами легко ответите на подобные вопросы, если внимательно посмотрите вокруг, приглядитесь к тому, как работает электричество.

Электричество – это возможность перебрасывать энергию на огромные расстояния. И очень простые, удобные средства транспорта – не труба с горячим паром, не состав с углем, а всего лишь медный проводник – нужны, чтобы миллиарды тружеников-электронов приступили к работе за сотни километров от электростанции.

Электричество – это возможность делить энергию на любые порции. И распределять ее между огромным числом потребителей (рис. 5.10): провел провод в квартиру – и пользуйся сколько нужно.

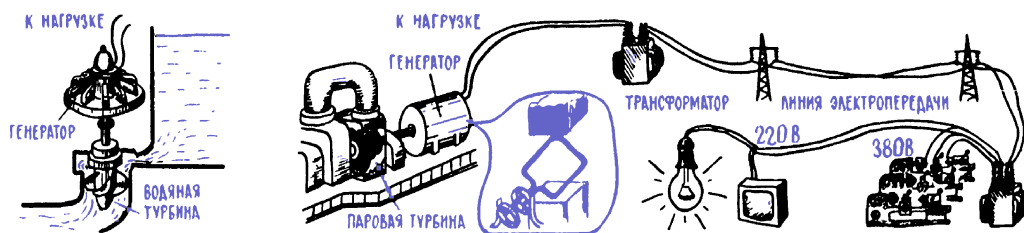


Рис. 5.10. Электроэнергия

Электричество – это мгновенное превращение полученной энергии в любую нужную тебе форму – в свет, тепло, механическое движение. Это компактные простые и яркие источники света, компактные и простые механические двигатели (представьте себе, что в электропроигрывателе установлен бензиновый мотор) и масса самых важных устройств и процессов, которых без электричества вообще не было бы (ускоритель атомных частиц, телевизор, большая вычислительная машина). Одним словом, у электричества достаточно достоинств, чтобы было выгодно сначала превращать другие виды энергии в электроэнергию, а затем по мере необходимости производить обратные превращения.

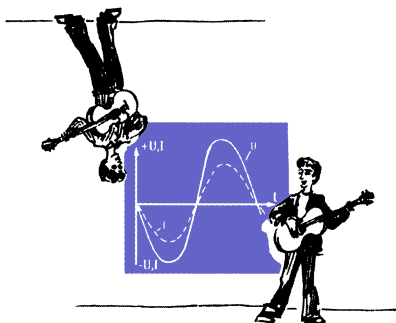
Примечание редактора. Надо учитывать, что за удобство использования электричества приходится платить излишним расходом источников энергии (в частности, органического топлива). КПД тепловых электростанций не превышает 40 %, остальное уходит с горячим отработанным паром. Повысить эффективность использо-

вания топлива можно, если дополнительно утилизировать отработанный пар на предприятиях и на бытовые нужды, что осуществляется на теплоэлектростанциях (ТЭЦ), но к выработке электричества это уже не имеет отношения. Второй источник потерь – сопротивление линий электропередачи и бытовых электрических сетей, на котором теряется около 10 % произведенной электроэнергии. Иными словами, за удобство пользования электрическими плитами, духовками, микроволновками и другими электробытовыми приборами мы вынуждены примерно 70 % выработанной энергии либо впустую рассеивать в окружающей среде, либо искать пути ее утилизации, что не всегда возможно.

Именно по этой причине всеобщий переход на электромобили не решит проблемы загрязнения окружающей среды в глобальном масштабе, а наоборот, должен усугубить ее – в случае если не будут найдены дешевые способы преобразования и хранения энергии из возобновляемых источников. Потенциал гидроэлектростанций на сегодняшний день практически исчерпан (везде, где можно, они уже построены), а суммарное производство электроэнергии из всех альтернативных источников (солнечные, ветровые, приливные, гидротермальные и т. п. электростанции) на 2015 год в мире не превышало 7 %. Хотя в некоторых странах мира эта цифра сильно больше средней – в Германии доля альтернативной энергетики в отдельные периоды 2017–2019 годов доходила до 85 %, а в Дании, где дуют постоянные ветры, иногда даже превышала потребности страны.

Самый удобный способ получения наведенной ЭДС – это вращение проводников (обмоток) в магнитном поле. Именно вращение. Главным образом, конечно, потому, что большинство машин-двигателей дают именно вращательное движение. К тому же вращательное движение проводника в магнитном поле позволяет легко и просто получить переменную ЭДС, получить переменный ток, который имеет массу интересных особенностей и важных достоинств.

Но это уже следующая глава нашего повествования, целиком посвященная особенностям и достоинствам переменного тока.



ГЛАВА 6

Сложный характер переменного тока

1. Если в магнитном поле вращать проводник, то в нем наводится переменная синусоидальная ЭДС. Отмечая, что ЭДС, наведенная в проводнике, который движется в магнитном поле, зависит от скорости его перемещения, нужно помнить: речь идет не о движении вообще, куда угодно. Важно то, с какой скоростью проводник пересекает магнитное поле, с какой скоростью он движется перпендикулярно полю, перпендикулярно направлению, в котором поле повернуло бы пробную магнитную стрелку. Это поясняет рис. 6.1, на котором показано движение проводника в магнитном поле в разных направлениях. Предполагается, что скорость движения во всех пяти примерах одна и та же, т. е. проводник за единицу времени, скажем за 1 с, везде проходит одно и то же расстояние a .

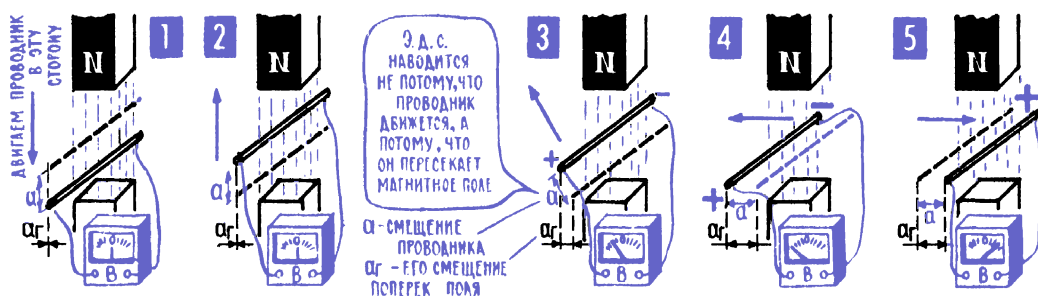


Рис. 6.1. Движение проводника в магнитном поле

В первых двух случаях (рис. 6.1; 1,2) проводник движется по направлению поля, движется в том же направлении, в котором поле устанавливает стрелку компаса. А поэтому наведенная ЭДС равна нулю; чтобы ЭДС наводилась, проводник должен хоть сколько-нибудь сместиться поперек поля. Такое небольшое смещение мы видим на рис. 6.1; 3. Здесь проводник по-прежнему продвинулся на расстояние a , но теперь он уже поперек поля сместился на расстояние a_r . В случае, показанном на рис. 6.1; 4,

ЭДС максимальна – проводник движется строго перпендикулярно полю. Такая же максимальная ЭДС наводится и в случае рис. 6.1; 5. Здесь, правда, проводник движется в другом направлении и полярность ЭДС, конечно, меняется на обратную (по сравнению с рис. 6.1; 4). Так бывает всегда: полярность наведенной ЭДС всегда зависит от того, в каком направлении проводник пересекает магнитное поле, и определяется эта полярность по известному правилу правой руки (рис. 5.7; 1).

Все рассмотренные примеры – лишь подготовка к знакомству с простейшей моделью машинного электрического генератора, где проводник вращается в равномерном магнитном поле (рис. 6.2). В таком проводнике индуцируется ЭДС, которая подводится к внешней электрической цепи с помощью скользящих контактов. Проводник вращается в магнитном поле равномерно с постоянным числом оборотов в минуту. При этом он, естественно, с постоянной скоростью движется по окружности, но с разной скоростью пересекает магнитное поле. Когда, например, проводник проходит точки 3 и 7, он с максимальной скоростью пересекает поле, хотя и в разных направлениях. В эти моменты в проводнике наводится ЭДС, наибольшая из всех возможных, но, конечно, разной полярности. Когда проводник проходит точки 1 и 5, он вообще не пересекает магнитного поля, и наведенная ЭДС в эти моменты равна нулю. Во всех остальных точках наводится ЭДС разной величины, в пределах от максимальной до нуля, причем на всем участке движения от точки 1 до 5 ЭДС имеет одну полярность, а на всем участке от 5 до 1 – противоположную. Одним словом, на проводнике, который вращается в магнитном поле, наводится переменная ЭДС, непрерывно меняется ее величина и периодически меняется ее полярность. О том, как меняется наведенная ЭДС при вращении проводника в магнитном поле, лучше всего рассказывает график.

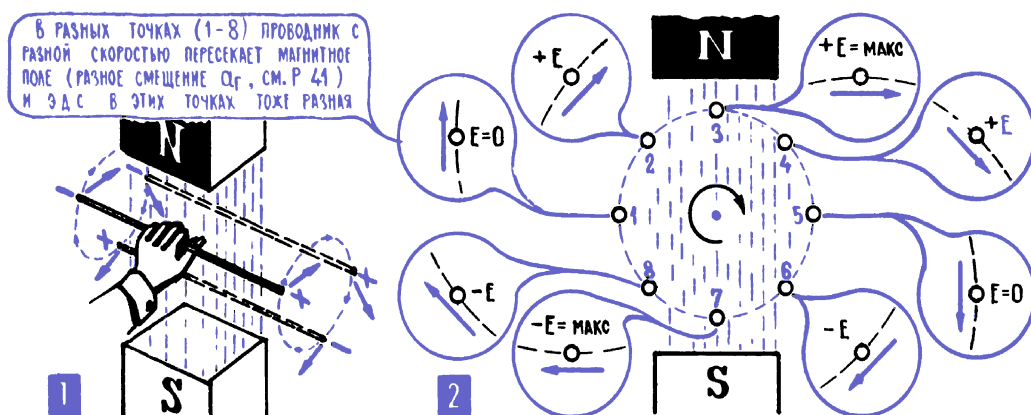


Рис. 6.2. Круговое движение проводника в магнитном поле

2. График – особый рисунок, наглядно показывающий, как одна какая-либо величина зависит от другой. Об одной из зависимостях закона Ома можно рассказать словами – «ток прямо пропорционален электродвижущей силе...», можно записать ее в виде короткой формулы (рис. 4.1), а можно отобразить эту зависимость на графике, как это сделано на рис. 6.3; 1. Основа графика – две взаимно перпендикулярные линии, две оси: вертикальная и горизонтальная. По вертикальной оси в определенном масштабе откладывают, отмеряют ту величину, об изменениях которой мы хотим рассказать. А по горизонтальной оси отмеряют ту величину, от которой зависит первая. «В определенном масштабе» означает, что если, например, отмеряется масса, то 1 мм на шкале может соответствовать 1 г или 1 кг; если отмеряется температура, то 1 мм – это уже может быть 1° ; если ток – то 1 мм может отображать 1 А; если напряжение – 1 В. Отсчет в большинстве случаев ведется от нуля, совпадающего с точкой пересечения осей.

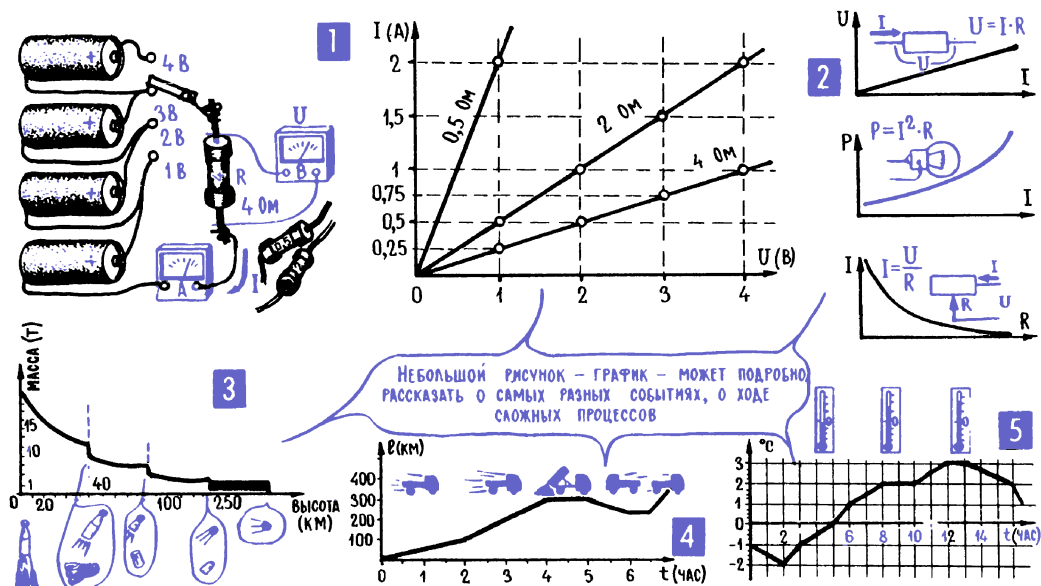


Рис. 6.3. Графики различных величин

На рис. 6.3 показано, как с помощью графиков можно записать несколько самых разных зависимостей. Первая – зависимость тока I в цепи от напряжения U при некотором постоянном сопротивлении R . Строится график так: задаемся некоторыми значениями напряжения – 1 В, 2 В, 3 В и т. д. – и подсчитываем для них соответствующие величины тока по формуле закона Ома. При $R = 2\ \Omega$ получается соответственно 0,5 А, 1 А, 1,5 А и т. д. Теперь из соответствующих точек на осях I и U проводим перпендикуляры до их пересечения и получаем на поле между осями точки, каждая из которых

говорит: «при $U = 1$ В ток $I = 0,5$ А», «при $U = 2$ В ток $I = 1$ А», «при $U = 3$ В ток $I = 1,5$ А» и т. д. Соединяем точки и получаем линию, которая как раз показывает, как именно ток I зависит от напряжения U . Одного взгляда на график достаточно, чтобы сказать, что с увеличением напряжения ток растет, причем растет прямо пропорционально, или иначе – линейно. Для экономии места можно на одном графике показать несколько зависимостей I от U при разных сопротивлениях цепи. Легко заметить, что с ростом сопротивления цепи R ток I при увеличении U нарастает не так резко. Графики могут также показать, что величина тока обратно пропорциональна сопротивлению, рассказать о зависимостях закона Ома для участка цепи, о том, как мощность зависит от тока или напряжения (рис. 6.3; 2).

На графике рис. 6.3; 3 условно показано, как меняется масса космической системы при выведении спутника на околоземную орбиту. Сама масса в тоннах отложена по вертикальной оси, а по горизонтальной отложена высота подъема ракеты-носителя. На Земле (нулевая высота) общая масса системы – 20 т (цифры условные), затем по мере подъема выгорает топливо, и масса ракеты постепенно уменьшается. На высоте 40 км масса уменьшается резко, скачком это отстреливается отработавшая первая ступень. Точно так же на высоте 100 км отстреливается вторая ступень, и на высоте 250 км – третья. Остается на орбите сам спутник (чистая масса 1 т), который движется по эллиптической орбите, то несколько опускаясь, то поднимаясь над Землей (жирная линия на графике).

График (рис. 6.3; 4) показывает, как меняется с течением времени расстояние l , которое автомобиль проехал от города А. Мы видим, что первые два часа автомобиль шел с постоянной скоростью, каждый час покрывая 50 км. В последующие два часа скорость была больше – за каждый час машина уже проходила 100 км. А вот на графике появился горизонтальный участок – время идет, а пройденный путь остается неизменным, то есть машина стоит на месте. Потом водитель вообще поехал назад – линия графика пошла вниз, то есть расстояние от города А стало уменьшаться, скорее всего, водитель обнаружил какую-то неисправность и вернулся в дорожную мастерскую. После непродолжительной остановки машина вновь двинулась вперед.

И еще один пример – график изменения температуры в течение суток (рис. 6.3; 5). Мы видим, что температура почти все время меняется – только между 8 и 10 часами и между 12 и 13 часами она остается постоянной. В какие-то моменты времени температура меняется медленнее, а в другие моменты резче. На этом графике мы впервые видим, как кривая (так часто называют линию, соединяющую точки графика) пересекает горизонтальную ось и уходит вниз. Так условились показывать, что изменяющаяся величина становится отрицательной. В данном случае это отрицательная температура, но точно так же строится график отрицательной ЭДС или отрицательного тока (рис. 6.4 и 6.5).

Нужно сказать, что сами названия «положительная ЭДС» и «отрицательная ЭДС» присвоены совершенно условно: они должны подчеркнуть, что меняется полярность на контактах генератора, его «плюс» и «минус» меняются местами. И одну из этих полярностей, часто совершенно безразлично – какую, условно называют положительной, вторую – отрицательной.

3. График переменной ЭДС показывает, как она меняется с течением времени. Отсчет отрицательной величины на графике, в частности отрицательной ЭДС, ведется так же, как и положительной, от горизонтальной оси, но уже, естественно, вниз: чем больше отрицательная ЭДС, тем ниже от горизонтальной оси (оси времени) расположится соответствующая точка на графике.

На рис. 6.4 показан график переменной ЭДС, которая наводится в проводнике при вращении его в магнитном поле (рис. 6.2). График очень подробно рассказывает о процессе наведения ЭДС. Мы видим, как в какой-то момент ЭДС достигает максимума – это проводник проходит точку 3 и с максимальной скоростью пересекает магнитное поле. Видим максимальную ЭДС, но уже другой полярности – проводник проходит точку 7. Наконец, график рассказывает, что дважды за каждый оборот проводник движется не поперек поля, а вдоль и затем меняет направление, в котором он пересекает поле. В эти моменты – они соответствуют точкам 1 и 5 – ЭДС равна нулю, и в эти же моменты происходит смена ее полярности.

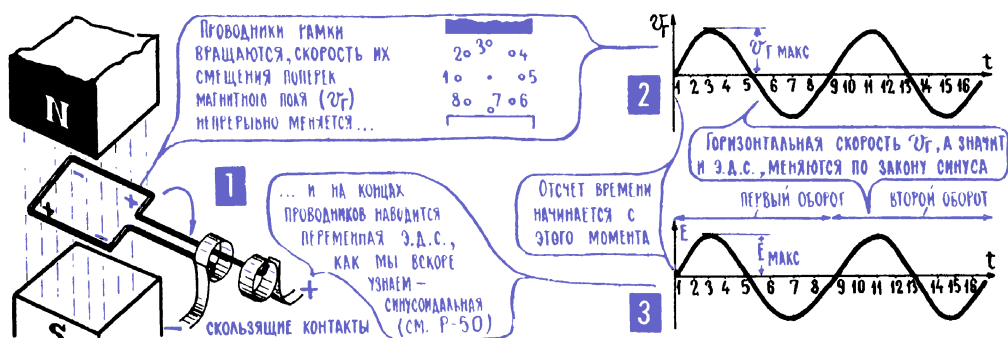


Рис. 6.4. ЭДС генератора на графике

4. Под действием переменной ЭДС в цепи идет переменный ток, а на участках цепи действуют переменные напряжения. Все, что происходит в электрической цепи, подчиняется закону Ома, и если увеличивается или уменьшается ЭДС, то увеличивается или уменьшается ток, если меняется полярность генератора, то меняется направление тока (рис. 6.5; 3). И также в полном соответствии с законом Ома (но уже для участка цепи) переменный ток, проходя по какому-нибудь резистору, создает на нем переменное напряжение (рис. 6.5; 4).

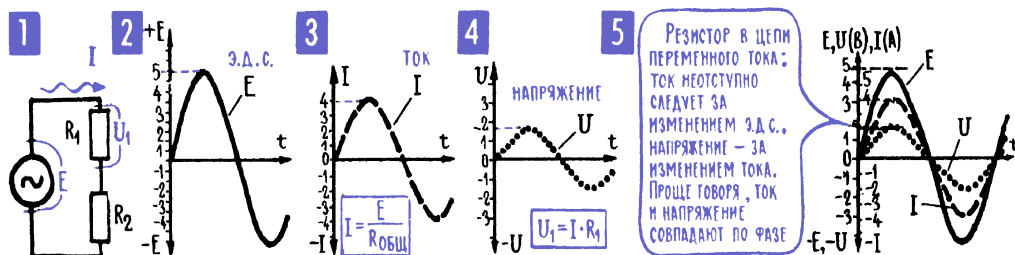


Рис. 6.5. Графики переменной ЭДС, напряжения и тока в электрической цепи

Переменный ток и переменное напряжение по пятам следуют за всеми изменениями ЭДС, и поэтому график переменного тока и график переменного напряжения будут точной копией графика переменной ЭДС. Очень часто кривую тока и кривую ЭДС или напряжения располагают вообще на одном графике (рис. 6.5; 5), сделав для этого две разметки вертикальной оси — одну разметку в вольтах для ЭДС или напряжения, другую разметку в амперах для тока. Рассматривая такой двойной график, нужно помнить, что это всего лишь экономия бумаги, и ничего больше. Ни в коем случае нельзя сравнивать высоту этих кривых — они рассказывают о разных величинах, каждая начерчена в своем масштабе, и общая у них только ось времени.

5. Переменный ток может работать так же хорошо, как постоянный. От того, что переменная ЭДС двигает заряды в разные стороны то туда, то обратно, работоспособность этих зарядов ничуть не уменьшается. Они так же, как при однонаправленном, одностороннем движении, сталкиваются с атомами вещества, нагревают его, заставляют светиться. И магнитное поле переменный ток создает не менее успешно, чем постоянный, только направление этого магнитного поля непрерывно меняется: как только сменится направление тока, так поменяются местами северный и южный полюсы электромагнита. Во многих случаях эту неприятность научились обходить — существуют, в частности, двигатели переменного тока, которые работают ничуть не хуже, чем двигатели постоянного тока. В других же случаях замена «севера» на «юг» вообще не имеет значения. Вот пример. Электромагнит притягивает стальную деталь потому, что он намагничивает ее и тянет к себе, как обыкновенный магнит (рис. 5.3; 5). Если же в обмотке электромагнита протекает переменный ток, то одновременно с изменением магнитного поля самого электромагнита меняется направление намагниченности стальной детали, и ее притягивание не прекращается.

В тех же случаях, когда постоянный ток нельзя заменить переменным (или переменный постоянным), можно, как мы скоро увидим, превратить один вид тока в другой.

6. Частота говорит о том, насколько быстро меняется переменный ток; единица частоты – герц. О постоянном токе нам достаточно было знать одно – какова интенсивность движения зарядов, то есть то, что отражено в характеристике «величина тока», «сила тока». Переменный ток – явление значительно более сложное, и, чтобы судить о событиях в цепях переменного тока, нужна значительно более обширная информация. В частности, нужно знать, насколько быстро меняется ток, насколько часто происходит смена его направлений. Об этом в равной мере хорошо говорят две характеристики, связанные между собой. Первая – период – указывает время, в течение которого переменный ток (ЭДС, напряжение), изменяясь, проходит весь свой цикл, все свои возможные значения. Вторая характеристика – частота – говорит о том, сколько периодов, то есть полных циклов изменения тока (ЭДС, напряжения), успевает произойти за единицу времени. Единица частоты – *герц* (Гц) – число периодов в секунду. Ясно, что чем медленнее происходят изменения тока, чем дольше длится период, тем меньше (принято говорить «ниже») частота. И наоборот, с увеличением частоты период становится все более коротким (рис. 6.6).

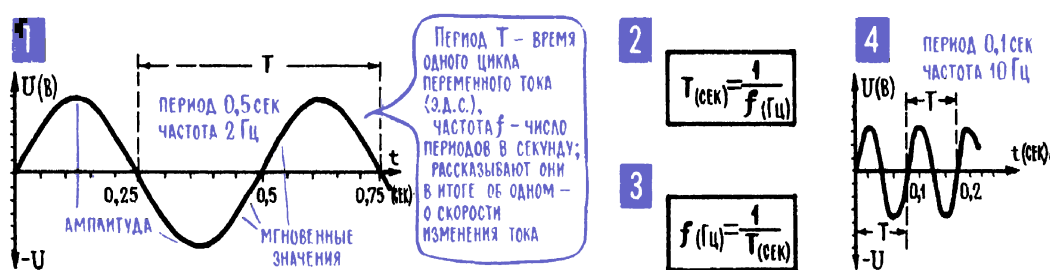


Рис. 6.6. Период и частота переменного тока

7. «Мгновенное значение» и «амплитуда» говорят о работоспособности тока в данный момент; «эффективное значение» – в среднем за длительное время. С постоянным током было просто: чтобы представить себе ток в цепи, достаточно было знать одну цифру. А вот что делать, если потребуется указать величину переменного тока? Какую цифру называть? Ток ведь переменный, величина его непрерывно меняется, и в какой-то момент по проводнику идет очень много свободных зарядов, в другой момент очень мало, в третий ни одного... Можно поступить так: указать силу тока и отметить, что она наблюдалась именно в такой-то момент. Например, так: «29 мая 1986 года в 18 часов 37 минут 26,57854 секунды ток в цепи был равен 5 амперам». Это будет мгновенное значение тока, ток в данный момент. Характеристика не очень удобная: нельзя же каждую микросекунду измерять ток, чтобы составить его подробное жизнеописание.

Можно назвать наибольшее, амплитудное значение тока (ЭДС, напряжения), тот максимум, которого он достигает дважды за период. Кстати, наибольший ток (ЭДС, напряжение) во время положительного и отрицательного полупериода называют положительной и отрицательной амплитудой. Это уже вполне приемлемая характеристика, жаль только, рассказывает она о довольно редких событиях – амплитудный ток появляется на неуловимо короткое мгновение всего два раза за период.

Чтобы судить о том, что может сделать переменный ток не в какой-то «данный момент», а в среднем за длительное время, проще всего сравнить его действия с постоянным током. Пропустим, например, по лампочке переменный ток и по такой же точно лампочке пропустим постоянный ток. Подберем величину этого постоянного тока так, чтобы обе лампочки светились одинаково. Это будет означать, что оба тока – постоянный и переменный – производят одинаковую работу. Так вот, эту величину постоянного тока, который по своей работоспособности эквивалентен переменному, называют эффективным значением этого переменного тока. Точно так же эффективное значение переменного напряжения (ЭДС) – это есть величина некоего постоянного напряжения с такой же работоспособностью.

При прочих равных условиях эффективное значение тока (ЭДС, напряжения) тем больше, чем больше амплитуда (атлет, поднимающий штангу в 200 кг, за день наверняка сумеет перенести больше грузов, чем малыш, который с трудом тащит легкую табуретку). Для переменной ЭДС (напряжения, тока), которая наводится во вращающемся витке (рис. 6.4, такая ЭДС называется синусоидальной, и нам еще предстоит детальное знакомство с ней далее – см. гл. 7; 11), существует такое соотношение: эффективное значение составляет примерно 70 % от амплитуды, а амплитуда соответственно в 1,41 раза¹ больше эффективного значения (рис. 6.7). Так, например, в сети переменного тока с напряжением 220 В амплитуда напряжения $220 \cdot 1,41 \approx 310$ В.



Рис. 6.7. Эффективное значение переменного тока

¹ Точное значение $\sqrt{2} = 1,414...$

Для элементов цепей переменного тока, как правило, указывают их эффективные напряжения и токи: если на лампочке или утюге написано «220 В», то имеется в виду именно эффективное напряжение.

8. Фазу и сдвиг фаз удобно указывать не в секундах, а в градусах. Если не искать строгих определений, то можно сказать, что «фаза» – это такой параметр переменного тока, который указывает, в какой именно момент времени этот переменный ток (ЭДС, напряжение) имеет то или иное мгновенное значение. Поэтому, указывая фазу, мы должны были бы, например, говорить так: «У мгновенного значения тока 5 А фаза такая – 10 часов 37 минут 16,3785 секунды 19 декабря 1985 года». Конечно, вести отсчет от начала нашей эры и определять фазу по секундомеру не очень-то удобно. И главное, не нужно. Вполне достаточно вести отсчет фазы от какого-либо условного момента времени, скажем от начала периода, от того момента, когда переменный ток проходит через ноль и начинается положительный полупериод. И отсчитывать фазу удобно не в секундах, а в долях периода. Тогда фазу можно было бы, например, указывать так: «У мгновенного значения тока 5 А фаза – 5 % всего периода». Из графика легко заметить, что фаза положительной амплитуды тока составляет 25 %, или иначе $1/4$ периода, фаза отрицательной амплитуды – 75 %, или $3/4$ периода, а фазы нулевых значений 0 %, 50 % и 100 % от длительности целого периода.

Фазу принято отмерять не в процентах, а в градусах, каждый градус – это $1/360$ часть периода, то есть градусами в данном случае отсчитывают не угол, не температуру, а время. Название единицы измерения во всех этих случаях одинаковое – градус, а единицы измерения разные. Кстати, градусы как меру времени, меру периода можно легко связать с угловыми градусами, показывающими положение проводника, который вращается в магнитном поле (рис. 6.4 и 6.8; 2).

Параметр «фаза» очень важен, а часто и необходим, например в тех случаях, когда в цепи действуют несколько переменных ЭДС. Чтобы оценить результаты такого взаимодействия, нужно знать, как сдвинуты фазы этих ЭДС. Насколько это важно, видно из примеров, приведенных на рис. 6.8; 3, 4, 5. В первом случае нет сдвига фаз между двумя напряжениями, и их действия суммируются. А вот в третьем примере напряжения действуют друг против друга – сдвиг фаз между ними равен 180° , то есть, по сути дела, одно напряжение запаздывает по отношению к другому на полпериода. Или, что то же самое, на полпериода опережает его. Иногда фазу приходится учитывать еще и потому, что в цепи не совпадают по времени, то есть сдвинуты по фазе, напряжение и ток. В цепях переменного тока и такое возможно.

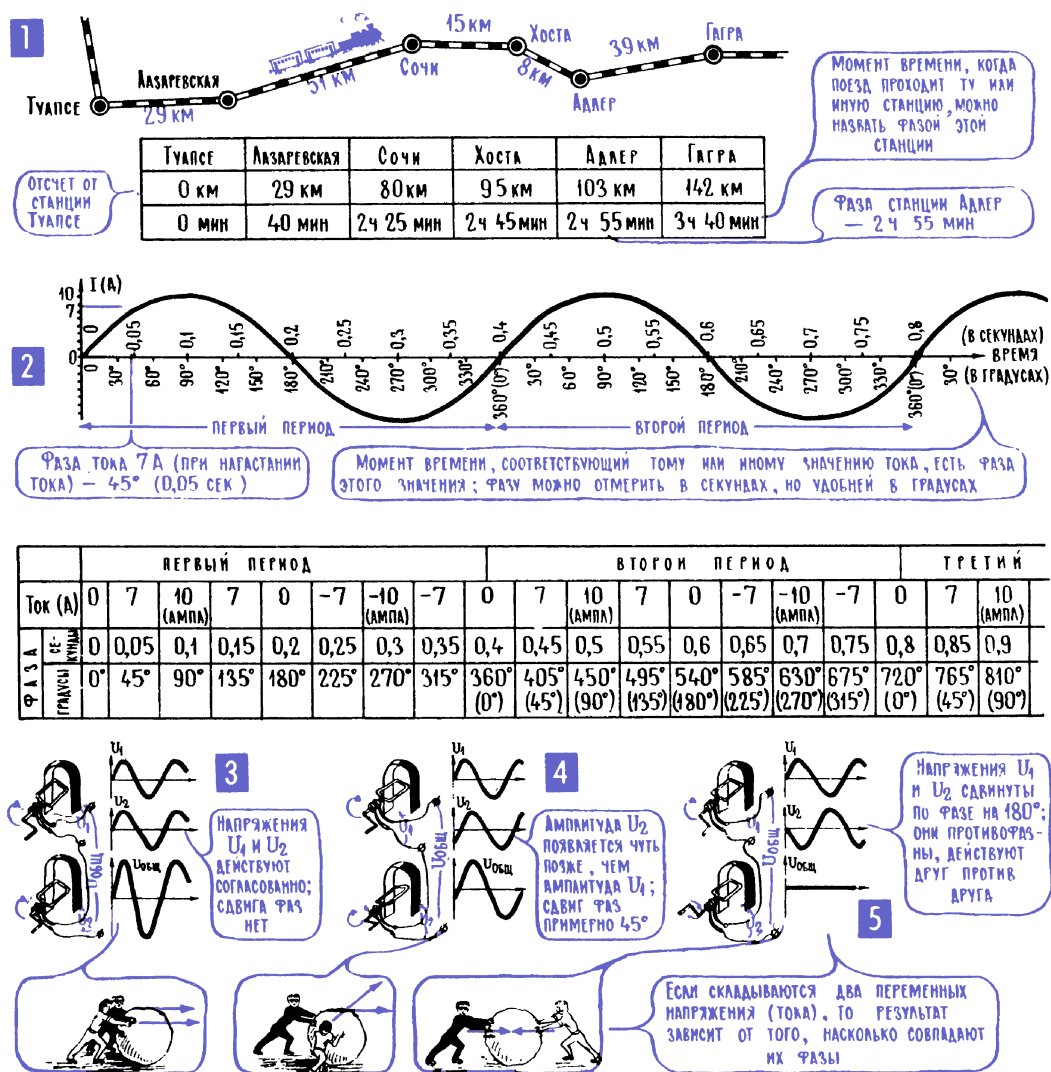


Рис. 6.8. К понятию фазы

9. Активное сопротивление: ток и напряжение совпадают по фазе. Активным называют сопротивление участка, если оно уменьшает ток в цепи, препятствует движению зарядов и одновременно отбирает у них часть мощности. Но разве бывает иначе? Разве может какой-либо элемент цепи препятствовать электрическому току и в то же время не отбирать у него энергию? Оказывается, может. Понятие «активное сопротивление» понадобилось именно потому, что есть, оказывается, элементы электрических цепей, которые оказывают сопротивление току, но мощности при этом не отбирают. О таких элементах говорят, что у них реактивное сопротивление.

События на участке с активным сопротивлением бесспорно подчиняются закону Ома в том виде, в каком он был установлен для постоянного тока (гл. 4; 1, 7). Амплитуда тока, например, равна амплитуде ЭДС, деленной на сопротивление; эффективное напряжение равно эффективному току, умноженному на сопротивление (рис. 6.7), и т. д. Поэтому и максимум тока наблюдается точно в тот же момент, что и максимум напряжения, то есть между током и напряжением нет никакого сдвига фаз (рис. 6.5; 5).

10. Под действием переменного напряжения в цепи конденсатора идет переменный ток. Постоянный ток через конденсатор не проходит – в диэлектрике просто нет свободных зарядов, которые могли бы создавать ток, и включение конденсатора в цепь постоянного тока равносильно разрыву этой цепи. Однако же в момент, когда конденсатор заряжается или разряжается, ток в цепи идет – заряды идут к обкладкам или уходят с них (рис. 4.14). И такое движение зарядов будет происходить в цепи при любом изменении напряжения на конденсаторе. Увеличится напряжение, значит, пойдут на обкладки дополнительные заряды, и на какое-то мгновение появится зарядный ток в цепи. Уменьшится напряжение, и часть зарядов уйдет с обкладок, появится кратковременный разрядный ток, ток обратного направления.

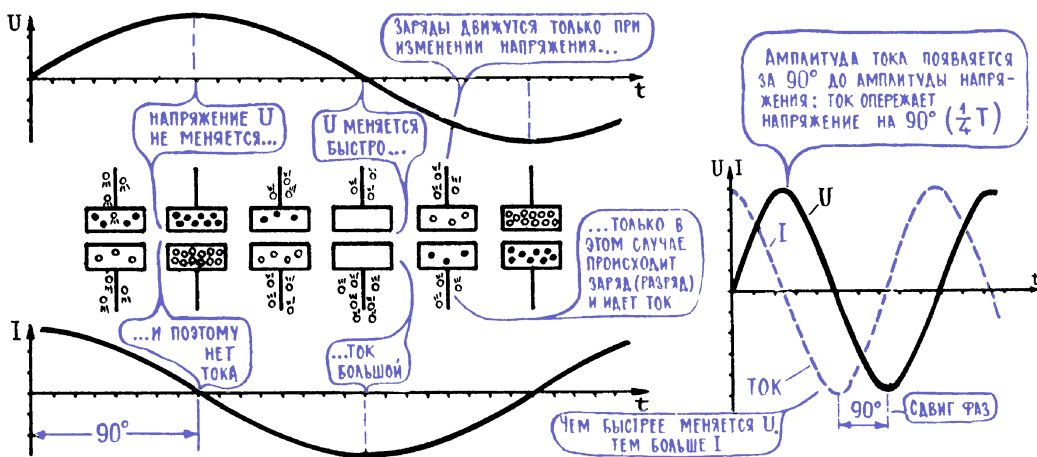


Рис. 6.9. Прохождение переменного тока через конденсатор

Теперь легко представить себе, что произойдет, если подвести к конденсатору переменное напряжение. Поскольку напряжение непрерывно меняется, то конденсатор будет непрерывно заряжаться и разряжаться, а значит, в цепи конденсатора будет непрерывно идти ток. Через диэлектрик заряды, как всегда, не проходят, они лишь двигаются к обкладкам конденсатора (напряжение растет, конденсатор заряжается) или с обкладок

(напряжение падает, конденсатор разряжается), но это движение зарядов как раз и есть ток в цепи конденсатора. На рис. 6.9 показан график такого тока. Как видно по этому рисунку, ток несколько сдвинут по фазе относительно напряжения, и график тока имеет ту же синусоидальную форму, что и само напряжение. То, что все получается именно так, требует некоторых пояснений.

11. Замечательная кривая – синусоида описывает множество самых разных процессов. В мире происходит бесчисленное множество естественных и искусственных процессов, в которых одни какие-нибудь величины зависят от других каких-нибудь величин. Температура звезды зависит от плотности ее вещества, вес зайца – от количества съеденной им травы, скорость автомобиля – от количества сжигаемого бензина, ток в цепи – от ЭДС генератора и т. д. и т. п. Зависимости эти бывают самые разные (рис. 6.10), в том числе и описываемые чрезвычайно сложными уравнениями. Посреди всех возможных зависимостей одной величины от другой особое место занимает та, которую мы называем синусоидальной. Она была открыта очень давно при исследовании некоторых геометрических построений, но потом оказалось, что именно такая синусоидальная зависимость характерна для самых различных природных явлений.

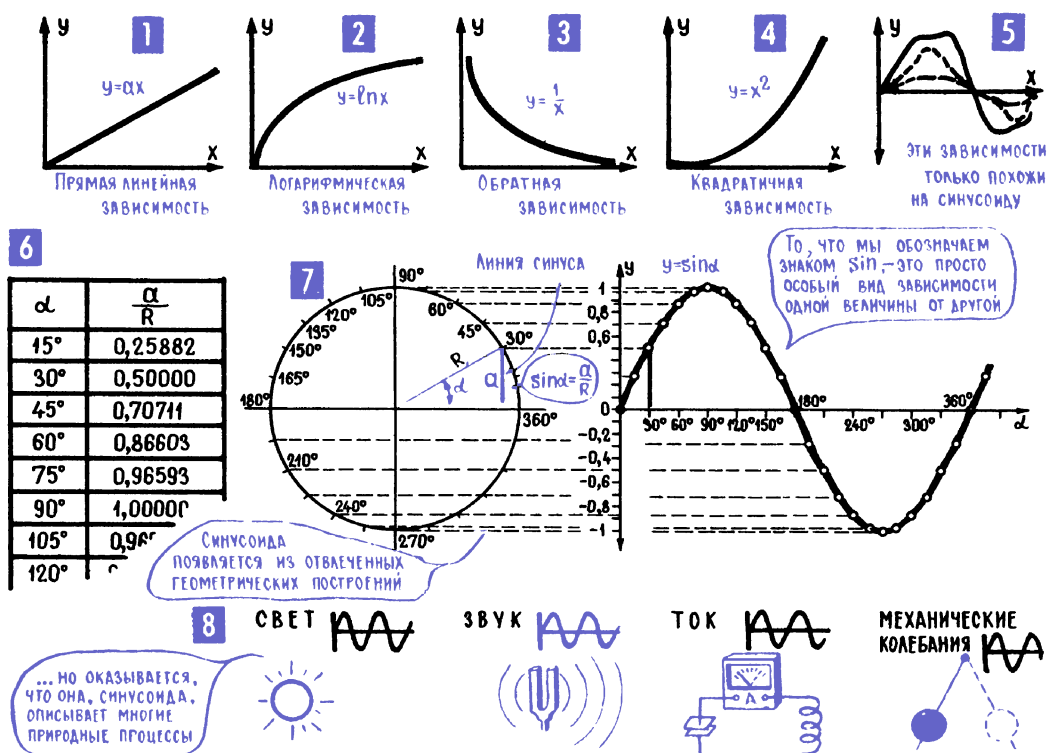


Рис. 6.10. Различные виды зависимостей физических величин

У синусоиды чисто табличное происхождение. Если мобилизовать фантазию, то можно представить себе, как безвестный древний математик нарисовал круг, провел через центр две перпендикулярные оси и, вращая по кругу радиус, стал измерять длину линии a , которую он назвал «линией угла», или, что то же самое, «линией синуса» (рис. 6.0; 7). Свои измерения наш математик свел в таблицу (рис. 6.10; 6), в которой было всего два столбца: угол поворота радиуса α и цифра, показывающая, какую часть от длины радиуса R составляет при данном угле α длина линии синуса a . По этой таблице затем была построена кривая, которую мы и называем синусоидой. Можно, конечно, нарисовать много кривых, похожих на синусоиду (рис. 6.10; 5), но синусоидой называется только одна (рис. 6.10; 7). Именно та, которая в точности соответствует таблице (рис. 6.10; 6).

Примечание редактора. Автор не упоминает о том, что в дальнейшем математиками был найден способ вычисления синусоиды, не привязанный к неточным геометрическим построениям. Способ заключается в вычислении значений ряда Тейлора по формуле $\sin x = x - x^3/3! + x^5/5! - \dots$ (где «!» – знак факториала, а аргумент x измеряется в радианах, связанных с углом в градусах α соотношением $\alpha = x \cdot 180/\pi$). Этот способ позволяет вычислить синус с любой заданной степенью точности и составить по этим вычислениям справочную таблицу. Задача составления подобных таблиц (не только тригонометрических функций – логарифмов, сложных процентов, движения небесных тел и т. п.) была одной из самых сложных и важных для практики вычислительных задач и во многом стала причиной появления автоматической вычислительной техники, сначала механических арифмометров, а затем и компьютеров.

О замечательных особенностях синусоиды, о том, почему она оказалась столь универсальной, можно написать целые тома: по синусоиде меняется энергия звуковой волны, скорость маятника, отклонение колеблющейся струны, ЭДС в проводнике, который вращается в магнитном поле, и происходят тысячи других процессов (рис. 6.10; 8). Но сейчас нас прежде всего интересует одна особенность синусоидальной зависимости, которую трудно заметить, если всмотреться в ее график.

12. Скорость изменения синусоидальной ЭДС (напряжения, тока) также изменяется по синусоидальному закону. В свое время мы обратили особое внимание на то, что в ряде случаев важна не абсолютная величина чего-либо (объема воды, пройденного пути, тока), а скорость ее изменения (гл. 5; 13). Подтверждение этой истины в цепях переменного тока можно встретить на каждом шагу, и поэтому посмотрим, чему, например, равна скорость изменения переменного синусоидального напряжения (рис. 6.11).

Сначала общее замечание: синусоидальное напряжение в разные моменты меняется с разной скоростью. Иногда график его идет круто (напряжение меняется резко, быстро), иногда более полого (напряжение

меняется вяло, сравнительно медленно), иногда идет вверх (напряжение нарастает), иногда вниз (напряжение уменьшается). Это бывает не только у синусоидальных напряжений (рис. 6.11; 1, 2, 3, 4), но важно еще, как именно меняется скорость изменения напряжения.

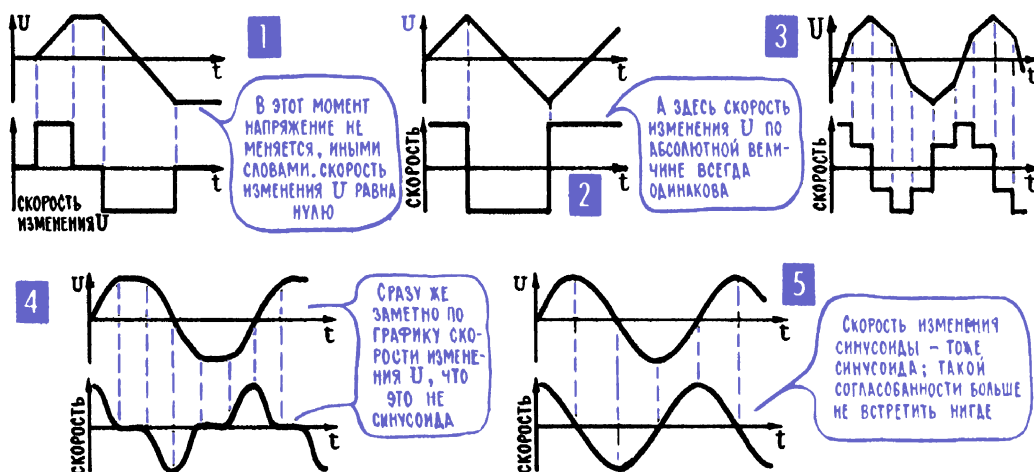


Рис. 6.11. Скорость изменения напряжения разной формы

Начнем с начала периода, когда синусоидальное напряжение (рис. 6.11; 5) только что прошло через ноль и очень быстро нарастает. В этот момент скорость его изменения самая большая; дальше кривая идет все более полого, то есть скорость нарастания напряжения постепенно уменьшается. Наконец, в момент, когда оно достигло амплитуды, скорость его изменения равна нулю – изменение напряжения как бы на мгновение прекратилось, и вслед за этим оно начнет уменьшаться. Отметим этот факт так – будем считать, что скорость нарастания напряжения стала отрицательной. Постепенно напряжение уменьшается все быстрее и быстрее, а значит, скорость его уменьшения (отрицательная скорость) все нарастает. Наконец, скорость достигает максимума (это отрицательная амплитуда скорости) в момент, когда напряжение проходит через ноль и когда меняется его полярность. Перевалив через ноль, напряжение сначала меняется очень резко, но затем, как это уже было в самом начале, скорость его изменения постепенно уменьшается, приближается к нулю. Ноль скорости соответствует отрицательной амплитуде напряжения, а после этого скорость вновь становится положительной – раз отрицательное напряжение уменьшается, то нужно считать, что напряжение нарастет (если на дворе было минус 10 градусов, а стало минус 5, то мы говорим, что потеплело, температура поднялась). Если тщательно проследить за тем, как меняется синусоидальное напряжение, то окажется, что скорость его изменения – это тоже синусоида, но только сдвинутая по отношению к синусоиде само-

го напряжения ровно на 90° (рис. 6.11; 5). Подобное совпадение (скорость изменения синусоиды – тоже синусоида) ни в каких других зависимостях не встретишь. На рис. 6.11 несколько примеров того, как меняется скорость изменения самых разных переменных напряжений, и везде, кроме рис. 6.11; 5, напряжение и скорость его изменения – совершенно разные графики.

То, что мы установили для синусоидального напряжения (его скорость меняется по такому же синусоидальному закону, как и само напряжение), относится к любому другому процессу, график которого – синусоида.

13. Синусоидальное напряжение создает синусоидальный ток через конденсатор; ток опережает напряжение на 90° . Для начала попробуем постепенно менять постоянное напряжение на конденсаторе, подключив его к делителю напряжения. Оказывается, чем резче мы меняем напряжение, тем больше ток. И это вполне объяснимо. Если, например, взять конденсатор емкостью 1 Ф и изменить на нем напряжение на 1 В, то на обкладках накопится лишний кулон зарядов. Если напряжение изменилось на 1 А за 1 с, то этот кулон придет на обкладки за 1 с и в цепи пойдет ток 1 А ($1 \text{ А} = 1 \text{ К за } 1 \text{ с}$). А если увеличить напряжение на 1 В за 10 с, то есть менять напряжение в десять раз медленнее, то и ток будет в десять раз меньше: теперь 1 К зарядов пройдет по цепи за 10 с, то есть за 1 с пройдет 0,1 К. Это как раз и есть ток силой в 0,1 А.

Теперь мы можем подтвердить правильность графиков рис. 6.9. Напряжение, действующее на конденсаторе, все время будет создавать ток в цепи. Потому что напряжение все время меняется, и заряды все время то приходят на обкладки конденсатора, то уходят с них. Наибольший ток будет в те моменты, когда напряжение меняется с максимальной скоростью, то есть когда оно проходит через ноль. Во время амплитуды напряжения ток становится равным нулю: какое-то неувловимое мгновение напряжение как бы не меняется – оно уже перестало расти, но еще не начало уменьшаться. Когда напряжение растет, мы считаем ток положительным, когда напряжение падает, направление тока меняется на обратное, и мы называем это направление отрицательным.

Если к конденсатору подведено синусоидальное напряжение, то скорость его изменения – тоже синусоида, и поэтому в цепи течет синусоидальный ток. Построив график тока, можно убедиться, что между ним и напряжением существует сдвиг фаз 90° (четверть периода), причем ток опережает напряжение. Это не нужно понимать так, будто ток появляется раньше, чем мы прикладываем к конденсатору напряжение; подобное невозможно. Просто амплитуда тока наступает на четверть периода раньше, чем амплитуда напряжения (рис. 6.9).

14. Емкостное сопротивление показывает, как конденсатор влияет на величину тока. Конденсатор никакой мощности от генератора не потребляет. В какие-то моменты, правда, генератор затрачивает усилия на то, чтобы зарядить конденсатор, но конденсатор честно возвращает полученную энергию во время разряда. Этим он очень напоминает пружину, которая что накапливает при сжатии, то и отдает при отпускании.

Однако же конденсатор влияет на величину тока в цепи. Так, в частности, ток в цепи будет тем больше, чем больше емкость конденсатора. Потому что с увеличением емкости возрастает число зарядов, которое может накопиться на обкладках (при том же напряжении), а значит, и число зарядов, циркулирующих в цепи. Иными словами, чем больше емкость, тем при прочих равных условиях больше ток в цепи.

Величина тока, как мы только что установили, зависит еще и от того, с какой скоростью меняется напряжение: чем больше эта скорость, тем больше ток. Ясно, что чем выше частота переменного напряжения, тем быстрее оно меняется, тем, следовательно, больше ток в цепи конденсатора. Или, иными словами, если переменное напряжение с частотой 10 Гц создаст в цепи конденсатора ток 5 мА, то такое же по величине напряжение, но с частотой 100 Гц, создаст в той же цепи ток уже 50 мА.

Чтобы удобнее было учитывать влияние емкости C и частоты f на ток, их сводят в единую величину и называют ее емкостным сопротивлением X_C (рис. 6.12). И, пользуясь этим сопротивлением, для цепи переменного тока с конденсатором получают стандартные формулы закона Ома, такие же удобные, как и для цепи с резисторами.

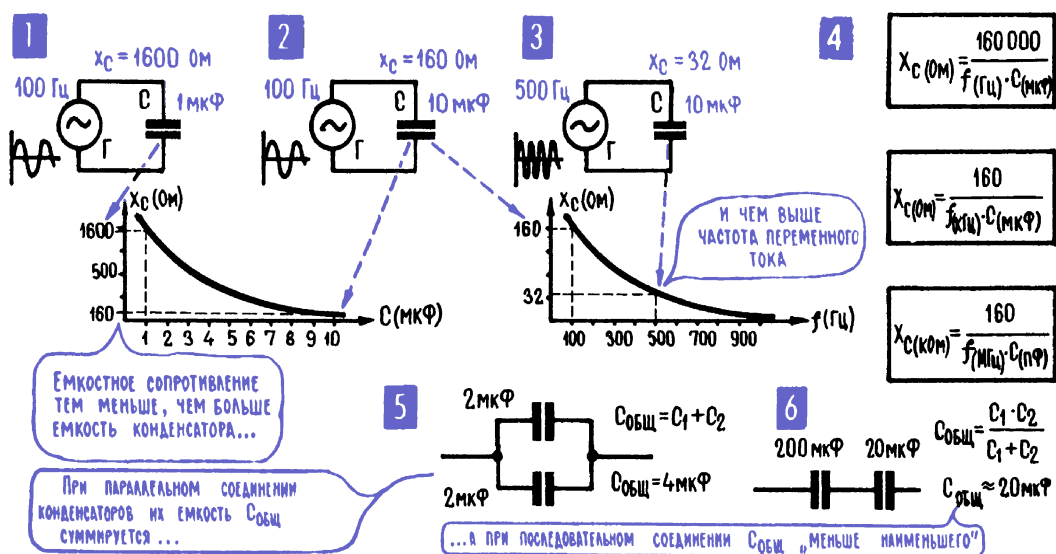


Рис. 6.12. Емкостное сопротивление X_C в цепи переменного тока

15. Синусоидальный ток в катушке индуктивности отстает от синусоидального напряжения на ней на 90° . Тот факт, что по катушке индуктивности пойдет переменный ток, если подвести к ней переменное напряжение, не вызывает никаких сомнений: катушка намотана проводом, а ток идет по любому проводнику. Однако то, что в этом случае происходит в цепи катушки, определяется не только сопротивлением проводника, из которого эта катушка изготовлена.

Вспомните, если в катушке меняется ток, на ней наводится ЭДС самоиндукции, которая тем больше, чем выше скорость изменения тока (гл. 5; 11). А это значит, что в катушке, по которой идет синусоидальный ток, наводится синусоидальная ЭДС самоиндукции: скорость изменения синусоидального тока тоже меняется по синусоидальному закону. Но ЭДС самоиндукции всегда препятствует изменениям тока, и есть только одна сила, которая может противодействовать этой мешающей ЭДС поддерживать переменный ток в цепи. Эта сила – внешнее напряжение, которое действует на катушке, то есть часть ЭДС, которая достанется этой катушке от генератора. Чтобы компенсировать ЭДС самоиндукции, внешнее напряжение должно бить по ней в противофазе, то есть со сдвигом на 180° , на полпериода. Построив графики всех трех «героев» этого сражения, легко убедиться, что ток в катушке отстает от напряжения на ней на 90° (рис. 6.13; 7).

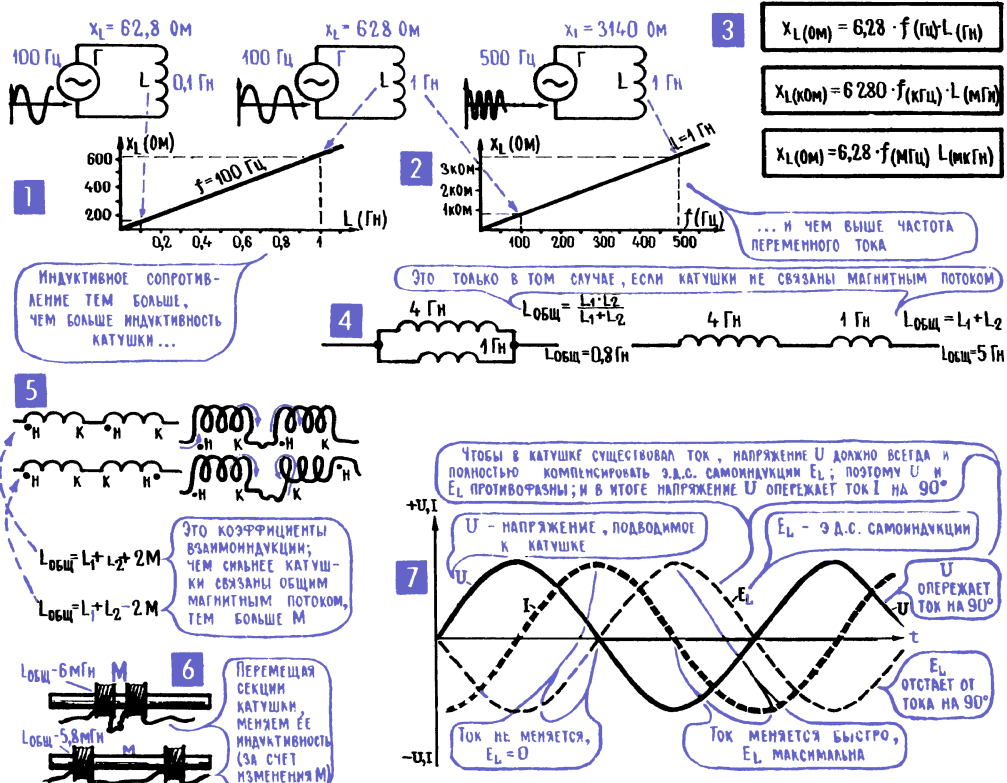


Рис. 6.13. Индуктивное сопротивление X_L в цепи переменного тока

16. Индуктивное сопротивление показывает, как катушка влияет на величину тока. Теперь о соотношении между током и напряжением. Это соотношение автоматически устанавливается таким образом, чтобы мешающая току ЭДС самоиндукции в точности уравнивалась бы напряжением на катушке. С подобным автоматизмом мы уже встречались: постоянное напряжение на последовательных резисторах автоматически распределялось так, чтобы ток во всей цепи был одинаковым (гл. 4; 7, 10). Вот пример работы «автоматики» в катушке, по которой идет переменный ток. Допустим, что в какой-то момент вышла из повиновения и сама по себе увеличилась в два раза амплитуда тока. При этом, конечно, увеличится и скорость его возрастания: если, например, раньше за 1 с ток нарастал до амплитуды 1 А, то теперь он будет за ту же секунду нарастать до 2 А, то есть скорость нарастания тока будет в два раза больше. А значит, возрастет ЭДС самоиндукции и, мешая току, уменьшит его.

Посмотрим, что случится, если мы увеличим частоту переменного тока, не меняя напряжения, которое подводится к катушке. В этом случае увеличится скорость изменения тока (чем выше частота, тем быстрее меняется ток), а значит, увеличится связанная с ней мешающая ЭДС. И тут же автоматически уменьшится ток в цепи, а вместе с ним и ЭДС самоиндукции. Причем уменьшатся они именно настолько, чтобы внешнее напряжение могло беспрепятственно двигать по цепи заряды, создавать ток. (Это чем-то напоминает грузовик, который сам меняет свою скорость в зависимости от рельефа дороги.)

То же самое произойдет, если увеличить индуктивность катушки – и в этом случае ток автоматически уменьшится и потянет за собой мешающую ЭДС самоиндукции, не позволяя ей одолеть внешнее напряжение. Одним словом, и увеличение частоты, и увеличение индуктивности влечет за собой уменьшение тока в катушке или, при неизменном токе, увеличение напряжения на ней. Это позволяет объединить частоту и индуктивность в общей характеристике – индуктивном сопротивлении x_L – и получить с его помощью простые формулы закона Ома (рис. 6.16; 2).

Кстати, катушка, если пренебречь сопротивлением ее проводов, так же, как и конденсатор, оказывается не активным, а реактивным элементом цепи. Индуктивное сопротивление x_L так же, как емкостное x_C , влияет на величину тока, но мощности от генератора не потребляет. Все, что в какие-то моменты катушка отбирает у него на создание магнитного поля, она отдает генератору обратно, когда это поле исчезает.

17. С помощью конденсаторов и катушек можно создавать фильтры – цепи, которые по-разному пропускают токи разных частот. Сопротивление реактивных элементов – конденсатора и катушки – зависит от частоты. Эта их особенность может оказаться весьма нежелательной в тех случаях, когда по цепи с конденсатором и катушкой идут

переменные токи разных частот и нужно создать для всех этих токов равные условия. Когда нужно, никому не отдавая предпочтения, одинаково хорошо или одинаково плохо – главное, одинаково! – пропускать по цепи токи любых частот, конденсатор или катушка, разумеется, мешают этому равноправию. По-разному сопротивляясь токам разных частот, конденсатор или катушка в разной степени будут ослаблять эти токи (рис. 6.14; 2, 3).

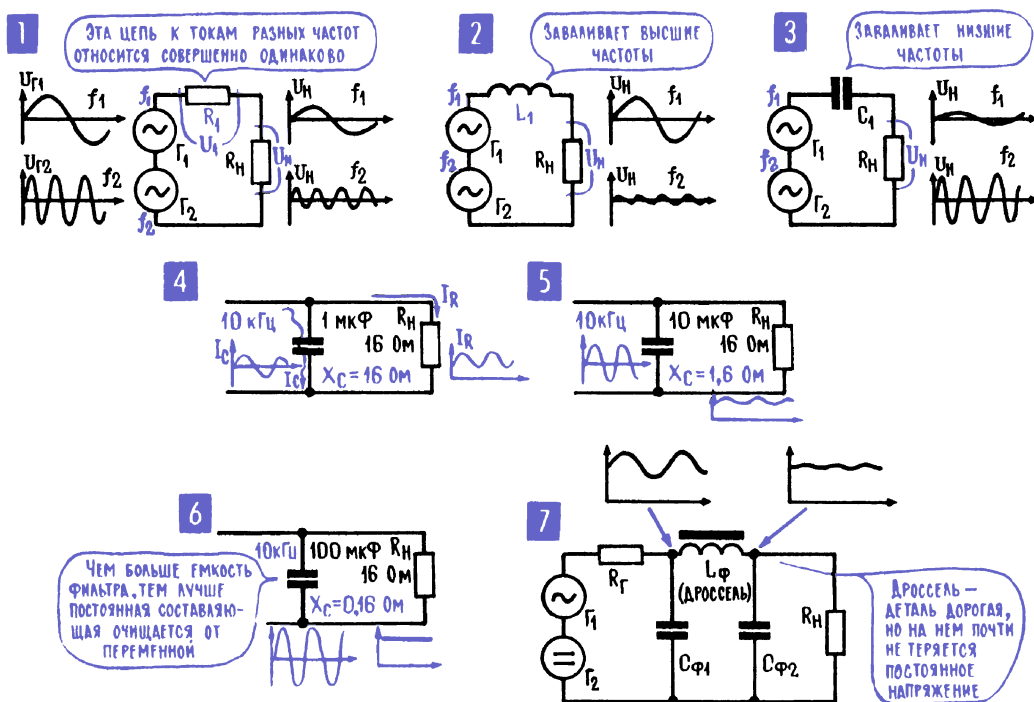


Рис. 6.14. Фильтры

Реактивные элементы незаменимы, когда нужно разделить токи разных частот, протекающие в общей цепи. Например, когда некоторые из них нужно пропустить в нагрузку легко, а другим вообще преградить путь в нее, пустить их по другому пути. Только у реактивных элементов развито «чувство частоты», только конденсатор и катушка могут разделить токи разных частот, одни из них пропуская легко, другим оказывая большое сопротивление.

Цепи, в которых происходит сортировка и разделение токов разных частот, называются фильтрами. Обычно это не очень большие цепи, чаще всего они состоят из двух-трех элементов, в числе которых обязательно конденсатор или катушка или оба реактивных элемента одновременно. Фильтры чрезвычайно широко используются в электронных устройствах. Точной статистики, конечно, никто не делал, но, по-видимому, половина

всех элементов электронных схем работает в фильтрах на своей основной работе или по совместительству². Схемы фильтров очень разнообразны, но в них всегда используются одни и те же принципы, которые можно хорошо увидеть на простейших примерах.

Фильтры бывают параллельные и последовательные. Примеры последовательных фильтров – на рис. 6.14; 2, 3. Эта группа фильтров – фактически делители напряжения, отдельные участки которых имеют разное сопротивление на разных частотах. Поэтому разные (по частоте) токи создают на этих участках разные напряжения. Или иначе – фильтр-делитель в разной пропорции делит подведенные к нему напряжения разных частот.

Пример простейшего параллельного RC-фильтра – на рис. 6.14; 4, 5, 6. Здесь происходит отделение переменного тока от постоянного: постоянный ток через C_Φ не пойдет, у него есть только один путь – через R_n . Если на данной частоте f (частота переменного тока) емкостное сопротивление x_C конденсатора C_Φ было во много раз меньше, чем R_n (рис. 6.14; 5, 6). Тогда переменный ток в основном пойдет по пути наименьшего сопротивления, то есть через C_Φ , а через R_n пойдет чистый (точнее, почти чистый) постоянный ток.

Чтобы получить нужное x_C на данной частоте, достаточно подобрать емкость конденсатора с помощью простых расчетных формул (рис. 6.12; 4). Эти формулы еще раз напоминают, что величину x_C на равных определяют и емкость C , и частота f , поэтому для получения одного и того же x_C на низких частотах емкость должна быть значительно больше, чем на высоких.

Пример более сложного двухзвенного RLC-фильтра показан на рис. 6.14; 7. Первое звено здесь образовано выходным сопротивлением генератора R_r и конденсатором $C_{\Phi 1}$, второе – дросселем L_Φ и вторым конденсатором $C_{\Phi 2}$. Катушку, применяемую в подобном фильтре, часто называют дросселем (что можно перевести на русский как «глушитель») – она дополнительно ослабляет переменный ток. Перед вами схема обычного фильтра постоянного напряжения, устанавливаемого на выходе источников питания, особенно импульсных, в которых на выходе присутствует высокая частота. Одним конденсатором (как на рис. 6.14; 4, 5, 6) бывает не обойтись – при увеличении емкости C_Φ сверх некоторого значения уровень переменного напряжения, проникающего на выход, перестает падать из-за неидеальности компонентов. Двухзвенный фильтр с индуктивностью обычно решает проблему.

В старой радиоэлектронной аппаратуре очень часто можно было встретить особый LC-фильтр, так называемый колебательный контур. Но прежде-

² Конечно, это относится только к той части электроники, которая оперирует с аналоговыми сигналами, – звуковым устройствам, радиопередатчикам/приемникам, модемам разного рода и пр. В цифровой электронике фильтров гораздо меньше, но это не значит, что их нет вовсе – как минимум, емкостный фильтр, предотвращающий импульсные помехи по шинам питания, обязательно присутствует в любой схеме.

де, чем знакомиться с ним, нужно сказать несколько слов о том, как с помощью графиков описывают основные «черты характера» электрического фильтра.

18. Частотная характеристика – график, рассказывающий о том, как ведет себя электрическая цепь на разных частотах. Представим себе, что в нашем распоряжении есть генератор переменной ЭДС, частоту которой можно плавно изменять поворотом ручки. Так же, например, как поворотом ручки мы меняем громкость звучания в приемнике. Такие генераторы реально существуют, и вскоре мы познакомимся с их практическими схемами (см. гл. 11). А пока представьте себе, что это обычный машинный генератор, в котором можно менять скорость вращения проводника, а значит, и частоту генерируемой ЭДС. При этом, правда, появляется серьезный недостаток: чем быстрее вращается проводник, тем больше частота переменной ЭДС, но одновременно увеличивается и сама ЭДС, так как проводник быстрее пересекает магнитное поле. Предположим, что этот недостаток устранен – в генератор ввели автомат, который будет поддерживать выходное напряжение на одном уровне, например включая в цепь дополнительные сопротивления. Но не стоит, однако, вдаваться в подробности, они сейчас несущественны. Считаем, что у нас есть генератор (рис. 6.15; 1), который дает синусоидальное напряжение любой нужной частоты, и на всех частотах сама величина напряжения (число вольт) одинакова.

Если подключить к нашему генератору делитель из резисторов (рис. 6.15; 2), то на любом из них напряжение не будет меняться с частотой: на всех частотах резисторы имеют одно и то же сопротивление и делят общее напряжение в одной и той же пропорции.

А вот в делителях, куда входят реактивные элементы – конденсаторы и катушка, – все по-другому. Об этом как раз и рассказывают графики рис. 6.15; 3, 4. Графики эти называются частотными характеристиками, они показывают, как с изменением частоты меняется напряжение на выходе фильтра при неизменном напряжении на его входе. В справедливости приведенных частотных характеристик легко убедиться, если взглянуть на схемы фильтров, к которым эти характеристики относятся. Так, например, в простейшем RC-фильтре с частотой уменьшается напряжение на конденсаторе C , потому что уменьшается его емкостное сопротивление. И если нужно «задавить» высшие частоты, или, иначе, поднять низшие, напряжение следует снимать именно с конденсатора. А на резисторе R с увеличением частоты напряжение, наоборот, растет. Общее напряжение делится на U_R и U_C , чем меньше одно из них, тем больше другое. И если нужно выделить более высокочастотные напряжения, если нужно поднять высшие частоты над другими, напряжение нужно снимать именно с резистора.

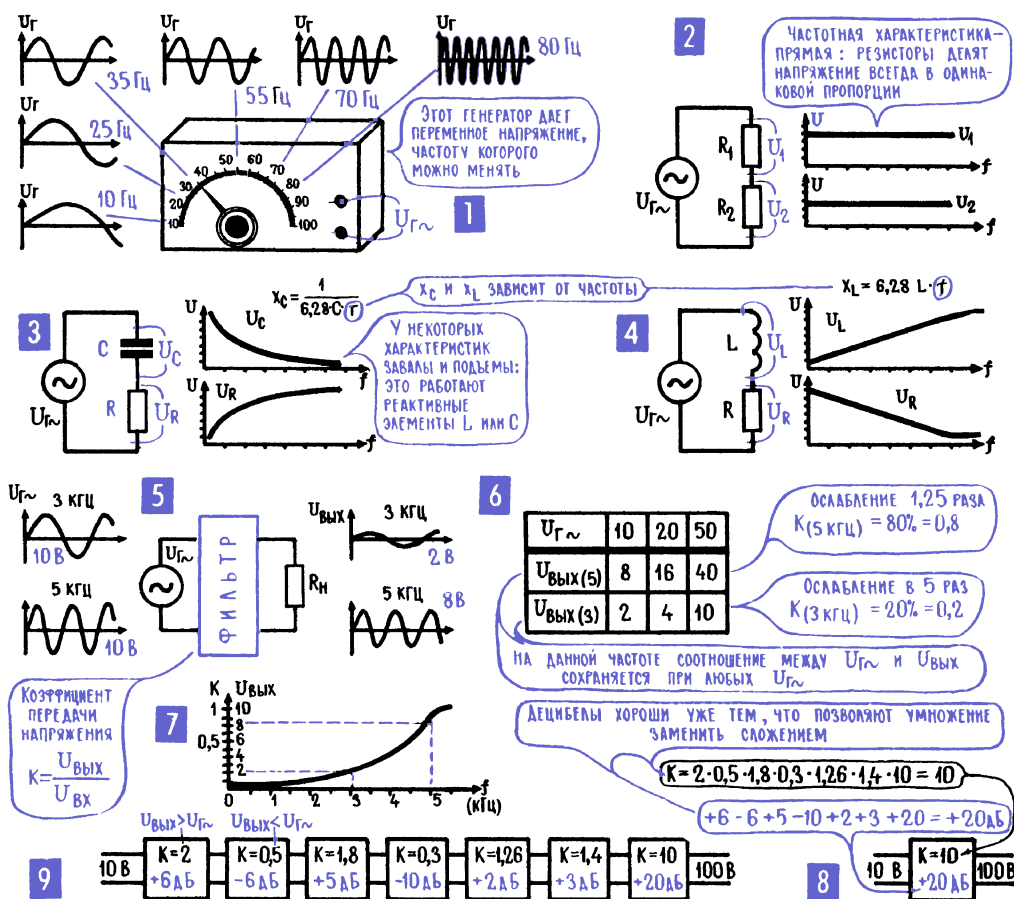


Рис. 6.15. Частотные характеристики

19. Коэффициент передачи K показывает, во сколько раз напряжение или ток на выходе больше или меньше, чем на входе. Все графики на рис. 6.15 могут быть построены для конкретных величин напряжений и токов. Не вдаваясь в устройство какого-либо фильтра, нарисуем его в виде прямоугольничка (рис. 6.15; 5) и для определенности будем считать, что при входном напряжении $U_{\text{Г}} = 10 \text{ В}$ выходные напряжения на частотах 3 кГц и 5 кГц соответственно равны 2 В и 8 В. А что будет, если входное напряжение увеличится вдвое и составит 20 В? Тогда и выходные напряжения тоже увеличатся в два раза и составят соответственно 4 В и 16 В (рис. 6.15; 6). Без долгих рассуждений можно сказать, что любое увеличение или уменьшение входного напряжения повлечет за собой такое же (во столько же раз) увеличение или уменьшение выходных напряжений. И для данного конкретного фильтра на данных частотах соотношение между входным напряжением и выходными есть величина постоянная.

Но стоит ли в таком случае характеризовать действие фильтра численными значениями напряжений и токов, вольтами и амперами? Не лучше ли ввести общую характеристику фильтра, которая показывала бы, на каких частотах во сколько раз ослабляется переменное напряжение или переменный ток? Тогда, зная эту характеристику, можно всегда подсчитать, какое напряжение будет на выходе фильтра при данном напряжении на его входе, еще раз, кстати, подтвердив полезность общих представлений. Такая характеристика существует, она называется коэффициентом передачи фильтра и обозначается чаще всего буквой K (рис. 6.15; 5, 6). На каждой частоте у фильтра свой коэффициент передачи K , в этом, собственно, и состоит особенность фильтрующих цепей. Зависимость коэффициента передачи K от частоты есть одна из разновидностей частотной характеристики.

20. Децибел – универсальная единица, показывающая, во сколько раз одна величина больше или меньше другой. В каких единицах нужно измерять коэффициент передачи? Вполне подошла бы для этого единица «раз» или хорошо известные проценты. Ведь мы так и говорим: «На частоте 3 кГц напряжение ослабляется в пять раз... на частоте 5 кГц – в 1,25 раза...» Однако чаще используется не «раз», а другая единица – децибел, сокращенно дБ. Она названа так по имени изобретателя телефона Александра Белла. Децибел – единица универсальная, она применяется для того, чтобы показать отношение любых двух величин – напряжений, токов, давлений, мощностей, скоростей и других. Переход от характеристики «во столько-то раз» к децибелам и обратно проще всего произвести с помощью табл. 6.1. Если коэффициент передачи меньше единицы, то есть если фильтр или другой элемент цепи уменьшает напряжение (ток), то децибелы получаются отрицательные. А если коэффициент передачи больше единицы, то есть если выходное напряжение (ток) больше входного (так тоже бывает, и вы очень скоро в этом убедитесь), то децибелы – положительные.

Таблица 6.1. Децибелы

дБ	1	2	3	6	10	20	30	40	50	60
U/U	1,112	1,26	1,41	2	3,16	10	31,6	100	316	1000
P/P	1,26	1,58	2	4	10	100	1000	10^4	10^5	10^6

Особо нужно сказать о нижней строке табл. 6.1, в которой указано отношение мощностей, соответствующее тому или иному числу децибел. Мы хорошо знаем, что между мощностью и током и между мощностью и напряжением существует квадратичная зависимость. То есть если увели-

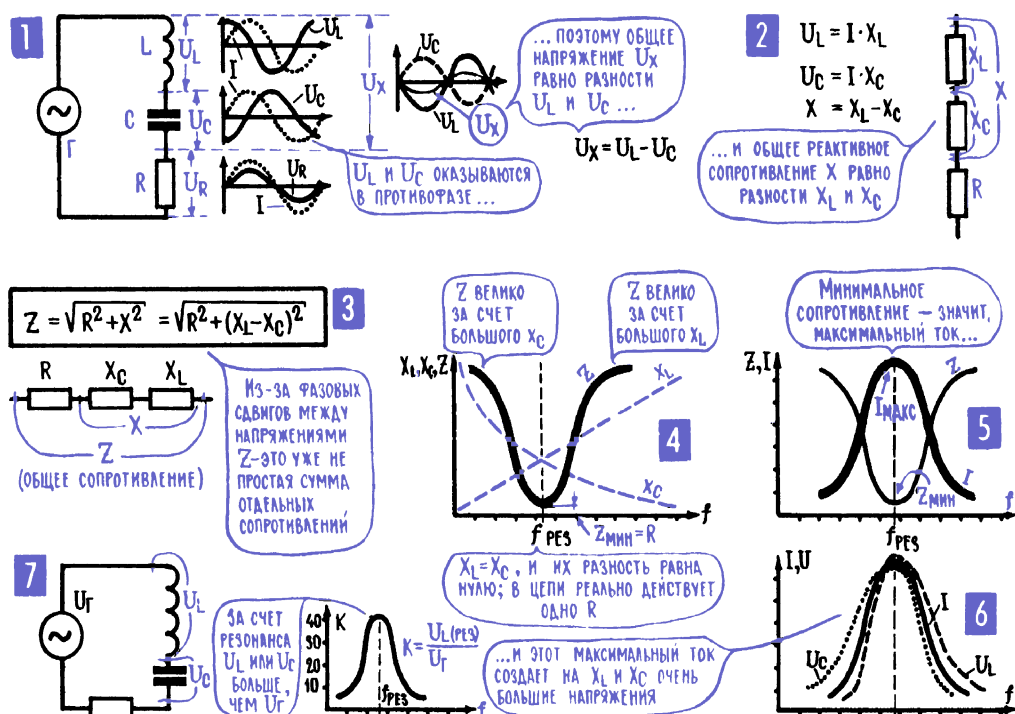
чить напряжение или ток на каком-то участке цепи в два раза, мощность возрастет в четыре раза (гл. 4; 11). Эта зависимость как раз и находит отражение в таблице: во сколько бы раз ни изменилось напряжение (ток), мощность изменится в то же число раз, возведенное в квадрат.

Децибел – единица логарифмическая, и с этим связаны ее многие достоинства. Так, например, если вы знаете, что переменное напряжение подается на один фильтр и ослабляется на 20 дБ, а затем поступает на другой фильтр и там ослабляется еще на 30 дБ, то общее ослабление подсчитывается как сумма $(-20) + (-30) = -50$ дБ. По таблице легко определить, что напряжение в этом случае ослабляется в 316 раз.

Другой пример. На частоте 10 Гц коэффициент передачи фильтра K_{10} равен -60 дБ (выходное напряжение составляет 0,001 от входного, или, иначе, фильтр ослабляет напряжение на этой частоте в 1000 раз), а на частоте 500 Гц фильтр ослабляет напряжение уже всего в 10 раз, то есть коэффициент передачи $K_{500} = -20$ дБ. Если вы хотите узнать, насколько эффективно действует фильтр, насколько на его выходе напряжение с частотой 10 Гц будет меньше, чем напряжение с частотой 500 Гц, нужно найти разность децибелов для K_{10} и K_{500} . Эта разность равна $(-60) - (-20) = -40$ дБ, и по таблице определяем, что на выходе фильтра одно из напряжений будет меньше другого в 100 раз (оно составит 1 % исходного).

Оценка коэффициента передачи в децибелах введена нами с далеким прицелом. В дальнейшем мы еще будем пользоваться децибелами и привыкнем к ним, как привыкли к метрам или килограммам. А пока вернемся к схемам фильтров и рассмотрим, каким же образом колебательный контур (LC-фильтр) оказывает наибольшее благоприятствование одной определенной частоте.

21. В последовательной LCR-цепи индуктивное сопротивление действует против емкостного. Для начала извлечем из памяти три уже установленные истины. Первая: во всех элементах последовательной цепи течет один и тот же ток (гл. 4; 6). Вторая: ток через конденсатор опережает напряжение на 90° (гл. 6; 13); об этом можно сказать и иначе – напряжение на конденсаторе отстает от тока на 90° . Третья: ток через катушку отстает от напряжения на ней на 90° (гл. 6; 15); об этом тоже можно сказать иначе: напряжение на катушке опережает ток в ней на 90° . Если, обогащенные этими воспоминаниями, мы взглянем на последовательную цепь LCR (рис. 6.16; 1), то увидим, что напряжение U_L на катушке и напряжение U_C на конденсаторе сдвинуты по фазе на 180° . То есть они действуют друг против друга. Напряжения U_L и U_C зависят от соответствующих реактивных сопротивлений x_L и x_C . А поскольку по всем элементам проходит один и тот же ток I , то соотношение между напряжением U_L и U_C зависит только от соотношения между сопротивлениями x_L и x_C .



22. На резонансной частоте резко падает общее сопротивление последовательной LCR-цепи, и ток в ней возрастает. Попробуем подключить к последовательной LCR-цепи генератор с изменяемой частотой (рис. 6.15; 1) и будем постепенно увеличивать частоту его переменного напряжения. При этом индуктивное сопротивление будет постепенно увеличиваться, а емкостное — постепенно уменьшаться (рис. 6.16; 4). На какой-то частоте — давайте сразу же назовем ее резонансной частотой — сопротивления x_L и x_C станут равными, и, значит, уравниваются напряжения U_L и U_C . А так как эти напряжения противофазны, то они полностью скомпенсируют друг друга, и генератор вообще перестанет чувствовать присутствие реактивных элементов, перестанет отдавать им часть своей ЭДС. Общее сопротивление цепи Z резко уменьшится, для генератора из всей цепи останется только одно активное сопротивление R , ток I из-за этого резко возрастет (рис. 6.16; 5), и столь же резко увеличатся напряжения U_L и U_C (рис. 6.16; 6). Но заметьте, увеличится каждое в отдельности, а общее суммарное напряжение на обоих реактивных элементах U_X , как уже говорилось, будет равно нулю.

Весь этот процесс называется последовательным резонансом, или резонансом напряжений. Если после резонанса продолжать увеличивать частоту, то x_L станет больше, чем x_C , и в цепи в основном начнет действовать индуктивное сопротивление. Ток уменьшится, а вместе с ним уменьшатся и напряжения U_L и U_C .

Как видите, в последовательном контуре на особом положении оказывается только резонансная частота $f_{\text{рез}}$. Именно на этой частоте резко возрастает ток, возрастают напряжения на отдельных элементах. А это как раз и означает, что последовательный контур из всех переменных токов особо выделяет ток одной определенной частоты.

23. На резонансной частоте сопротивление параллельного контура резко возрастает. В самом упрощенном виде параллельный LC-контур можно рассматривать как цепь, состоящую из двух параллельно соединенных сопротивлений x_L и x_C (рис. 6.17). На низших частотах сопротивление x_L мало и катушка шунтирует конденсатор. На высших частотах мало сопротивление x_C и конденсатор шунтирует катушку. И лишь на резонансной частоте никто никого не шунтирует и общее сопротивление параллельного контура оказывается весьма большим. При этом, естественно, уменьшается общий ток в цепи генератора (рис. 6.17; 3) – это вполне согласуется с законом Ома. И еще одна интересная деталь: если включить параллельный контур в делитель напряжения (рис. 6.17; 4), то этот контур за счет своего большого сопротивления на резонансной частоте будет выделять только напряжение этой частоты из всех напряжений, подводимых к делителю.

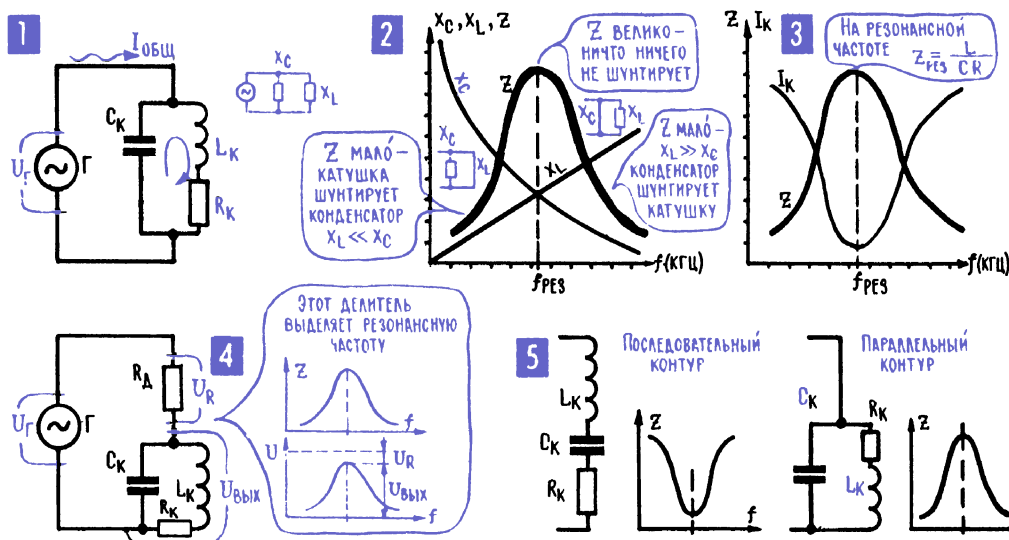


Рис. 6.17. Параллельный LC-контур

24. Подбором индуктивности (емкости) меняем резонансную частоту. Почему резонанс наблюдается именно на такой частоте, а не на другой? Почему резонансная частота не выше или не ниже? И можно ли как-либо влиять на эту частоту, можно ли сделать так, чтобы контур выбирал не тот

ток, какой ему захочется, а тот, который нам нужен? Чтобы кратчайшим путем добраться до ответов на эти вопросы, проведем маленький эксперимент. Изменяя частоту, доведем контур до резонанса (рис. 6.18; 2) и для определенности предположим, что этот резонанс наблюдается на частоте 200 кГц. Теперь возьмем и уменьшим индуктивность катушки L_k . Из-за уменьшения L_k уменьшится индуктивное сопротивление x_L и тут же нарушится равенство $x_L = x_C$. А значит, нарушится равенство $U_L = U_C$ и никакого резонанса в цепи уже не будет. Чтобы восстановить резонанс, нужно постепенно увеличивать частоту переменного напряжения, которое поступает с генератора. С увеличением частоты начнет расти x_L , уменьшаться x_C и на какой-то частоте они вновь уравниваются, в цепи снова наступит резонанс.

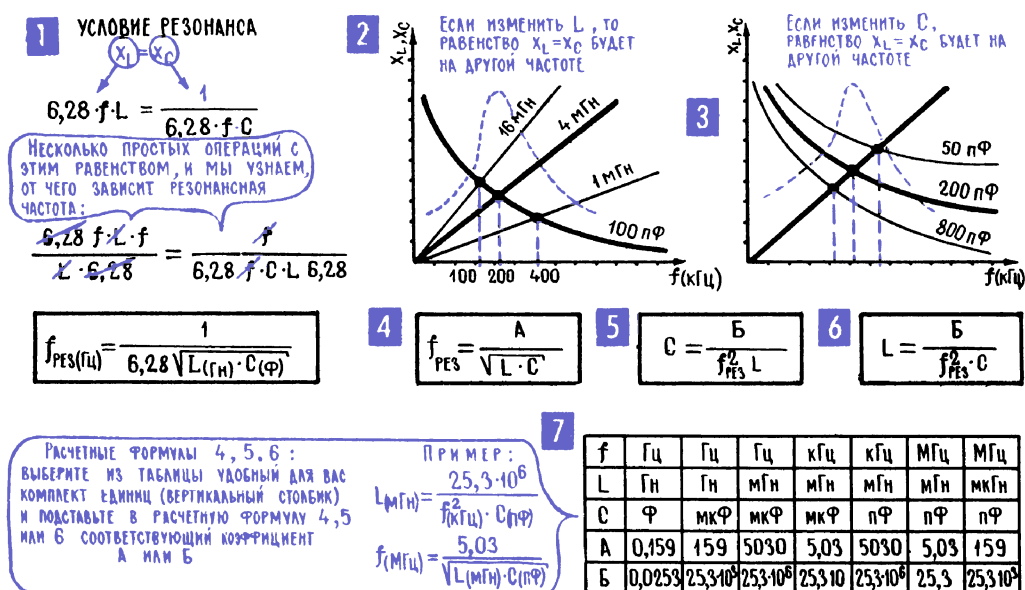


Рис. 6.18. Расчет колебательного контура

Такой же точно результат получится, если уменьшить не индуктивность L , а емкость C контура (рис. 6.18; 3). Или если одновременно уменьшать индуктивность L и емкость C . В этих случаях резонанс тоже будет наблюдаться на более высокой частоте.

Вывод из этих экспериментов такой: частота $f_{\text{рез}}$, на которой наблюдается резонанс, определяется параметрами самой LC-цепи. С уменьшением L и C резонансная частота повышается, с увеличением L и C резонансная частота понижается (рис. 6.18 и 6.19). На рис. 6.18; 1 показано, как, исходя из условия резонанса $x_L = x_C$, можно путем простейших преобразований получить точную формулу для $f_{\text{рез}}$, а на рис. 6.18; 4, 5, 6 приведены удобные расчетные формулы, с помощью которых можно найти $f_{\text{рез}}$ при известных L и C или подобрать L и C , чтобы получить резонанс на нужной частоте.

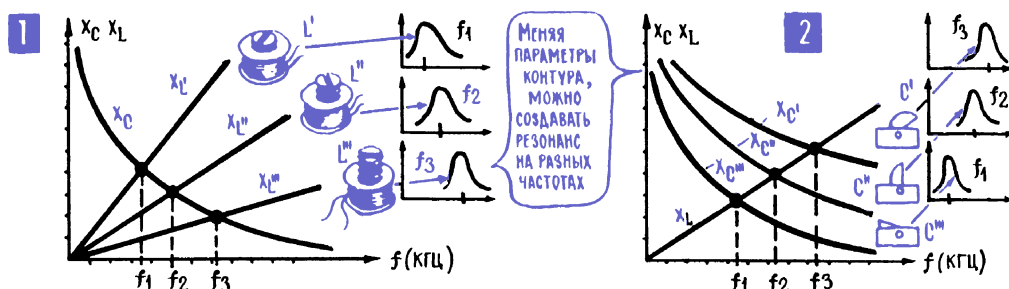


Рис. 6.19. Расчет колебательного контура (продолжение)

То, что мы узнали о резонансном фильтре – колебательном контуре, – это лишь небольшая часть важных сведений о нем. Хорошо бы, например, еще узнать, от чего зависит высота резонансной кривой, почему некоторые контуры резко увеличивают ток на резонансной частоте, а другие повышают его лишь в небольшой степени. Или другой вопрос – отчего зависит ширина резонансной кривой, чем определяется полоса частот, близких к $f_{\text{рез}}$, на которых хотя и не в полной мере, но все же заметны резонансные явления? И еще: одну и ту же резонансную частоту можно получить при разных соотношениях L и C , если, например, в два раза увеличить индуктивность контура и в два раза уменьшить его емкость, то резонансная частота не изменится.

Подводя предварительный итог знакомства с резонансным фильтром, с контуром, сформулируем главные его особенности. Во-первых, из многих переменных токов с разными частотами контур умеет выбирать ток определенной частоты; во-вторых, изменяя L или C контура, можно добиться, чтобы из сложного аккорда извлекался ток (напряжение) нужной нам частоты (рис. 6.19).

Примечание редактора. Колебательный LC-контур в течение многих десятилетий, с возникновения первых радиостанций в начале XX века и до окончательной победы интегральной микроэлектроники в 1980–1990-е годы, был одним из важнейших узлов электронной аппаратуры – в любом радиоприемнике или телевизоре можно было найти не один колебательный контур, часто с переменным конденсатором (рис. 6.19; 2) или катушкой с подстраиваемым сердечником. Однако реальные катушки индуктивности гораздо дальше от идеального чисто индуктивного сопротивления, чем конденсаторы – от идеального емкостного, а резисторы – от идеального активного (резистивного). Намотать катушку индуктивности так, чтобы свести к достаточному минимуму паразитную межвитковую емкость и активное сопротивление провода, в малых габаритах не получается. К тому же процесс намотки катушек (особенно с замкнутым сердечником) крайне нетехнологичен и плохо совместим с современными автоматизированными линиями.

По всем этим причинам в современных радиочастотных устройствах вместо этого дорогого, габаритного и сложного в настройке компонента чаще всего используются аналогичные по свойствам узлы схем в интегральном исполнении. Это могут быть программные фильтры на цифровых сигнальных процессорах (DSP), различ-

ные конструкции пьезоэлектрических и магнитострикционных фильтров, акустоэлектронные фильтры на поверхностных акустических волнах и пр. – все эти разновидности гораздо проще реализуются в микроэлектронном исполнении и к тому же обладают лучшими свойствами с точки зрения целевого назначения: более стабильны и не требуют ручной подстройки.

Вы можете иногда встречать индуктивности в простейших радиочастотных применениях (например, в дешевых приемниках импульсного сигнала на фиксированной частоте), однако и там их применение ныне очень ограничено. Возможно, единственная область, где традиционные катушки индуктивности (дрессели) остаются незаменимыми, – фильтрация выходного напряжения современных импульсных источников питания от высокой частоты, на которой производится преобразование (рис. 6.14; 7). Кроме того, их очень часто ставят в качестве фильтров питания в схемах, где мощные компоненты работают на высокой частоте, чтобы предотвратить ее действие на другие компоненты или проникновение во внешнюю сеть: разберите обычную микроволновку, и вы найдете там несколько дросселей с сердечниками из ферромагнитной керамики – феррита.

Поговорим теперь о еще одном распространенном применении катушек индуктивности.

25. Трансформатор увеличивает напряжение (ток), ни в коем случае, однако, не увеличивая мощность. Используя явление взаимоиндукции, можно передавать электрическую энергию из одной цепи в другую без непосредственного контакта между ними. Устройство, которое осуществляет такую передачу, – это и есть трансформатор (в переводе – «преобразователь»).

В простейшем случае трансформатор – это две обмотки, связанные общим магнитным потоком Φ (рис. 6.20). В принципе, магнитный поток может замыкаться по воздуху (рис. 6.20; 1, 2, 7), но обычно сердечники трансформатора замкнутые: стержневой (рис. 6.20; 3, 4), кольцевой (рис. 6.20; 5) или наиболее распространенный броневой («Ш-образный») (рис. 6.20; 6). В трансформаторах часто бывает несколько обмоток (рис. 6.20; 7).

Коротко о сердечниках. Сердечники делают из электротехнической стали, а иногда из сплава пермаллоя, ферромагнитного материала, более дорогого, но зато со значительно большей магнитной проницаемостью. Сердечники, как правило, собраны из пластин или свиты из тонкой ленты. Это связано с тем, что в самом сердечнике тоже наводится ток, и, если не принять мер, он окажется весьма большим: сердечник – это, по сути дела, короткозамкнутый виток, обмотка с малым сопротивлением. В итоге сердечник будет греться и отбирать значительную мощность. А вот в пластинчатом сердечнике токи в соседних пластинах создают магнитные поля, которые действуют друг против друга (рис. 6.20; 8). Пластины составляют из половинок, которые дополнительно изолируют друг от друга (часто просто слоем окисла), ленту также покрывают изоляционным слоем. И в итоге общая мощность, пожираемая сердечником, резко уменьшается.

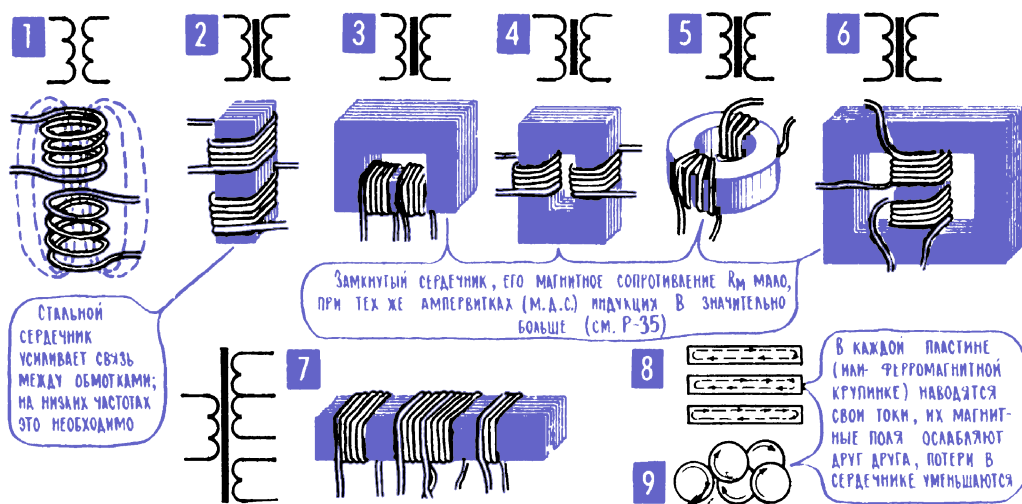


Рис. 6.20. Трансформаторы

Потери в сердечнике увеличиваются с частотой, и для высокочастотных трансформаторов и катушек обычных мер уже недостаточно. Ферромагнитный материал измельчают, а затем крупинки спрессовывают с помощью изолирующих смол (рис. 6.20; 9), создавая так называемые магнитодиэлектрики. Токи в отдельных крупинках порождают «враждующие» магнитные поля, потери в сердечнике уменьшаются. При этом, правда, уменьшается результирующая магнитная проницаемость, но что поделаешь, иначе сердечник для высокочастотных катушек вообще не получишь.

Если подвести к первичной обмотке I переменное напряжение от генератора, то в этой обмотке пойдет переменный ток I_1 (рис. 6.21; 1). Он создаст переменное магнитное поле $\Phi_{1,2}$, под действием которого наводится напряжение U_2 во вторичной обмотке II, и если подключить к ней нагрузку R_n , то в этой нагрузке пойдет ток I_2 . (Точнее было бы говорить о наведенной ЭДС, но мы сразу же введем напряжение U_2 , полагая, что какая-то часть ЭДС теряется на сопротивлении самой вторичной обмотки.) Если U_1 – синусоидальное напряжение, то и U_2 тоже будет синусоидальным: наведенное напряжение зависит от скорости изменения тока (гл. 5; 14), а скорость изменения синусоиды – тоже синусоида (гл. 6; 12).

Величина наведенного напряжения U_2 зависит от нескольких факторов. Например, от того, насколько магнитный поток первичной обмотки пронизывает вторичную: чем большая часть этого потока рассеивается, тем, при прочих равных условиях, наведенное напряжение будет меньше. Вот почему обмотки трансформатора в большинстве случаев располагают на замкнутом ферромагнитном сердечнике: по этому сердечнику замыкается практически весь поток, и все магнитное поле первичной катушки пронизывает витки вторичной. В трансформаторе с такой стопроцент-

ной магнитной связью напряжение на вторичной обмотке определяется отношением числа витков w_2 в обмотке II к числу витков w_1 в обмотке I (рис. 6.21; 2, 3). Это соотношение называется коэффициентом трансформации n .

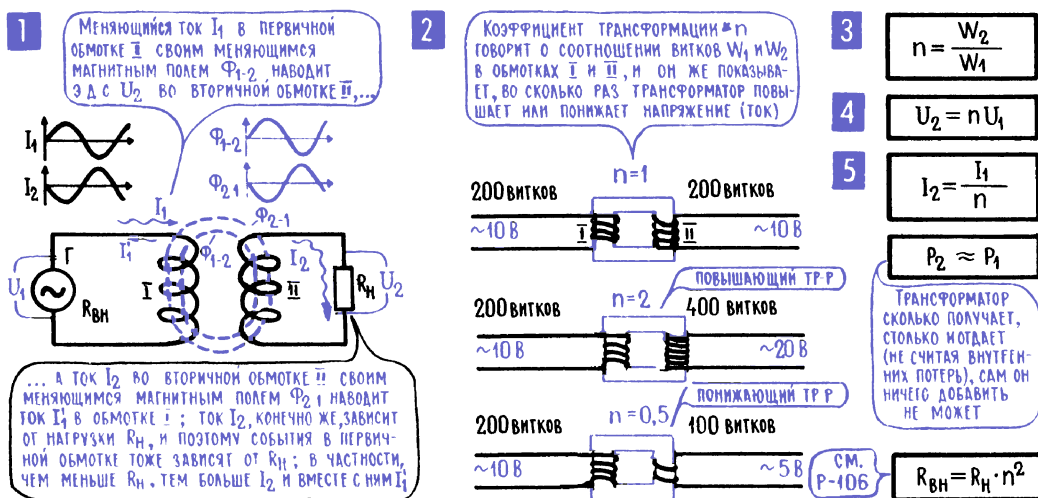


Рис. 6.21. Принцип работы трансформатора

Если во вторичной обмотке II витков больше, чем в первичной I, то есть если w_2 больше, чем w_1 , то коэффициент трансформации больше единицы и трансформатор называют повышающим. А если w_2 меньше, чем w_1 , то n меньше единицы и трансформатор называют понижающим. Эти названия вполне объяснимы. Мы знаем, что напряжение, которое наводится на катушке, тем больше, чем больше ее индуктивность. А индуктивность катушки, в свою очередь, пропорциональна числу витков. Поэтому напряжение, наведенное на вторичной обмотке, будет тем больше, чем больше w_2 . В трансформаторе со стопроцентной магнитной связью при одинаковом числе витков в обмотках I и II, то есть при коэффициенте трансформации $n = 1$, напряжение U_2 равно напряжению U_1 . А если w_2 отличается от w_1 , то и U_2 будет отличаться от U_1 , причем именно в n раз.

Теперь о токах. Когда во вторичную обмотку включена нагрузка, то в этой обмотке идет ток I_2 . Конечно же, вторичная обмотка сама никакой мощности не дает, а получает ее из первичной, то есть в конечном итоге от генератора. И в идеальном случае мощность P_2 , потребляемая во вторичной цепи, равна мощности P_1 , поступающей от генератора в первичную цепь (оговорка «в идеальном случае понадобилась потому, что реально какая-то мощность теряется в самом трансформаторе, и нагрузке достается несколько меньшая мощность, чем дает генератор). Из условия равенства мощностей $P_1 = P_2$ можно найти соотношение токов I_1 и I_2 в обмотках I и II. Соотношение между I_1 и I_2 также определяется коэффициентом транс-

формации n , но только этот коэффициент действует «в обратную сторону»: во сколько раз трансформатор повышает напряжение, во столько же раз он понижает ток. Если, например, U_2 в десять раз больше, чем U_1 , то в те же десять раз I_2 меньше, чем I_1 (рис. 6.21; 5). Согласитесь, что только при этом условии мощности P_1 и P_2 в обеих обмотках могут быть одинаковыми.

Важная особенность трансформатора – напряжение U_2 на вторичной обмотке определяется самим устройством трансформатора, его коэффициентом трансформации. А вот что касается токов I_1 и I_2 , то они зависят еще и от сопротивления нагрузки: чем меньше R_n , тем больше ток I_2 (и вместе с ним P_2) и соответственно больше ток I_1 (и вместе с ним P_1). Что же касается коэффициента трансформации, то он лишь показывает, во сколько раз I_1 больше или меньше, чем I_2 .

Знакомством с трансформатором мы завершаем путешествие по территориям Основ Электротехники, занимающим первые этажи огромного здания Электроники. Мы поднимаемся выше, на следующие этажи, от которых уже совсем недалеко до действующих электронных приборов и аппаратов.



ГЛАВА 7

Сырье и продукция электроники

1. Информация играет исключительно важную роль в природных процессах, в работе машин, в человеческом обществе. До середины XX века считалось, что информация – свойство исключительно человеческое. В энциклопедическом словаре того времени написано: «Информация – сообщение, осведомление о чем-либо, например информация через печать, радио, документальное кино и т. п.». У нынешнего специалиста в области вычислительной техники, языкознания, космической связи или физиологии подобное определение, скорее всего, вызовет улыбку: оно затрагивает лишь небольшую часть того, что сейчас принято называть информацией.

Примечание редактора. В энциклопедическом словаре 2000 года издания узкое определение информации гласит: «...сведения, передаваемые людьми устным, письменным или другим способом (с помощью условных сигналов, технических средств и т. д.). К этому узкому определению добавляется довольно обширный круг понятий далеко за рамками человеческого общения: «...общенаучное понятие, включающее обмен сведениями между людьми, человеком и автоматом, автоматом и автоматом; обмен сигналами в животном и растительном мире; передачу признаков от клетки к клетке, от организма к организму...».

Информация – очень широкое понятие. И очень глубокое. Она признака одной из самых важных, самых универсальных характеристик огромного множества объектов и процессов. Появились даже самостоятельные области знаний – кибернетика и информатика, для которых главный объект исследований – информация, но уже, конечно, в современном, широком смысле этого слова.

Не будем разбираться в нынешних официальных определениях понятия «информация». Для наших практических целей пока достаточно самого общего представления о ней.

Можно было бы сказать, что информация – это некоторые сведения, записанные о каких-либо объектах или процессах.

Информация содержится в структуре молекул, и чем сложнее молекула, чем разнообразнее ее структура, тем больше в ней информации. Информация содержится в телевизионной картинке, в музыкальном аккорде, в чертеже, рукописи, зубчатом колесе часов, в шестиграннике гайки, в серии радиосигналов, посланных на космический корабль. А вот чистый лист бумаги не несет никакой информации. И постоянный ток – тоже. И в равномерном потоке воздуха ничего не записано. Информация – это всегда какие-то изменения: интенсивности, формы, яркости, частоты, ассортимента, конфигурации.

Соединяясь в сложные агрегаты, молекулы узнают друг друга по той информации, которая содержится в их структуре. Информация, записанная в рельефе берегов реки, ворочает огромными массами воды, заставляет ее поворачивать то влево, то вправо. Возвращаясь из школы, вы открываете дверь квартиры своим ключом только потому, что в сложном узоре данного ключа содержится информация об устройстве данного замка.

Можно привести бессчетное множество примеров, подтверждающих, что информационные процессы, информационные взаимодействия играют исключительную роль в природе, в технике. И в последнее время все отчетливее понимается, что информация относится к числу фундаментальных характеристик нашего мира, к понятиям такой же важности, как, скажем, вещество и энергия.

2. В живых организмах информационные биологические системы осуществляют сбор, переработку и хранение информации. Когда вы нажимаете кнопку электрического звонка, то передаете звонку некоторую информацию, посылаете сообщение «нужно звонить». В звонке простейшей электромеханической конструкции информацию переносит переменный ток, который при нажатии кнопки поступает в катушки электромагнита и приводит в движение молоточек звонка. А вот когда оператор посылает на спутник радиосигнал, который должен включить двигатель коррекции, то этому сигналу самому работать не нужно. Он должен только перенести на спутник определенную информацию, передать соответствующую команду, а там уже найдутся другие источники энергии, которые в соответствии с полученной информацией сами включают, что нужно, или выключат¹. В этом втором примере мы встречаемся со специализированной информационной системой; вся работа таких систем только в том и состоит, чтобы собирать, хранить, передавать или перерабатывать информацию.

Изобретатель первых специализированных информационных систем – живая природа. Уже у простейших микроорганизмов есть молекулярные

¹ Уместно напомнить определение, данное известным кибернетиком И. А. Полетаевым в его книге «Сигнал» (1958): «Сигнал – физический процесс, несущий информацию».

«приборы», собирающие информацию об окружающей среде, и, в зависимости от химических веществ, действующих на эти «приборы», микроорганизмы либо движутся в сторону пищи, либо бегут из вредной для них среды. А еще у всех представителей живого, от одноклеточной водоросли до кашалота, есть специализированные хранилища информации – сложные молекулы нуклеиновых кислот, на которых языком химических соединений записана подробнейшая информация об устройстве данного вида живых организмов. Только благодаря этим подробным чертежам живые организмы точно воспроизводятся при размножении, и из кошки получается кошка, а не дельфин, не стрекоза и не табуретка.

За миллиарды лет биологической эволюции живые организмы усложнялись и совершенствовались, и при этом усложнялись и совершенствовались их информационные системы. На какой-то стадии у представителей животного мира появился особый информационный орган, точнее, целая система органов – нервная система. Сначала довольно простая, из нескольких нервных клеток, а затем все более сложная, способная выполнять много самых разных задач по сбору, хранению и переработке информации.

Наибольшего совершенства достигла эта система у человека. В нашем организме миллиарды клеток-рецепторов (собирателей информации) измеряют освещенность, температуру, химический состав окружающей среды, собирают сведения о том, что происходит внутри организма и за его пределами. Скажем, о том, в какой степени насыщен кислородом воздух, достаточно ли быстро движется кровь в сосудах, холодно ли на улице или насколько много сахара в чае. Вся эта информация по внутренним линиям связи – нервным волокнам – поступает в мозг, там при необходимости к ней добавляются кое-какие сведения из памяти, и все это вместе как-то перерабатывается, превращается в итоге в команды управления. Некоторые из этих команд, например «увеличить глубину дыхания» или «добавить в кровь адреналин», выполняются автоматически, а некоторые, например «добавить в чай ложку сахара» или «надеть теплую куртку», мы выполним сознательно.

3. В процессе свободных колебаний струна меняет скорость и направление, движется то туда, то обратно. Физические, химические, биологические и всякие иные процессы могут протекать по-разному. В одних случаях мы видим нарастание какой-либо величины – нарастает скорость падающего камня, температура поставленного на плиту чайника с водой, вес зреющего на поле арбуза... В других же процессах мы наблюдаем уменьшение чего-либо, убывание – убывает вода в дырявом ведре, напряжение пружины часов, скорость автомобиля, у которого на ровной дороге заглух двигатель... А есть еще и такие процессы, в которых происходит непрерывная смена нарастаний и убываний, процессы,

Упругая деформация – явление сложное, оно связано с изменением внутренней структуры вещества, с его упругостью. Когда мы сгибаем, то есть деформируем (меняем форму), стальную пружину или сжимаем, деформируем резиновый мяч, то затрачиваем энергию именно на то, чтобы преодолеть силы внутренней упругости. Но энергия эта не пропадает безвозвратно. Деформированное упругое тело, как только у него появится возможность, вернется в свое первоначальное состояние и почти полностью (обратите внимание на это слово «почти», о нем придется поговорить особо) вернет полученную энергию.

Это хорошо видно на примере часов: когда вы заводите их, то пружина деформируется и запасает определенную энергию, а затем в течение суток почти полностью отдает ее, вращая шестеренки часового механизма. И так же ведет себя оттянутая стальная струна. Она не потребляет, а лишь накапливает энергию и при первой возможности отдает ее.

Отдает, но кому?

Спортсмен, который обычно прыгает в длину на семь-восемь метров, не преодолеет и четырех, если лишить его возможности разбега, заставить прыгать с места. Дело в том, что при разбеге спортсмен создает некоторый запас энергии, который в момент прыжка добавляет к силе своих мышц. Физика очень точно определяет этот запас – это не что иное, как кинетическая энергия, которой обладает любое движущееся тело, в нашем примере бегущий человек. Чем больше масса тела и его скорость, тем больше этот запас, больше кинетическая энергия. Это легко поймет тот, кому приходилось, разогнав велосипед, долгое время катиться по инерции. Шоферы хорошо знают, что чем больше скорость автомобиля и чем сильнее он нагружен, тем труднее машину остановить, то есть погасить в тормозах ее кинетическую энергию.

Кинетическая энергия у какого-либо тела, конечно, не появляется сама собой. Ее накапливают с помощью мышц, сожженного бензина, взорванного пороха – словом, с помощью любых источников энергии, способных толкать, двигать, вращать, способных «создавать скорость».

Теперь можно сказать, кто же этот второй потребитель энергии, участвующий в колебаниях струны. Это движение. Если, оттянув струну, вы отпустите ее на свободу, то силы упругой деформации постараются сразу же вернуть ее в исходное положение, к условной средней линии. При этом струна начнет двигаться и набирать скорость, а значит, увеличивать запасы кинетической энергии. Но и эти запасы струна не хранит у себя, а постепенно отдает их. И опять тот же вопрос – кому?

В поисках ответа мы сейчас прокрутим – разумеется, условно, мысленно – небольшой учебный кинофильм.

...В зале медленно гаснет свет. Звучит музыкальное вступление, и на экране появляются пляшущие буквы. Буквы постепенно вытягиваются в три ровные линии, мы читаем название фильма: «Свободные колебания

струны». И тут же слышим голос диктора: «Замечательная техника современного кино позволяет нам увидеть колебания гитарной струны, замедленные в несколько тысяч раз».

На экране струна, натянутая между двумя массивными стойками. Откуда-то со стороны выплывает рука, указательным пальцем цепляет струну и оттягивает в сторону. На том месте, где только что была струна, остается пунктирная линия, и тут же возле нее появляется надпись: «Линия покоя». Снова голос диктора: «Оттянув струну, мы затратили некоторую энергию».

Палец отпускает струну. Она начинает двигаться, сначала медленно, затем все быстрее. Двигаясь, струна в какой-то момент сливается с пунктирной «линией покоя». Голос поясняет: «Под действием сил упругости струна вернулась в положение покоя. Но остановиться здесь она не может: почти вся энергия, которую мы передали струне, оттянув ее, теперь перешла в кинетическую энергию, и, только потеряв ее, струна сможет вновь обрести покой. А пока она продолжает двигаться».

Проскочив пунктирную «линию покоя», струна продолжает двигаться и вновь изгибается, оттягивается, но теперь уже сама. И конечно, изгибается в противоположную сторону. Струна изгибается все сильнее. Скорость ее уменьшается. Голос диктора: «Сейчас струна, истратив свою кинетическую энергию, остановится. Но это лишь кажущийся покой – струна вновь деформирована, и силы упругости снова начинают двигать ее, вновь приближая струну к “линии покоя”».

Диктор сказал правду: мы действительно видим, как струна движется к пунктирной линии, вновь сливается с ней на какое-то неуловимое мгновение и, проскочив эту линию, продолжает двигаться... Вот она уже почти на том же месте, куда когда-то оттянул ее палец... Неуловимая остановка, и, изменив направление на обратное, снова в путь, снова к «линии покоя»...

Однако не будем утомлять себя этим однообразным зрелищем. Покинем на время кинозал и попробуем устроить небольшое обсуждение фильма.

4. Свободные колебания – чрезвычайно широкий класс процессов, в которых происходит обмен энергией между двумя ее накопителями. Мы видели, что струна сама по себе двигалась то туда, то обратно, то есть совершала свободные колебания. Струна двигалась относительно некоторого устойчивого состояния, относительно «линии покоя». В процессе колебаний по синусоиде менялась скорость струны, по синусоиде менялось ее отклонение от средней линии. Первопричина всего этого – обмен энергией между двумя накопителями, между силами упругости и движением. Оба накопителя энергии существуют в натянутой струне не каждый сам по себе, они взаимосвязаны – упругая деформация стремится двинуть

струну, создать у нее запас кинетической энергии, а кинетическая энергия стремится изогнуть струну, запастись в ней энергию в виде упругой деформации. Поэтому, как только мы передали струне порцию энергии, накопители сразу же начали перебрасывать ее друг другу. Начались свободные колебания.

Все эти особенности характерны и для любых других видов свободных колебаний (рис. 7.1; 6, 7). В колебаниях зажатой в тиски линейки участвуют уже знакомые нам накопители – упругость и движение, в колебаниях маятника или качелей один из накопителей тот же – движение, а вместо упругой деформации работает поднятие маятника (качелей) на некоторую высоту: чем выше поднято тело, тем больше энергии оно запасает и затем может отдать, двигаясь вниз.

Свободные колебания – вид движений, очень распространенный и в природе, и в технике. Можно наблюдать химические колебания, когда «туда-обратно» меняются концентрации определенных веществ. Электромагнитные колебания – обмен энергией между конденсатором и катушкой. Даже в поведении человека нередки колебания, когда есть два накопителя, два решения, между которыми приходится выбирать.

Примечание редактора. Кроме свободных колебаний (их еще называют гармоническими), в технике (и в электронике, в частности) огромное значение имеют колебания другого вида – релаксационные. Если для свободных колебаний процессы рассеяния (диссипации) энергии ведут лишь к постепенному их затуханию, то для релаксационных это основной механизм поддержки колебательного режима: вместо перехода из одного вида в другой (из потенциальной в кинетическую и обратно) здесь энергия в каждом цикле полностью теряется, переходит в тепло. Для поддержки релаксационных колебаний необходим постоянно подключенный к системе источник энергии, восполняющий ее потери, – при отключении источника колебания прекратятся немедленно. Форма релаксационных колебаний обычно принципиально отличается от синусоиды, они имеют импульсный характер, но специальной подгонкой параметров системы можно получить и релаксационные колебания, близкие к синусоидальным. Примеры релаксационных колебаний: в природе – дрожание листьев на ветру; в технике и быту – колебания тормозной системы автомобиля («визг тормозов»), звучание смычковых инструментов; в электронике – различные мультивибраторы и импульсные генераторы (см. гл. 11; 12, а также *Практикум* в гл. 11), излучение импульсного лазера.

Есть у всех и всяких систем, в которых происходят свободные колебания, еще одна общая черта – частота колебаний f зависит от параметров накопителей энергии.

5. Чем медленнее накопители принимают и отдают энергию, тем ниже частота собственных колебаний. Для свободных колебаний понятие частоты имеет тот же смысл, что и для переменного тока (гл. 6; 6), – время полного цикла свободных колебаний называется *периодом*, а число периодов в

секунду – частотой. И единицы измерений те же: для периода – секунды (с), для частоты – герцы (Гц). Каким будет период свободных колебаний, какой будет частота, зависит от того, насколько быстро обмениваются энергией ее накопители. Так, например, чем больше масса струны, тем медленнее она набирает скорость и медленнее останавливается, двигаясь по инерции. И поэтому с увеличением массы струны частота f свободных колебаний уменьшается. Вот почему более толстые, более массивные струны колеблются медленнее, чем тонкие (рис. 7.1; 8).

Частота колебаний струны зависит также от ее гибкости: чем меньше натянута струна, тем более вяло протекает и поэтому дольше тянется процесс ее деформации и тем медленнее деформированная струна возвращается в исходное состояние. Поэтому с уменьшением силы натяжения струны, то есть с ростом ее гибкости, податливости, частота собственных колебаний уменьшается. Сущность этих зависимостей всегда одна и та же – частота свободных колебаний зависит только от параметров колеблющейся системы (часто говорят, колебательной системы), и, меняя эти параметры, можно менять частоту собственных колебаний.

А теперь вернемся на несколько минут в наш кинозал, где колеблющаяся на экране гитарная струна поможет сделать еще один важный общий вывод.

6. Чем меньше потери энергии в колебательной системе, тем выше ее добротность, тем дольше продолжаются свободные колебания. Мы возвращаемся в кинозал и, как и следовало ожидать, видим на экране знакомые кадры: струна по-прежнему движется туда-обратно, и знакомый голос произносит все те же фразы:

«...струну заставляет двигаться энергия упругой деформации...»;

«...она уже не может остановиться...»;

«...кинетическая энергия израсходована на то, чтобы вновь деформировать струну...».

И все-таки что-то изменилось в движениях струны. Теперь она чуть медленнее проходит мимо «линии покоя» и отклоняется от этой линии чуть меньше, чем в самом начале. Еще несколько минут наблюдений – и уверенный вывод: колебания постепенно затухают. Ну что ж, это естественно, струна не может колебаться вечно. Причину затухания колебаний тоже можно понять – это потери энергии. Каждый раз при перекачивании энергии из одного накопителя в другой часть ее теряется на то, чтобы преодолеть трение воздуха, преодолеть внутреннее трение в самой струне. В итоге запасы энергии, которые когда-то струна получила, постепенно иссякают, энергия превращается в тепло, которое, как в бездонную бочку, уходит в просторы воздушного океана.

Чтобы оценить, насколько же бережно струна расходует свои запасы энергии, вводится специальная характеристика – *добротность* Q . Чем больше энергии струна запасает по сравнению с тем, что она теряет при каждом перекачивании, тем выше добротность, тем, следовательно, медленнее затухают и дольше длятся свободные колебания (рис. 7.1; 10, 11).

Среди нескольких видов потерь энергии у струны есть, если можно так сказать, полезные потери. Во всяком случае, эти потери, точнее говоря, затраты энергии, просто необходимы настоящей гитарной струне, которая должна создавать звук.

7. В процессе колебаний струна излучает звуковые волны. Вы тронули гитарную струну, она пришла в движение, увлекла за собой окружающий воздух, и во все стороны от струны пошли звуковые волны. Их рождение в самом упрощенном виде можно представить себе так. Двигаясь вперед, струна сжимает впереди себя воздух, создает повышенное давление. Разумеется, область с повышенным давлением не может оставаться изолированной, давление передается соседним участкам, и от струны катится вал сжатого воздуха (рис. 7.2).

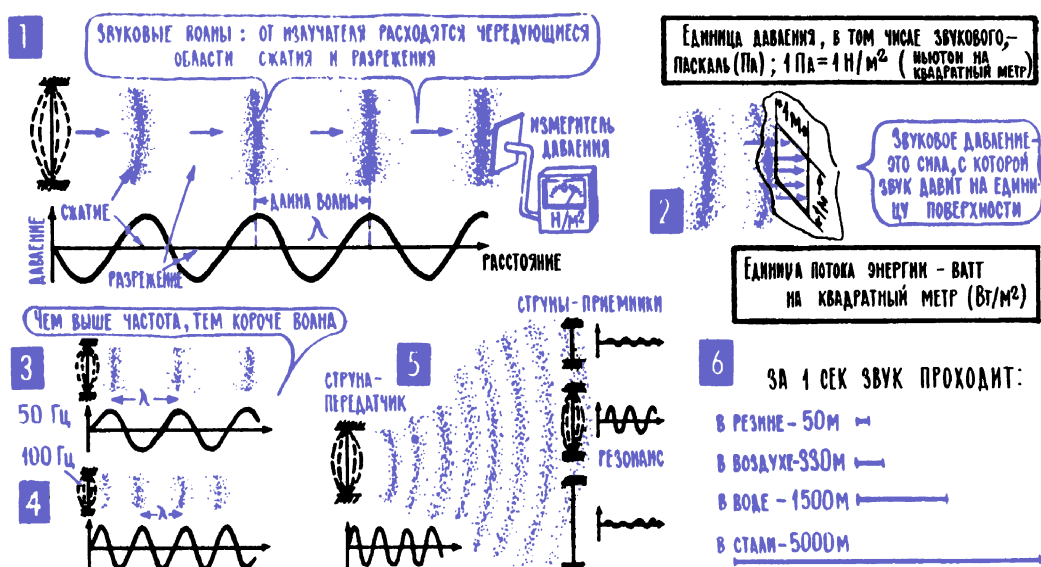


Рис. 7.2. Звуковые волны

Через какое-то время струна пойдет обратно, начнет возвращаться к «линии покоя», и в том месте, где она только что сжимала воздух, появится область разрежения, область несколько пониженного давления. Область пониженного давления также не остается изолированной, и вслед за валом сжатия в пространство уходит вал разрежения. А поскольку струна

совершает колебания, непрерывно меняет свое направление, движется туда-обратно, то волны сжатия и разрежения будут уходить от струны одна за другой. Такие волны сжатия и разрежения в воздухе или в другой среде – это как раз и есть звук.

8. Основные характеристики звука: период, частота, скорость, звуковое давление, сила звука. Попробуем поставить на пути звуковой волны измеритель давления – манометр. Причемотрегулируем его так, чтобы прибор показывал только изменение давления по сравнению с атмосферным. Это значит, что при нормальном атмосферном давлении манометр будет показывать ноль, при некотором сжатии воздуха стрелка прибора пойдет вправо, при разрежении – влево (рис. 7.2; 1). А под действием звуковой волны стрелка будет все время отклоняться от нуля то влево, то вправо. Если бы мы успевали следить за всеми движениями стрелки и построили бы график звукового давления, то он оказался бы точной копией графика свободных колебаний струны. А разве могло быть иначе? Звуковая волна рождена колеблющейся струной, поэтому изменение давления в любой точке, куда приходит звук, в точности повторяет все действия струны по сжатию и разрежению воздуха.

Это позволяет прежде всего ввести такую характеристику звука, как *частота* – число полных циклов (периодов) изменения звукового давления в единицу времени.

Частота звука, естественно, равна частоте свободных колебаний создавшей его струны. Если струна каждую секунду посылает в пространство 10 «сгустков» сжатия, то через любую точку пространства каждую секунду пройдет именно 10 таких «сгустков».

Другая характеристика звука – скорость распространения – не требует, по-видимому, особых пояснений. Нужно лишь отметить, что в воздухе скорость звука при 0 °С – около 330 м/с, что с повышением температуры она несколько повышается и что в других средах скорость звука может быть во много раз больше или меньше, чем в воздухе (рис. 7.2; 6).

Зная скорость звука и его частоту, можно найти еще одну характеристику – *длину звуковой волны*. Длина волны – это то расстояние, которое волна успевает пройти за время одного полного периода колебаний. Так, например, при частоте 1 Гц, то есть при периоде 1 с, длина волны составит в воздухе 330 м, в воде – около 1,5 км, в стали – 5 км, в резине – всего 50 м. С увеличением частоты длина волны, конечно, уменьшается: чем меньше длится период, тем меньшее расстояние успеет пройти волна (рис. 7.2; 3, 4).

Звуковые волны иногда сравнивают с волнами на поверхности воды – гребень морской волны чем-то похож на область сжатого воздуха, впади-

на – на область разрежения². Когда говорят о длине морской волны, то обычно имеют в виду расстояние между двумя ее соседними гребнями, и по аналогии можно сказать, что длина звуковой волны – расстояние между двумя соседними точками наибольшего сжатия. У этого определения нет никакого противоречия с предыдущим: чем выше частота звука, тем чаще одна за другой следуют области сжатия и тем, естественно, меньше расстояние между двумя такими соседними областями.

Работоспособность звуковой волны, ее энергетические запасы принято характеризовать двумя показателями: *звуковым давлением* и *силой звука*. Звуковое давление, так же, скажем, как и переменная ЭДС, непрерывно меняется, и поэтому следовало бы говорить о его амплитуде, мгновенном и эффективном значениях. Этой последней характеристикой пользуются чаще всего, и если нет никаких оговорок, то нужно считать, что речь идет об эффективном звуковом давлении, которое составляет 70 % от амплитуды. Единица давления получается как единица силы, отнесенная к единице площади, в системе СИ это *паскаль* (Па), соответствующий одному ньютону на квадратный метр (Н/м^2). Оценить реальное значение этой единицы позволит такое сравнение: если на стандартный лист фанеры (площадь около 2 м^2) вылить стакан воды (масса – около 200 г, вес – примерно 2 Н), то, равномерно распределившись по листу слоем толщиной примерно 0,1 мм, вода создаст давление как раз $1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2$. Как видите, 1 паскаль (1 Па) в наших житейских масштабах – очень небольшая величина, это всего лишь давление слоя воды, более тонкого, чем лист бумаги. В то же время звуковое давление 1 Па создает ощущение невыносимо громкого звука (см. табл. 7.1 далее). В литературе недалекого прошлого можно еще встретить другую единицу – бар. Она в десять раз меньше, чем Н/м^2 , то есть $1 \text{ бар} = 0,1 \text{ Па} = 0,1 \text{ Н/м}^2$ или $1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2 = 10 \text{ бар}$.

Другая характеристика работоспособности – сила звука – указывает ту мощность, которую пронесит звуковая волна через единичную поверхность, и поэтому измеряется в ваттах на квадратный метр, Вт/м^2 . Справочная табл. 7.1 иллюстрирует обе единицы Н/м^2 и Вт/м^2 , оценивая с их помощью некоторые реальные источники звуковых волн. Обратите внимание, что звуковое давление и сила звука связаны квадратичной зависимостью (гл. 4; 2): увеличьте давление в десять раз, и сила звука возрастет в сто раз. Точно такой же зависимостью связаны напряжение и мощность или ток и мощность в электрической цепи (гл. 4; 11).

И еще обратите внимание на третью колонку табл. 7.1, в которой приведены уже знакомые нам децибелы (гл. 6; 20).

² Колебания, подобные волнам на поверхности воды, еще называют поперечными, а колебания, подобные звуковым волнам, – продольными, соответственно основному направлению движения частиц среды в процессе колебания – поперек или вдоль направления распространения волны.

Таблица 7.1. Динамический диапазон слышимых звуков

Сила звука, Вт/м ²	Звуковое давление, Н/м ²	Звуковое давление, дБ	Примеры
10 ⁻¹²	2·10 ⁻⁵	0	Порог слышимости
10 ⁻¹¹	6,5·10 ⁻⁵	10	Шепот, тиканье ручных часов
10 ⁻¹⁰	2·10 ⁻⁴	20	Тихий сад
10 ⁻⁹	6,5·10 ⁻⁴	30	Тихая комната, настенные часы
10 ⁻⁸	2·10 ⁻³	40	Тихий разговор, шум кондиционера
10 ⁻⁷	6,5·10 ⁻³	50	Шум в помещении с открытыми окнами
10 ⁻⁶	0,02	60	Громкий разговор вблизи
10 ⁻⁵	0,065	70	Шумная улица, пылесос на расстоянии 3 м
10 ⁻⁴	0,2	80	Шумная трасса, крик, мотоцикл с глушителем
10 ⁻³	0,65	90	Пневматический отбойный молоток
0,01	2	100	Кузнечный цех, очень шумный завод
0,1	6,5	110	Трактор на расстоянии 1 м, громкая музыка
1	20	120	Гром, мощный автомобильный сабвуфер
10	65	130	Болевой порог

В первой колонке таблицы приведено несколько конкретных значений силы звука (в Вт/м²), во второй колонке – соответствующее звуковое давление (интенсивность звука, Н/м²). В третьей колонке указано (в децибелах), на сколько то или иное звуковое давление выше порога слышимости (нулевой уровень звука, 20 мкПа). В последней колонке приведены примеры реальных звуков, соответствующих тому или иному звуковому давлению.

9. Звуковое давление и силу звука часто измеряют в децибелах. Звуки, создающие давление меньше, чем 0,00002 Н/м² (20 мкПа), мы просто не слышим. Такое звуковое давление и соответствующую ему силу звука 10⁻¹² Вт/м² называют порогом слышимости. Естественно, что все остальные слышимые звуки во сколько-то раз выше порога слышимости, и, чтобы оценить это «во сколько-то раз», можно пользоваться децибелами (дБ). Специалисты по акустике иногда вообще забывают о единицах звукового давления и силы звука и оценивают эти величины сразу в децибелах, начиная отсчет от порога слышимости. Так и говорят: «сила звука – 90 децибел...» (вместо 0,001 Вт/м²) или «звуковое давление 60 децибел...» (вместо 0,02 Па = 0,02 Н/м²). Пользоваться децибелами особенно удобно, когда приходится оценивать усиление или ослабление звука. Скажем, известно, что вблизи струны сила звука 60 дБ и что по мере продвижения вперед она уменьшается на 0,1 дБ на каждом метре пути. Сразу же можно подсчитать, что на расстоянии 500 м от струны сила звука уменьшится на 50 дБ и составит уже всего 10 дБ, что близко к громкости звучания шепота (табл. 7.1).

10. Струна-излучатель и струна-приемник образуют простейшую линию звуковой связи. Двигаясь в пространстве, звуковая волна натывается на разные предметы, частично отражается от них, а частично отдает им свою энергию. Давайте для определенности предположим, что звуковая волна наткнулась на какую-нибудь струну. Сначала область повышенного давления волны двинет струну вперед, затем область пониженного давления потянет ее назад, затем опять повышенное давление, опять вперед, и снова пониженное давление, снова назад... Одним словом, звуковая волна, отдавая такой струне-приемнику часть своей энергии, заставит ее совершать колебания (рис. 7.2; 5). С какой частотой? Конечно, с частотой самого звука, то есть с частотой струны-передатчика. Потому что именно струна-передатчик определяет, насколько часто сменяют друг друга сжатия и разрежения в звуковой волне, насколько часто эта волна будет двигать вперед-назад нашу струну-приемник. И ее колебания, в отличие от собственных, свободных колебаний, называют вынужденными – струна-приемник вынуждена двигаться именно с той частотой, которую навязывает ей звуковая волна.

11. Используя в струне-приемнике явление резонанса, можно резко повысить ее чувствительность. Слово «резонанс» в популярных книгах иллюстрируют очень старинным и не очень веселым примером. Шла рота солдат по мосту, шла в ногу, четко отбивая шаг. И вдруг мост рухнул. Рухнул именно из-за этого вышагивания в ногу. Дело в том, что мост, подобно гитарной струне, совершает колебания, причем с очень малой амплитудой и очень небольшой частотой. Разрушение моста оказалось результатом трагического совпадения – частота вышагивания роты совпала с частотой собственных колебаний моста. Солдаты раскачивали мост в такт с его собственными колебаниями, подобно тому, как мы в такт подталкиваем качели, желая раскачать их как можно сильнее. Вот это самое подталкивание в такт, раскачивание с частотой, равной частоте собственных колебаний, как раз и называют резонансом.

Можно настроить струну-приемник в резонанс с частотой звука, и в этом случае амплитуда колебаний струны резко увеличится. Первая же порция звуковой энергии заставит струну совершать свободные колебания, и все остальные действия звуковой волны будут поддерживать эти собственные колебания. Теперь достаточно будет даже очень слабого звука, чтобы сильно раскачать струну (рис. 7.2; 5).

Чувствительность струны-приемника, ее способность приходить в движение под действием слабых звуков зависит от уже знакомой нам характеристики – добротности. Чем больше добротность, то есть чем меньше собственные, внутренние потери энергии в струне, тем более слабый звук

сумеет раскатать ее, тем, следовательно, лучше струна будет выполнять свои функции приемника звуковых волн.

12. У реальных звуковых сигналов звуковое давление меняется сложным образом, и именно формой графика одни сигналы отличаются от других. До сих пор график звукового давления мы рисовали в виде синусоиды, что было некоторым искажением истины. График колебаний реальной струны, а значит, график излучаемого ею звука, похож на синусоиду, однако все же отличается от нее. А графики реальных природных звуков, в частности звучание музыкальных инструментов и человеческого голоса, всегда имеют очень сложную форму. Именно в этой сложности изменений звукового давления, а значит, в форме графика, записана информация, которую переносит звук. Только характером изменения, формой кривой графика – чаще всего для краткости говорят просто «форма кривой» – отличается звук «а» от звука «о», только характер изменения, форма кривой отличает звуки одинаковой частоты (одна и та же нота), взятые на разных музыкальных инструментах.

Придется признать, что, путешествуя по зоопарку, мы не заметили слона: изучая звук, не научились оценивать форму кривой, самую важную его характеристику. Но как только мы захотим исправить эту ошибку, то сразу же столкнемся с непреодолимыми, казалось бы, трудностями. Действительно, как можно точно оценить форму кривой графика? В каких единицах ее измерять? Как сравнивать и различать разные по форме кривые, отмечать их сходство или различие?

13. Спектр сигнала – эквивалентный ему набор синусоидальных составляющих. Для начала попробуем решить подобную задачу из другой области. Предположим, что нам нужно, пользуясь картой, измерить площадь Черного моря (рис. 7.3; 1). Проще всего, наверное, это можно сделать так: заполнить очертания моря квадратами, подсчитать площадь каждого из них, а затем все полученные результаты сложить. На карте разместятся два-три больших квадрата, несколько квадратов поменьше и, наконец, множество мелких и мельчайших квадратиков, которые точно воспроизведут сложные очертания морских берегов. С помощью набора стандартных составляющих – квадратов – можно измерить площадь любой геометрической фигуры, имеющей сложные очертания.

Подобным же образом, чтобы оценить характер изменения, то есть форму кривой графика, какого-либо сложного звука, можно представить этот звук как сумму некоторых стандартных составляющих – звуков с разными амплитудами, частотами и фазами, но с одинаковой стандартной формой кривой. Чтобы дать точное описание любого сложного звука, достаточно будет назвать набор стандартных составляющих, которые в сумме дадут данный сложный звук.

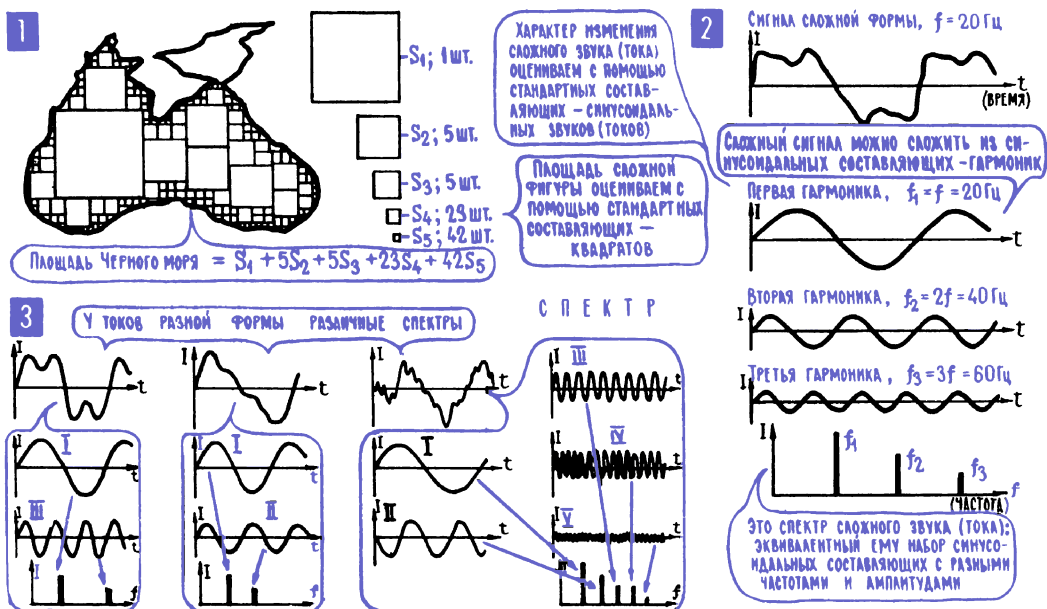


Рис. 7.3. К понятию спектра сигналов различной формы

То, что сложную геометрическую фигуру можно сложить из более простых фигур, в частности квадратов, ясно и без особых рассуждений. А вот можно ли подобную операцию суммирования производить со звуковыми волнами? Можно ли считать, что сложный звук состоит из определенного набора простых?

Оказывается, можно.

Если в точку, где расположен измеритель звукового давления, направить две звуковые волны, то прибор не будет в отдельности реагировать на каждую из них, а покажет суммарное давление. Потому что в какой-либо точке пространства звук не помнит, какие силы его создавали и сколько было этих сил. Важен лишь конечный результат, важна сумма сил, подобно тому, как для покупателя важен суммарный вес гирь, которые стоят на чаше весов. В качестве стандартной составляющей для измерения площади сложных геометрических фигур мы выбрали квадрат, потому что очень просто определить его площадь. В качестве стандартной составляющей для описания сложного звука выбрана синусоида. Причин несколько, вот две из них, достаточно веские.

В начале прошлого века французский математик Жан Батист Жозеф Фурье нашел способ вычислять набор синусоидальных составляющих – именно синусоидальных! – сумма которых может дать сложный звук определенной формы. Такой набор составляющих получил название спектр. Если известно математическое описание сложного звука, то по формулам Фурье можно найти его спектр – найти частоты, амплитуды и фазы стан-

дартных синусоидальных звуков, которые, сложившись, воспроизведут сложный звук во всей его сложности и неповторимости (рис. 7.3; 3).

Разработанные Фурье удобные математические приемы определения спектра – это есть первое «за» в части выбора синусоиды на роль стандартной составляющей сложных звуков. А вот и второе «за» – существуют устройства, которые могут уже не на бумаге, не с помощью математических формул, а реально, в натуре разделить сложный звук на сумму синусоидальных составляющих и выделить любую из них из сложного звука. Одно из таких устройств – наше ухо.

Кстати, Фурье установил, что если сложный звук периодически повторяется, то его спектр состоит из синусоидальных составляющих с кратными частотами. Музыканты называют эти составляющие обертонами, радисты – гармониками, имея в виду второе имя синусоиды – «гармоническая зависимость». Так, например, если частота сложного звука $f = 30$ Гц, то в спектр войдут составляющие с частотами $f = 30$ Гц (первая гармоника), $2f = 60$ Гц (вторая гармоника), $3f = 90$ Гц (третья гармоника), $4f = 120$ Гц (четвертая гармоника) и т. д. Амплитуды гармоник могут быть самые разные, это-то как раз и зависит от формы кривой сложного звука (рис. 7.3; 3).

14. Орган слуха – высокочувствительный приемник и анализатор сложных звуковых сигналов. Наземная станция метро – это лишь небольшая часть того, что мы называем словом «метро», главные же его сооружения – прекрасные дворцы-станции, бесконечные туннели, эскалаторы, поезда, системы электроснабжения и связи – все это скрыто под землей. Вот так и то, что мы привыкли называть ухом, – это не более чем своего рода наземная станция метро. Главные же части нашего звукоприемника – среднее и внутреннее ухо – нам не видны, они спрятаны глубоко и защищены костями черепа (рис. 7.4).

Попав в ушную раковину, звуковые волны пробегают извилистый слуховой проход (его длина около 2,5 см) и, попав на барабанную перепонку, приводят ее в движение (так же, как звук заставлял двигаться струну-приемник; рис. 7.2). Движение барабанной перепонки через систему косточек (молоточек, наковальня, стремечко, общая масса около 0,05 г) передается в самый главный отдел внутреннего уха – в улитку. Такое название эта «деталь» получила потому, что у млекопитающих она похожа на спиралевидный домик улитки (постепенно сужающаяся трубка длиной около 3 см, закрученная на 2,7 оборота). У животных, которые стоят на низших ступенях развития, улитки еще нет, ее место занимает более простая «деталь», похожая на изогнутую луковичу.

Улитка – это конечная станция, куда поступают механические колебания от слуховых косточек. Здесь, в улитке, эти колебания преобразуются в серии нервных импульсов, которые по нервным волокнам поступают в слуховой нерв, а по нему уже прямо в слуховые отделы головного мозга.

«Деталь» внутреннего уха, где происходят эти преобразования, по имени одного из первых ее исследователей Альфонсо Корти получила название орган Корти, или кортиев орган.

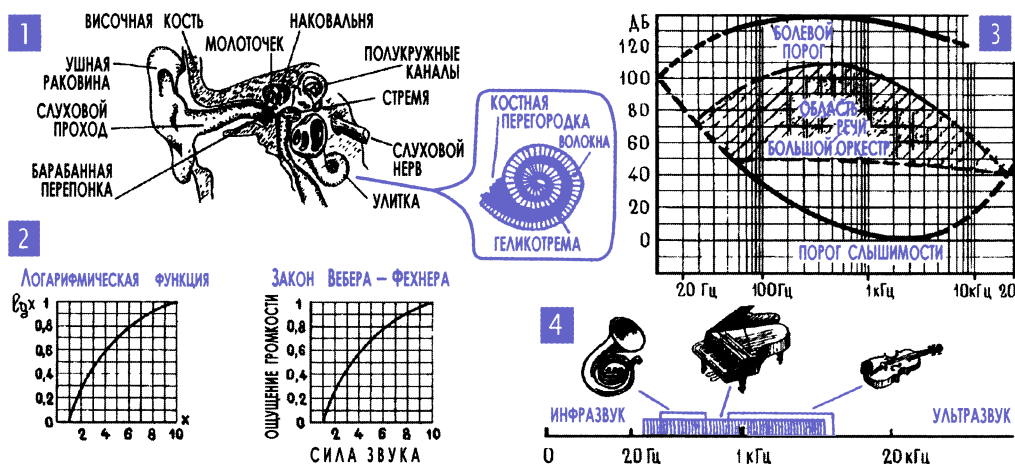


Рис. 7.4. Строение уха и восприятие звука человеком

Кортиев орган находится в спиральном лабиринте улитки и чем-то напоминает спиралевидный и плоский слоеный пирог. Нижний слой, основание «пирога», – лента основной мембраны, сотканная из двадцати пяти тысяч тонких поперечных нитей, которые часто сравнивают со струнами рояля или арфы. По мере того как основная мембрана расширяется, нити-струны становятся длиннее: у основания улитки, в районе овального окна, к которому примыкает стремечко, длина нитей – около 0,1 мм, а у вершины улитки – около 0,5 мм.

Изучение органов слуха началось давно, но и сегодня в этой области очень много неясного. Так, в частности, пока не удалось проследить все стадии преобразования звуковых колебаний в нервный импульс. Не очень ясно, каким именно образом кортиев орган анализирует форму кривой сложного звука, хотя установлено, что именно он разделяет сложный звуковой сигнал на синусоидальные составляющие. Долгое время широким признанием пользовалась резонансная теория слуха, которую около ста лет назад разработал блестящий физик и физиолог Герман Гельмгольц. Основную идею этой теории можно проиллюстрировать простым опытом. Откройте крышку рояля, нажмите правую педаль и с большими паузами пропойте над струнами несколько нот. Вы услышите, как рояль вторит пению, причем после разных нот звучат разные струны. Происходит это потому, что каждая струна резонирует в основном лишь на одной синусоидальной составляющей сложного звука. И поэтому для разных

звуков, то есть для разных спектров, набор откликающихся струн будет различным.

Гельмгольц считал, что наше ухо определяет спектр сложных звуков таким же способом, а роль резонирующих струн он отводил нитям основной мембраны: они имеют разную длину, а значит, разные резонансные частоты (гл. 7; 5). Эксперименты, казалось бы, полностью подтверждали это предположение. Так, например, было установлено, что при повреждении вершины улитки, где находятся более длинные, то есть более низкочастотные, волокна, подопытные животные перестают слышать только низкочастотные звуки. А повреждение основания улитки приводит к потере слуха в области высших частот. В пользу резонансной теории говорили и некоторые другие эксперименты.

И все же под давлением фактов, особенно полученных в последнее время, от простой и удобной модели уха-роля пришлось отказаться. Вот лишь одно из непреодолимых затруднений резонансной теории: для того чтобы перекрыть весь диапазон слышимых частот, натяжение самых длинных и самых коротких нитей основной мембраны должно различаться в десять тысяч раз, а на практике такой огромной разницы не обнаружено. Тот факт, что кортиев орган разделяет сложный звук на синусоидальные составляющие, не вызывает сомнений, но как именно это происходит, еще предстоит выяснить³.

Самые низкие и самые высокие слышимые частоты у разных людей разные, но в среднем можно считать, что нижняя граница слышимых звуков – это 16–20 Гц, а верхняя – 18–22 кГц (18 000–22 000 Гц). Кстати, верхняя граница сильно смещается с возрастом, и нередко пожилые люди слышат звуки лишь до 10–12 кГц. В то же время встречаются, хотя и очень редко, рекордсмены – люди, которые слышат частоты вплоть до 28–30 кГц. Официальной границей слышимых звуков, как правило, считают 20 Гц – 20 кГц. Более низкочастотные неслышимые звуки – это инфразвук, более высокочастотные – ультразвук. То, что мы не слышим ультразвуки и инфразвуки, разумеется, никак не влияет на их природу. Это точно такие же, как и слышимый звук, чередующиеся волны сжатий и разрежений воздуха или какой-либо иной среды.

Одна из самых замечательных особенностей нашего слуха – огромный диапазон улавливаемых звуковых давлений. Самый слабый звук, который мы слышим, тот, что находится на пороге слышимости, несет всего 10^{-12} Вт/м² (см. табл. 7.1). Самый сильный звук несет 10 Вт/м², он находится уже на пороге нестерпимой боли или даже повреждения тонких механизмов слуха. Таким образом, наш слух воспринимает звуки, мощность кото-

³ В настоящее время считается, что ухо имеет механизмы усиления звуковых сигналов и является, по сути, механическим измерителем амплитудно-частотной характеристики (АЧХ), т. е. зависимости амплитуды отдельных гармоник от частоты (см. также гл. 8; 14). Отдельные частотные составляющие передаются в мозг, где подвергаются анализу.

рых различается в 10 000 000 000 000 раз. Если бы удалось построить весы с таким рабочим диапазоном, то они одинаково хорошо взвешивали бы и каплю воды, и огромный океанский корабль массой в десятки тысяч тонн.

Особенно поражает высокая чувствительность нашего слуха, его способность улавливать очень слабые звуки. Судите сами: на пороге слышимости общее давление на барабанную перепонку не превышает 0,2 микрограмма (0,000 0002 г); амплитуда ее колебаний измеряется миллионными долями сантиметра.

15. Закон Вебера–Фехнера: ощущение громкости пропорционально логарифму силы звука. Наше ухо улавливает звуки, столь сильно отличающиеся по мощности, благодаря некоторой системе автоматической регулировки чувствительности: по мере того как сила звука нарастает, чувствительность слуха уменьшается. Иными словами, улавливая слабые звуки, наш слух в состоянии почувствовать разницу звуковой мощности на какие-то триллионные доли ватта, а улавливая очень громкие звуки, ухо замечает различие в громкости, если она изменилась на несколько ватт (во всех случаях речь идет не о ваттах вообще, а о силе звука, о ваттах на квадратный метр). Экспериментальные исследования показали, что зависимость ощущения громкости от силы звука подчиняется логарифмическому закону.

Напомним, логарифм (десятичный) какого-либо числа – это есть показатель степени, в которую нужно возвести 10, чтобы получить данное число. Сокращенно это записывается, например, так: $\lg 100 = 2$, то есть логарифм числа 100 равен 2. Действительно, если возвести 10 в квадрат (в степень 2), то как раз и получится 100. Точно так же нетрудно понять и другие записи: $\lg 1000\,000 = 6$; $\lg 2 = 0,3$ и т. д. Логарифм, то есть, попросту говоря, цифра, забравшаяся на место показателя степени, с огромной силой влияет на результат. Так, например, если увеличить логарифм всего в два раза, скажем с 2 до 4, то само число увеличится в 100 раз, а именно со 100 до 10 000 ($\lg 100 = 2$; $\lg 10\,000 = 4$). Можно сказать об этом и другими словами: резкое изменение какого-либо числа приводит к сравнительно небольшому изменению его логарифма. И опять тот же пример, но уже прочитанный в обратном направлении: если увеличить какое-либо число в 100 раз, то его логарифм увеличится всего в два раза (10 000 больше, чем 100, в 100 раз, а $\lg 10\,000$ больше, чем $\lg 100$, всего в 2 раза). Зависимость логарифма от самого числа, к которому он относится, называется логарифмической зависимостью. Именно на нее и похожа зависимость ощущения громкости от силы звука, похожа и по форме (рис. 7.4; 2), и по существу: сильное изменение силы звука приводит к сравнительно небольшому изменению ощущения громкости. Эта зависимость, характерная, кстати, не только для слуха, но и для других «приемников» живой природы⁴, получила название закона Вебера–Фехнера, по имени открывших ее ученых, математика и физиолога.

⁴ Например, для восприятия глазом освещенности поля зрения.

В нашей практической деятельности наступит такой момент, когда мы неотвратимо должны будем вспомнить закон Вебера–Фехнера, чтобы правильно выбрать важный элемент в одной из распространенных электронных схем. А многие музыканты каждодневно собственными мускулами чувствуют справедливость этого закона. Например, скрипачи и пианисты очень легко увеличивают громкость звучания инструмента в области тихих звуков, а вот повышение громкости в области громких звуков требует уже значительных усилий, большой физической работы, в самом прямом смысле этих слов.

16. Бинауральный эффект позволяет определить распределение источников звука в пространстве. Для чего человеку два уха? Для резерва? Возможно... Однако же в сложной системе нашего слуха оба уха работают одновременно, и именно поэтому мы можем определить местонахождение источника звука. Правильнее было бы сказать «вычислить», хотя, конечно, сознательно никаких вычислений мы не производим, все, что нужно, автоматически подсчитывает мозг и выдает нам готовый результат. Например, в виде ощущения, что гитарист в оркестре сидит слева, а пианист – справа. Или что автомобиль приближается к нам сзади (рис. 7.5).

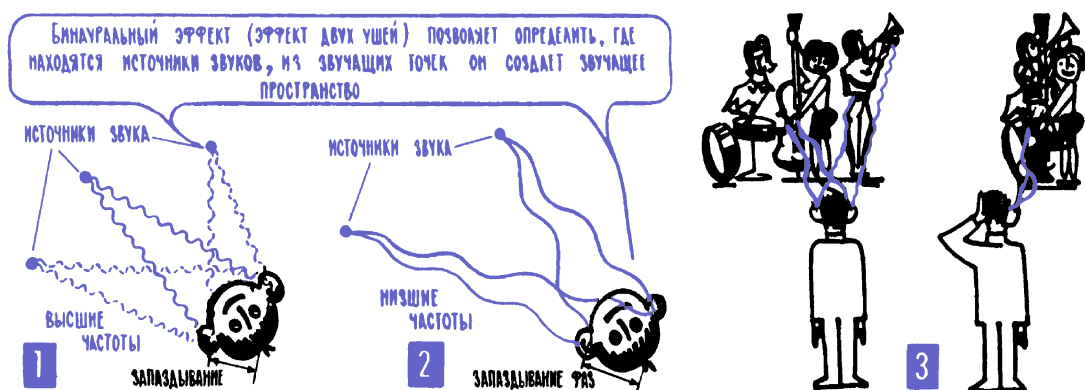


Рис. 7.5. Бинауральный эффект

Информация, необходимая для таких вычислений, появляется именно потому, что мы слушаем одновременно двумя ушами. На низших звуковых частотах регистрируется разность фаз, с которой звуковая волна приходит к правому и левому уху, на высших частотах – время запаздывания звука. Если, например, источник звука находится справа от нас, то к левому уху звуковая волна придет на несколько десятитысячных долей секунды позже, чем к правому. Так способность определять местонахождение источника звука получила название бинауральный эффект, то есть эффект слушания двумя ушами.

17. Органы слуха развивались как средство сбора информации, а затем стали основой для звуковой связи людей. Из каждого уха по слуховому нерву в мозг поступают особые электрохимические сигналы, нервные импульсы, в которых каким-то образом записана информация об услышанном звуке, в частности о его силе и спектре. Слуховой нерв состоит из многих тысяч нервных волокон, в нем самом уже имеется несколько «узлов связи», где происходит предварительная обработка нервных импульсов. Однако основная их обработка и расшифровка осуществляются в специальных участках коры головного мозга, расположенных в височных частях обоих больших полушарий.

Очень немного известно о том, как именно мозг анализирует поступающие в него нервные импульсы, в частности те, что приходят по слуховому нерву. Можно лишь сказать, что обработку нервных импульсов производят сложные клеточные и молекулярные машины, которые работают по сложным и совершенным программам. Их совершенством, поразительным и пока непостижимым, объясняется то, что мы по неуловимым звуковым оттенкам узнаем голос человека, которого не слышали много лет. Или распознаем слова независимо от того, каким голосом, в каком темпе, с какой громкостью и даже с каким акцентом они произнесены.

Органы слуха появились у животных позже всех других систем сбора информации. Специалисты говорят, что произошло это сравнительно недавно, всего сто-двести миллионов лет назад, когда наиболее смелые представители подводного мира стали выбираться на берег, постепенно превращаясь в сухопутных животных. В земных условиях звуковые волны приносят исключительно ценную информацию – журчание ручья, рычание приближающегося хищника, различные шорохи.

Развились органы слуха из боковой линии рыб, своеобразного органа давления, точнее целой цепочки органов, вытянувшихся по обеим сторонам рыбьего тела от головы до хвоста. Боковая линия реагирует на медленные изменения давления, помогает рыбам в темноте огибать препятствия, чувствовать приближение других рыб и даже слышать некоторые звуки. У рыб в основном наблюдаются простейшие реакции на звук: обычно они просто бегут от источника звука. Более поздние творения эволюции – земноводные – умеют уже выделять наиболее важные для них звуковые сигналы. Еще лучше развит слух у птиц. И наконец, у млекопитающих, к классу которых относимся и мы с вами, прием звуковых сигналов и особенно их обработка достигают высочайшего совершенства, становятся одним из главных средств добывания информации об окружающем мире.

Наконец, совсем уже недавно, может быть, миллион лет назад, а может быть, и того меньше, произошли события исключительной важности: совершенный орган слуха стал основой для появления и развития устной речи. Появились принципиально новые возможности общения людей,

возможности человеческого взаимодействия. И главное, развитие звуковой связи, появление звуковых сигналов – слов подняло на совершенно новую ступень одну из наших систем переработки информации – человеческое мышление. Человек стал мыслить короткими, экономными описаниями самых сложных явлений и предметов: вместо подробной картины падающей со скал воды – короткое слово «водопад», вместо детального портрета льва – короткое слово «лев».

Можно смело сказать, что человек стал человеком в значительной мере благодаря именно этому умению передавать свои мысли словами, которое появилось у наших далеких предков с развитием звуковой связи.

18. Природные информационные системы стали основой мышления, а научившись мыслить, человек стал придумывать для себя искусственные информационные системы. Как человек стал великаном? Что помогло ему пройти этот гигантский путь от вечно голодного обитателя темной, сырой пещеры до жителя благоустроенных городов и сел? От дикости, страха и суеверия до нынешнего могущества науки, до антибиотиков, операций на сердце, полетов на Венеру, до всеобщего среднего образования?

Среди многих важных и важнейших слагаемых человеческого прогресса едва ли не самое важное – информация. В процессе труда, в процессе общения людей совершенствовались их собственные природные информационные системы. А потом человек научился помогать этим творениям природы, научился сам создавать искусственные информационные системы, машины, приборы, приспособления, увеличивая тем самым главную свою силу – силу мышления.

К числу первых искусственных информационных приспособлений нужно, наверное, отнести древнейшие наскальные рисунки, первое продолжение человеческой памяти. От них пошло иероглифическое письмо, а затем письмо буквенное, слоговое, это величайшее из человеческих изобретений, позволившее в итоге создавать хранилища неограниченных объемов информации.

Появлялись устройства, помогающие человеку перерабатывать информацию. Типичный представитель таких устройств – электронный калькулятор, он умеет выполнять арифметические операции – складывать, вычитать, умножать и делить, то есть умеет делать то, что, казалось бы, относится к монополии нашего мозга.

В числе бесчисленного многообразия явлений, с которыми встречается человек, есть так называемые лавинообразные процессы. Их главная особенность в том, что, развиваясь, эти процессы сами себя поддерживают, сами себя ускоряют. Типичный лавинообразный процесс – цепная реакция деления урана. Свободный нейтрон, попав в ядро атома урана, разрушает его. При этом из ядра выбрасываются три новых свободных нейтрона, ко-

торые могут разрушить еще три соседних ядра. Каждое из них выбросит свои три нейтрона и т. д.

Число распавшихся атомных ядер будет лавинообразно нарастать: в уране пойдет цепная реакция деления, лавинообразный процесс.

К числу лавинообразных процессов наверняка следует отнести и человеческий прогресс в использовании информации. Совершенствуя методы мышления и создавая новые информационные системы, человек увеличивает свое информационное могущество, а это, в свою очередь, приводит к дальнейшему прогрессу в части создания и совершенствования информационных систем. Для иллюстрации один лишь только пример – математика. Рождением математики, по сути дела, было появление некоторых новых приемов мышления, новых приемов переработки информации. Лавинообразно развиваясь и совершенствуясь, они привели к появлению множества новых мощных и разнообразных математических методов и в итоге позволили решить большое число научных и технических задач, которые без математики решить было бы просто невозможно.

Исключительно важную роль в лавинообразном прогрессе нашего информационного могущества сыграла цепочка событий, которые привели к рождению современной радиоэлектроники.

19. Основная профессия радиоэлектроники – сбор, передача, переработка и хранение информации. Если внимательно присмотреться к окружающим нас электронным приборам и аппаратам, то можно легко увидеть, что все они выполняют в принципе одну и ту же работу – помогают человеку, усиливают его природные способности в части сбора, передачи, хранения и переработки информации.

Что делает радиолокатор? Он позволяет капитану в густом тумане видеть встречные корабли и очертания берегов, позволяет видеть невидимое. А что делает мобильный телефон? Он дает нам возможность переговариваться на таких расстояниях, которые никак не смогла бы пройти звуковая волна. Компьютер? Он считает, сравнивает, сопоставляет новую информацию со старой, хранящейся в его памяти, выполняет логические рассуждения, хранит тексты, изображения и звук, помогает нашему мозгу и памяти.

Одним словом, основное сырье, которое поступает в электронные приборы и аппараты, так же как и основная продукция, которую они выпускают, – это не что иное, как информация.

Менее, чем за сто лет своего существования электроника научилась делать множество самых разных дел, освоила много профессий. Без электроники сегодня немыслима ни одна отрасль человеческой деятельности: медицина, космонавтика, геофизика, авиация, биотехнологии, промышленность, сельское хозяйство... И во всех этих областях электронные приборы доведены до очень высокого совершенства. Они измеряют микро-

скопические перемещения, вплоть до миллиардных долей миллиардной доли миллиметра, передают изображение прямо с поверхности планет, поддерживают ритм сокращения сердечной мышцы, находят в земле полезные ископаемые, автоматически ведут самолеты на посадку при нулевой видимости, регистрируют нервные импульсы, возникающие в одиночной живой клетке.

Основная особенность всех электронных приборов и аппаратов, в значительной мере определившая их удивительные возможности и огромную популярность, состоит в том, что любая информация живет в этих приборах и аппаратах в виде электрических сигналов. И главные операции с информацией: ее передача, переработка, записывание в память, извлечение из памяти – в итоге сводятся к некоторым прекрасно отработанным операциям с электрическими сигналами.



ГЛАВА 8

В переводе на электрический

1. Электрический телеграф: буквы и цифры представлены комбинациями импульсов тока. Одно из самых сложных спортивных соревнований – марафонский бег: состязание в беге на дистанцию 42 км 195 м. Столь необычная дистанция, как и само название «марафонский бег», связана с легендой о греческом воине, который почти две с половиной тысячи лет назад пробежал именно такое расстояние из селения Марафон в Афины с вестью о победе полководца Мильтиада над персами. Напрягая последние силы, добежал гонец до окраины Афин, сообщил радостную весть и упал бездыханным.

Еще каких-нибудь двести лет назад, во времена Пушкина, гонцы-скороходы, всадники, мчавшиеся на взмыленных лошадях, почтовые тройки были главными переносчиками информации на большие расстояния. Иногда проходило несколько месяцев, пока сообщение о событиях в Петербурге добиралось до отдаленных районов Сибири или Дальнего Востока. Лучшие столичные газеты публиковали свежие зарубежные новости недельной давности.

Уже во второй половине XX века телеграмма, отправленная из Ленинграда, через час могла быть вручена адресату во Владивостоке. Редакторы московских газет в любую минуту могли связаться со своими корреспондентами в Париже, Тамбове или Лос-Анджелесе. Сидя у своих телевизоров, миллионы людей видели и слышали в прямой трансляции то, что в данный момент происходит за тысячи километров от их дома.

Все это стало возможно потому, что информацию научились передавать с помощью самого быстрого в мире гонца – с помощью электрических сигналов. Если бы древние греки имели в своем распоряжении батарейку, лампочку и достаточное количество провода, то они могли бы построить простейшую линию электросвязи между Афинами и Марафоном, в виде такого растянутого почти на пятьдесят километров карманного фонарика. Лампочку нужно было бы установить в Афинах, а выключатель – в Марафоне (рис. 8.1; 1) и договориться об условном коде, например о таком: один сигнал, одна вспышка лампочки, означает «победа», две вспышки – «поражение».

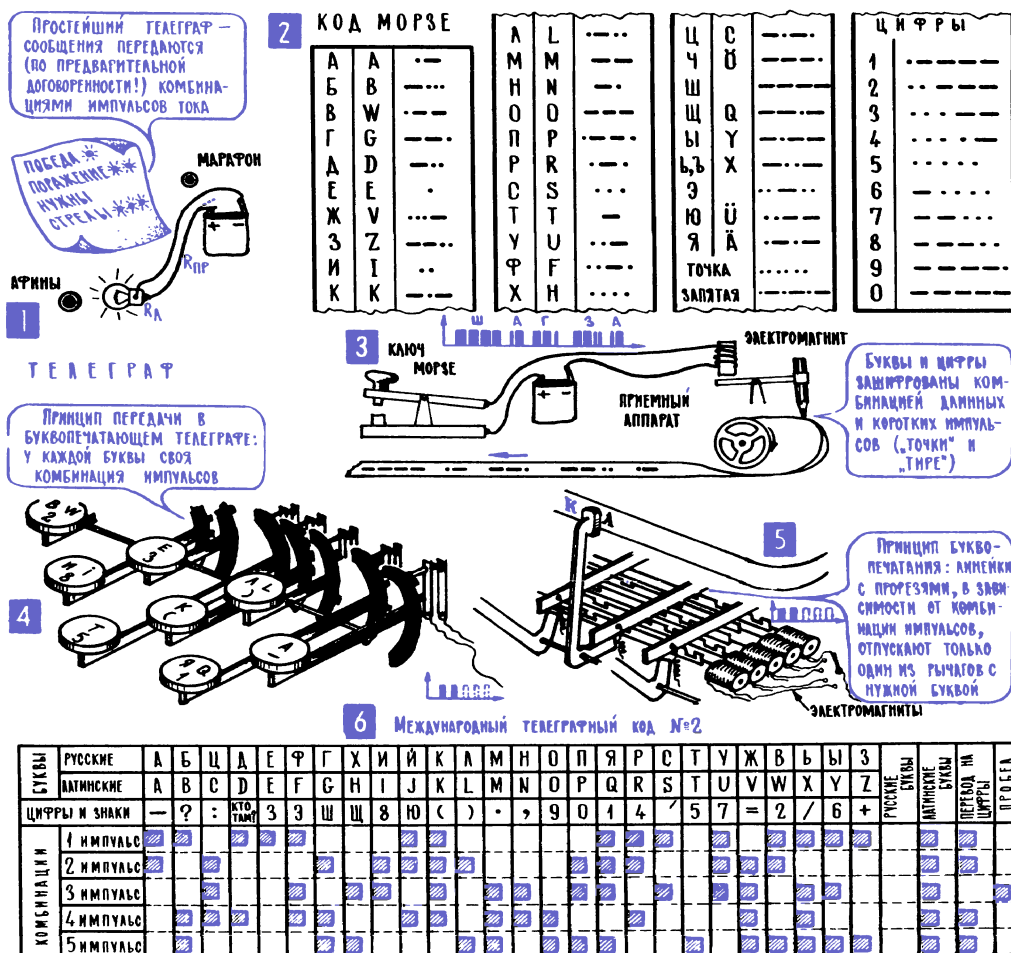


Рис. 8.1. Телеграф

Правда, закон Ома напоминает, что создать линию электросвязи с лампочкой на конце не так-то просто. Для нормального свечения лампочки нужен сравнительно большой ток, а сопротивление многокилометровых проводов велико, и из-за этого на самой соединительной линии будет теряться большое напряжение. Если даже применить сравнительно толстые медные провода, скажем сечением 1 мм^2 (как для сетевой проводки), то и в этом случае общее сопротивление двухпроводной линии протяженностью около 40 км будет около 2 кОм. Даже при очень слабой лампочке для карманного фонарика, которой нужен ток всего 60 мА, понадобится батарея с напряжением около 120 В, чтобы в цепи с сопротивлением 2 кОм создать этот небольшой ток ($120 \text{ В} / 2 \text{ кОм} = 60 \text{ мА}$)¹.

¹ Конечно, использование современных суперъярких светодиодов, которым для свечения достаточно тока в доли миллиампера, решило бы данную проблему, но не принципиально: а как быть при расстояниях в сотни и тысячи километров?

Но оставим пока в стороне электротехнические подробности и вернемся к существу дела – к принципам передачи информации с помощью электрических сигналов.

Хотя настоящий телеграф и похож на нашу линию электросвязи с лампочкой на приемном конце, однако устроен и работает он совсем по-иному. Во-первых, сообщения передаются с помощью условного кода, в котором не событию и не отдельному слову, а каждой букве алфавита, цифре или знаку препинания соответствует определенная комбинация электрических сигналов. Существуют два основных телеграфных кода – код Морзе (иногда говорят – азбука Морзе), в котором используются комбинации «точек» и «тире», то есть коротких и длинных импульсов тока (рис. 8.1; 2), и код Бодо (Международный телеграфный код СИТТ-2), в котором все импульсы одинаковы, а шифр той или иной буквы отличается только комбинациями импульсов и пауз (рис. 8.1; 6).

Приемная телеграфная аппаратура, работающая по коду Морзе, записывает принятые сообщения в виде точек и тире. Аппаратура, работающая по коду Бодо (телетайп), сразу печатает буквенный текст. Знакомое всем слово *телеграф* можно перевести как «пишет на расстоянии», а *телетайп* – «печатает на расстоянии».

2. Замечательные достоинства электрического сигнала: высокая скорость и широкие возможности обработки. Мировой рекорд в марафонском беге чуть меньше 2 ч 18 мин. Электрический гонец проходит марафонскую дистанцию за 0,00015 с – скорость электрического сигнала такая же, как и скорость света, – 300 000 км/с. Не нужно, однако, думать, что с такой гигантской скоростью движутся электроны в электрической цепи, – движение свободных зарядов происходит довольно медленно, за секунду они проходят какие-то миллиметры. Со скоростью света вдоль проводов движется электрическое поле, оно-то и заставляет двигаться заряды сразу по всей цепи. Это несколько напоминает картину трогания с места длинного железнодорожного состава. Первый рыбок электровоза довольно быстро достигает последнего вагона (подобно электрическому полю) и заставляет сразу все вагоны сдвинуться с места, хотя скорость вагонов вначале очень мала (подобно скорости свободных электронов).

Другое важное достоинство электрического сигнала – его, если можно так сказать, исключительная пластичность, податливость самым разным видам обработки. Делитель или шунт может уменьшить напряжение или ток, трансформатор может их увеличить. Направив два тока в общий провод, можно получить суммарный ток, сложить сигналы; изменив направление одного из токов, вы получите разностный сигнал. С помощью фильтров можно разделять сигналы разных частот или отделять постоянные токи от переменных. И это лишь небольшая часть операций, которые производят с электрическими сигналами.

И еще одно достоинство – самые разные физические, химические, биологические и иные показатели легко перевести на электрический язык, отобразить в виде электрических сигналов (рис. 3.7 и 8.2). Так, например, термопара – два определенным образом подобранных металлических проводника (медь – висмут, железо – константан, медь – константан) – при нагревании создает ЭДС, и она тем больше, чем сильнее нагрета термопара. Поэтому любые изменения температуры с помощью термопары отображаются в электрическом сигнале.

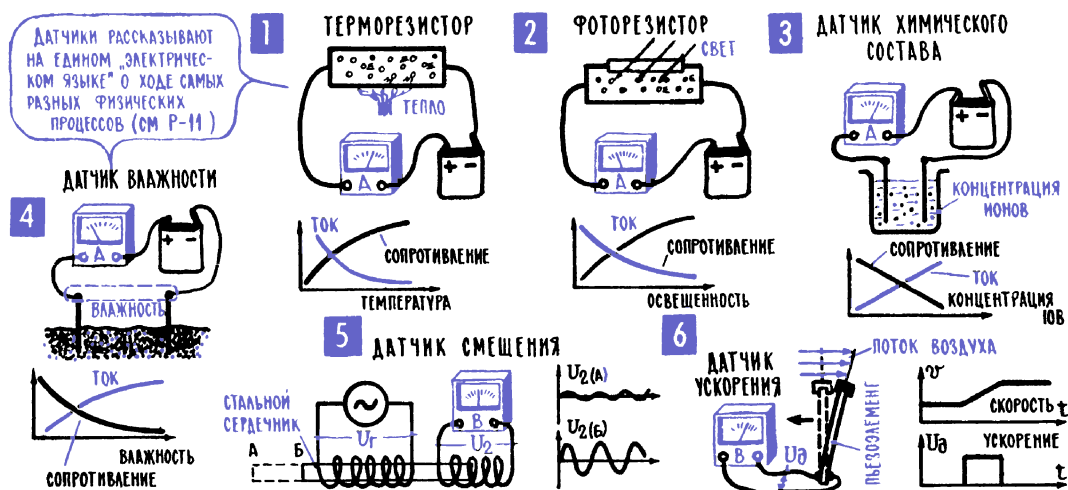


Рис. 8.2. Датчики различных величин

Появление ЭДС в термопаре объясняется тем, что при нагревании энергия свободных электронов в одном из металлов повышается сильнее, чем во втором, электроны переходят из одного металла в другой, и один из них оказывается заряженным положительно, второй – отрицательно. Другой датчик температуры – терморезистор. Его сопротивление меняется с температурой сильнее, чем у рядовых проводников, и поэтому ток в цепи достаточно хорошо повторяет все изменения температуры терморезистора, включенного в эту цепь. Подобным же образом датчики света – фотоэлемент и фоторезистор – переводят на электрический язык информацию об освещенности. Фотоэлемент – это генератор, в нем под действием света происходит обычная электризация электродов: попадая на один из них, порции световой энергии просто вырывают электроны из некоторых атомов, превращают их в положительные ионы. В фоторезисторе под действием света меняется подвижность свободных зарядов, а значит, меняется и сопротивление фоторезистора.

Примечание редактора. Во времена первых изданий книги фотоэлементы еще изготавливались по технологии вакуумных ламп (явление внешнего фотоэффекта), позднее – по полупроводниковым технологиям (внутренний фотоэффект), из

которых затем развилось производство солнечных батарей. В настоящее время в качестве датчиков освещенности фотоэлементы практически не используются; их место заняли полупроводниковые фотодиоды и фототранзисторы. Фоторезисторы почти не изменились с тех времен (за исключением материала светочувствительного слоя) и применяются в качестве датчиков освещенности и поныне, особенно в тех приложениях, где требуется линейная зависимость тока от освещенности.

А вот еще один тип датчика – пьезокристалл. Если сжать такой кристалл, то на его гранях в результате сложных внутренних процессов появятся избыточные электрические заряды, появится ЭДС. Она будет тем больше, чем сильнее сжат кристалл, если заменить сжатие на растягивание, то изменится и полярность ЭДС. Такой пьезокристалл переводит на электрический язык самые сложные движения, перемещения, если они как-то передаются кристаллу.

С одной разновидностью датчиков движения мы сейчас познакомимся несколько более подробно. Это микрофоны – собиратели информации об изменениях звукового давления, переводчики звуковых сигналов на электрический язык.

3. Микрофон создает электрическую копию звукового сигнала. Самый простой и самый распространенный способ перевода звука на электрический язык – это создание точной электрической копии звукового сигнала, создание такого переменного тока или такого переменного напряжения, которые следовали бы за всеми изменениями звукового давления (рис. 8.3). Такое преобразование как раз и осуществляет микрофон.

Существует несколько разных типов микрофонов, все они решают одну и ту же задачу, но используют при этом разные физические процессы. Основа угольного микрофона (рис. 8.3; 1) – мелкий угольный порошок. Под действием звуковых волн частички порошка то сближаются, то, наоборот, несколько отходят друг от друга. При этом меняется сопротивление порошка и ток в цепи, в которую включен микрофон. Для включения угольного микрофона могут понадобиться источник постоянного тока и элемент, который сможет отделить постоянный ток от переменного, появившегося под действием звуковых колебаний. Роль такого разделителя прекрасно выполняет трансформатор (постоянная составляющая просто не создает напряжения во вторичной обмотке), который одновременно, если нужно, может повысить переменное напряжение.

В пьезоэлектрическом микрофоне под действием звуковых волн несколько деформируется пьезокристалл и создает при этом электрическую копию звука (рис. 8.3; 2). В динамическом микрофоне напряжение наводится на легкой подвижной катушке, которую звуковые волны двигают в магнитном поле (рис. 8.3; 3, гл. 5; 10). В ленточном микрофоне вместо катушки одиночный проводник, тончайшая алюминиевая ленточка (рис. 8.3; 4).

Основа электромагнитного (индукционного) микрофона – магнитная цепь из стали, в которой имеется небольшой воздушный зазор (рис. 8.3; 5). Под действием звуковых волн стальная мембрана колеблется, воздушный зазор меняется, вместе с ним меняется магнитное сопротивление всей магнитной цепи, а значит, и общий магнитный поток (гл. 5; 8, 10). Этот поток пронизывает витки неподвижной катушки, и при изменении магнитного потока в ней наводится ЭДС, создается электрическая копия звука. В конденсаторном микрофоне одна из обкладок подвижна, и под действием звуковых волн она колеблется. При этом и емкость конденсатора несколько меняется, повторяя все изменения звукового давления. Конденсатор включен в цепь постоянного тока, и при изменении емкости происходит заряд или разряд конденсатора: если пластины сближаются и емкость растет, то к пластинам движутся дополнительные заряды; если пластины удаляются, то некоторое количество зарядов уходит с них.

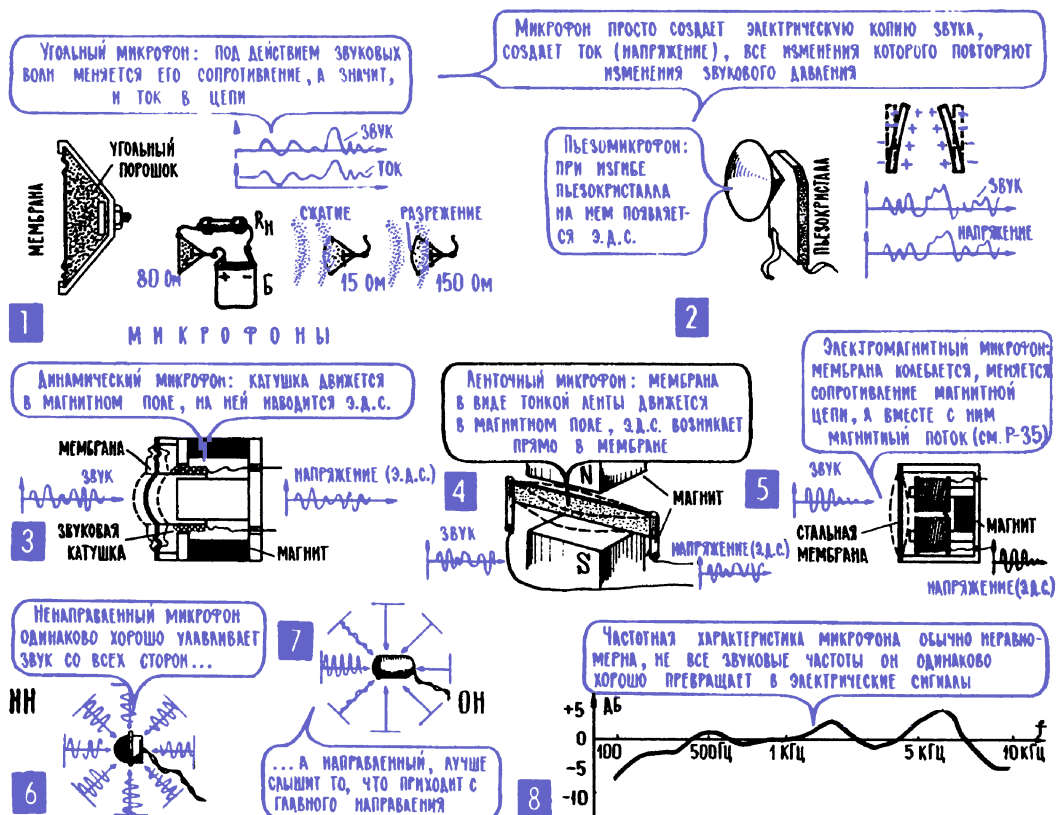


Рис. 8.3. Микрофон

Примечание редактора. Угольные микрофоны применялись на заре существования электроники в простых устройствах, не требовательных к качеству звука (например, в телефонных аппаратах), и давно уже не используются. Современные

микрофоны – обычно либо динамические, либо конденсаторные (последние имеют более высокие характеристики, но дороже и обязательно требуют отдельного питания). Для специальных целей (в ультразвуковых датчиках, сейсмографах и т. п.) применяются также микрофоны оптоэлектрического типа (на основе лазера, по принципу, аналогичному работе компьютерной мыши). Иногда встречаются пьезоэлектрические микрофоны – такие устройства, подобно динамическим головкам, являются обратимыми и могут как воспринимать, так и излучать звук (см. гл. 8; 4).

О достоинствах или недостатках того или иного микрофона рассказывают его характеристики. Такие, например, как чувствительность – она показывает, какое напряжение появляется на выходе микрофона при изменении звукового давления на 1 Н/м^2 . В корпусе некоторых микрофонов находится дополнительное оборудование (трансформатор, микрофонный усилитель), и в этом случае чувствительность указывают для всего комплекса в целом (например, микрофон + трансформатор).

Еще одна важная характеристика микрофона – диаграмма направленности (рис. 8.3; 6, 7). В некоторых случаях, например когда микрофон установлен в зрительном зале и собирает «реакцию публики», он должен одинаково хорошо принимать звуки со всех сторон, то есть здесь нужен ненаправленный микрофон. А бывает, что нужно передать только голос певца или оратора, и тогда лучше будет работать однонаправленный микрофон, он, по крайней мере, не будет собирать лишние шумы, которые приходят к нему с разных сторон.

Другие важные характеристики микрофона удобнее будет представить после того, как мы познакомимся с громкоговорителями.

4. Громкоговоритель создает звуковую копию электрического сигнала. Многие типы электрических генераторов являются машинами обратимыми – они могут работать двигателями, если подать на них напряжение (см. далее рис. 8.6; 1, 2). Точно так же многие типы микрофонов могут производить обратное преобразование – создавать звуковые волны, используя энергию электрического сигнала. Если к определенным граням пьезокристалла подвести напряжение, то в результате все того же пьезоэффекта произойдет некоторая деформация кристалла. А если подвести к нему переменное напряжение, то деформация будет идти непрерывно, кристалл будет двигаться и излучать звуковые волны.

Будет двигаться и создавать звук также мембрана электромагнитного (индукционного) микрофона, если по его катушке пропустить низкочастотный переменный ток. При изменении тока меняется магнитный поток катушки, и мембрана то сильнее, то слабее притягивается к сердечнику электромагнита, совершает колебания (рис. 8.3; 5). Точно так же двигается в поле магнита катушка динамического микрофона – она сама, по сути, представляет собой электромагнит. Магнитное поле катушки, а значит, и

сила ее взаимодействия с внешним постоянным магнитным полем меняется при изменении тока в цепи, заставляя катушку двигаться. Именно электродинамическая система («электро» – это ясно, что такое, «динамо» – значит *движение*) постоянный магнит – подвижная катушка есть основа динамического громкоговорителя (динамика), самого распространенного преобразователя электрических сигналов в звук (рис. 8.3; 4).

5. Телефонная связь: микрофон создает электрическую копию звука, а на другом конце линии громкоговоритель превращает электрический сигнал в звуковой. Микрофон создает электрическую копию звука. Громкоговоритель создает звуковую копию тока. Оба они вместе – микрофон и громкоговоритель – позволяют построить линию телефонной связи, в которой происходит преобразование звук – ток – звук, и информация со скоростью света переносится по проводам на огромные расстояния, практически недоступные звуковой волне. Телефон имеет много общего с телеграфом (гл. 8; 1). И здесь, и там есть передающее устройство – микрофон и телеграфный ключ. Есть приемники информации – мигающая лампочка (самопишущий аппарат) или громкоговоритель. И здесь, и там информация путешествует по проводам в виде электрического сигнала. Но только в телеграфе мы нагружаем электрический сигнал информацией с помощью условного кода, придуманного Самюэлем Морзе или Эмилем Бодо, а в телефоне используем код, придуманный самой природой.

Что такое звуковые волны, которые мы выбрасываем в пространство, когда произносим те или иные слова? Это звуковые сигналы, в характере изменения которых как раз и записана, закодирована та или иная смысловая информация (гл. 7; 12). Телеграфисты должны знать код, с помощью которого они передают сообщения, а вот телефонисты и знать не знают, каким именно способом, в каких именно изменениях звука скрывается «люблю», а в каких «ненавижу». У телефонистов лишь одна задача – копировать, в микрофоне создавать меняющийся ток, точную копию звука, а в громкоговорителе создавать звук, точную копию тока. И если производить копирование точно, не изменяя, не искажая спектр звукового или электрического сигнала, то этот сигнал в итоге создаст точно такой же звук, какой на передающей стороне попал в микрофон (рис. 8.4; 1). И что человеческий голос зашифровал в этом звуке, то и получит человеческое ухо.

Несколько слов о том, как работает «первоисточник» – как рождаются звучащие слова. Все начинается с голосовых связок, они находятся в глубине гортани, на пути постоянного воздушного потока, идущего из легких. Подобно двустворчатой двери, связки расходятся при дыхании, а для образования звука смыкаются и начинают колебаться в воздушном потоке – их размеры и натяжение определяют частоту родившегося звука. Так, у детей и женщин связки короче (18–20 мм; у мужчин – 20–24 мм) и голос более высокий. Но рождение звука связками – это лишь полдела.

Дальше в действие вступают язык, небо, зубы, губы. Они, как и сами связки, по нервным волокнам получают сигналы управления, перемещаются мышцами и, воздействуя на спектр начального звука, формируют произносимое слово.

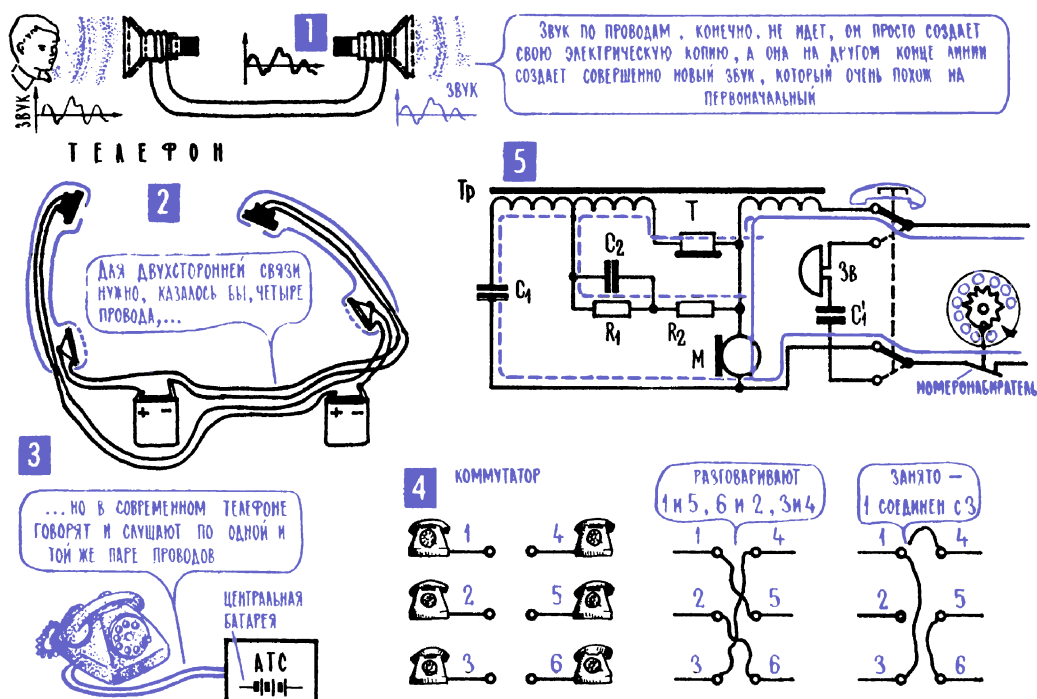


Рис. 8.4. Телефонная связь

Формально телефон не относится к электронике, но мы все же уделим ему некоторое внимание. Хотя бы потому, что каждый человек должен иметь представление о своем верном помощнике – телефоне.

Примечание редактора. В этом разделе автор достаточно подробно рассказывает об устройстве классической телефонной связи, такой, какой она была примерно с 1920-х по 1990-е годы. Современная телефонная связь, как стационарная, так и мобильная, разумеется, базируется на принципиально другой элементной базе: большую часть работы по коммутации и передаче звука выполняют компьютеры; сама по себе передача выполняется в цифровом виде по цифровым каналам (тем же, что лежат в основе интернета), причем чаще всего звук преобразуется в цифровую форму и обратно непосредственно в телефонном аппарате (для мобильной связи это непереносимое условие). Переход на цифровые технологии позволил резко повысить качество телефонной связи, сделать ее качество независимым от расстояния. Однако сам принцип автоматического коммутируемого соединения в соответствии с цифровым номером, о котором рассказывает автор далее, пока не изменился – он одинаков для всех разновидностей телефонной связи, только физически выполняется теперь иначе. Дело, однако, идет к тому, что и этот принцип

в недалеком времени уйдет в прошлое окончательно: столь популярные ныне интернет-мессенджеры устроены принципиально иначе, причем имеют много больше возможностей, чем обычная голосовая телефонная связь.

Линия телефонной связи упрощенно показана на рис. 8.4; 2. Одно из упрощений состоит в том, что на рисунке абонентов соединяют четыре провода, а в действительности удастся обойтись двумя проводами. В телефонных аппаратах имеется устройство, благодаря которому свой собственный сигнал резко ослабляется и не заглушает голос далекого абонента. Поэтому-то свой собственный микрофон и можно подключать к тому же проводу, по которому к тебе издалека приходит сравнительно слабый «чужой» сигнал. Кроме того, в современных системах телефонной связи источник постоянного тока, как правило, находится не в телефонном аппарате, а на центральной станции, и постоянное напряжение подается к абонентам по тем же проводам, по которым идут электрические сигналы (рис. 8.4; 3).

На центральной станции находится и коммутатор, он позволяет любому абоненту большой телефонной сети соединиться с любым другим абонентом (рис. 8.4; 4). Когда-то на станциях стояли ручные коммутаторы – абонент просил телефонистку: «Соедините меня, пожалуйста, с таким-то номером...», и она вручную производила необходимые для этого переключения линий. Сейчас соединения абонентов производятся автоматически, и телефонные станции поэтому называют автоматическими, АТС.

Рисунок 85; 1 поясняет, как работает один из самых первых типов автоматических коммутаторов – декадный (на десять абонентов) шаговый искатель. С телефонного аппарата к нему поступает цифра, закодированная количеством электрических импульсов – от одного до десяти. Каждый такой импульс быстро втягивает сердечник электромагнита, заставляет подвижный контакт искателя сдвинуться на один шаг вперед. Сразу же после этого пружина возвращает сердечник в исходное положение, а подвижный контакт остается на месте в ожидании следующего импульса. (Подвижный контакт вернется в начальное положение только по окончании разговора, после того как в линию пойдет сигнал «отбой».) Подвижный контакт искателя сделает столько шагов, сколько импульсов тока придет к электромагниту, а значит, он по заданному числу импульсов осуществит соединение с нужным абонентом.

В больших городах сотни тысяч, миллионы абонентов, и, конечно, даже и думать нельзя о шаговых искателях с таким гигантским количеством неподвижных контактов (не говоря уже о том, что невозможно было бы посылать «заказ» из нескольких тысяч электрических импульсов). Поэтому используется ступенчатый принцип соединения по разрядам, напоминающий нашу систему десятичного счета, с переходом от одного разряда к другому (рис. 8.5; 2). Первая цифра, первая серия импульсов приводит в

действие первый шаговый искатель, первую декаду этой многоступенчатой системы. Этот искатель выбирает один из десяти искателей следующей «ступени», тот выбирает один искатель из следующего десятка – и так до тех пор, пока линия не подключается к последнему искателю, который как раз и производит окончательное соединение с нужным абонентом. Сигналом для перехода к следующему разряду, для отключения электромагнита работавшего декадного счетчика и включения электромагнита декадного счетчика следующего разряда служит сравнительно длинная пауза между набором соседних цифр (длинная в сравнении с паузами между импульсами одной цифры)².

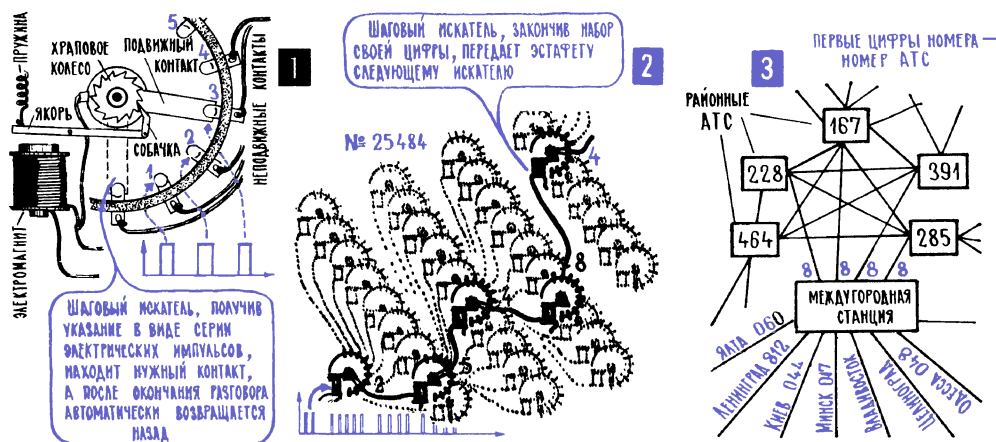


Рис. 8.5. Автоматическая коммутация в традиционной телефонии

Во многих городах имеется несколько АТС, связанных друг с другом большим числом соединительных линий. Первые цифры номера, первые серии импульсов выводят вас на АТС того района, где находится вызываемый абонент (рис. 8.5; 3). В последнее время широкое распространение получило и автоматическое соединение с другими городами. В этом случае первые набираемые цифры – код города – выводят на линию междугородной связи, по которой вы соединяетесь прямо с АТС вызываемого города, а затем уже приводите в действие именно ее коммутаторы, набирая номер своего далекого абонента.

На рис. 8.5; 5 очень упрощенно показана схема телефонного аппарата. Его номеронабиратель при вращении диска разрывает контакты, и в линию идут импульсы тока, которые как раз и приводят в движение шаговые искатели на АТС. Когда на телефонном аппарате лежит трубка, то к соединительной линии подключена его вызывная цепь, проще говоря, электрический звонок – именно на него поступает с центральной станции сигнал

² Согласно ГОСТ 23595–79, частота импульсов замыкания-размыкания линии при наборе цифры номера должна лежать в пределах 8–14,5 Гц; пауза до следующей цифры – не менее 0,2 с.

вызова. А после того как трубка снята, звонок автоматически отключается, к линии присоединяется микрофон и телефон (громкоговоритель), и можно вести разговор.

Рассказывая о телефонной связи, мы допустили некоторую терминологическую неточность, назвав прибор, превращающий ток в звук, громкоговорителем. В действительности же его так называть не следовало бы, так как, во-первых, в телефоне этот прибор создает сравнительно слабый звук, и здесь скорее подошло бы название «тихоговоритель» или, в крайнем случае, название без оценок – «говоритель». Прибор этот нельзя называть громкоговорителем еще и потому, что у него есть узаконенное название – телефонный капсюль, или головной телефон, или, наконец, просто телефон. Это, конечно, большое неудобство – одним и тем же словом «телефон» называть несколько совершенно разных вещей: и всю систему для передачи звука на расстоянии, и отдельный аппарат для этой цели, и только одну его часть – преобразователь тока в звук. Чтобы каждый раз не делать лишних пояснений, пришлось воспользоваться словом «громкоговоритель», временно применив его не по назначению. Сейчас справедливость можно восстановить – отныне громкоговорителями, как и принято, будем называть устройства, которые создают действительно громкий звук в электронной аппаратуре, хотя и здесь мы допустим некоторую неточность в терминологии (см. следующий раздел).

6. Основные детали динамического громкоговорителя: корпус, магнитная система, звуковая катушка, система подвеса катушки, диффузор. Устройство электродинамического громкоговорителя, или, короче, динамического громкоговорителя, или, еще короче, динамика, показано на рис. 8.6; 4. Недавно громкоговоритель стали называть динамической головкой прямого излучения, а название «громкоговоритель» передали мощным акустическим системам, в них обычно входит несколько таких головок, которые мы по старинке будем все же называть громкоговорителями – десятки лет существовало такое название, оно навсегда осело в миллионах радиолубительских книжек и статей.

Примечание редактора. Слово «громкоговоритель» в настоящее время чаще применяют для устройств, выдающих действительно громкий звук, например для уличных рупорных громкоговорителей или ручных мегафонов. Излучатели звукового диапазона на основе электродинамического эффекта, которые описывает автор, чаще принято называть термином «динамическая головка» или просто «динамик», а сделанные на их основе акустические системы – «акустическими колонками», «звуковыми колонками» или просто «колонками». Общая конструкция динамических головок мало изменилась за десятилетия существования, разве что для отдельных деталей (например, постоянных магнитов) стали применяться новые материалы.

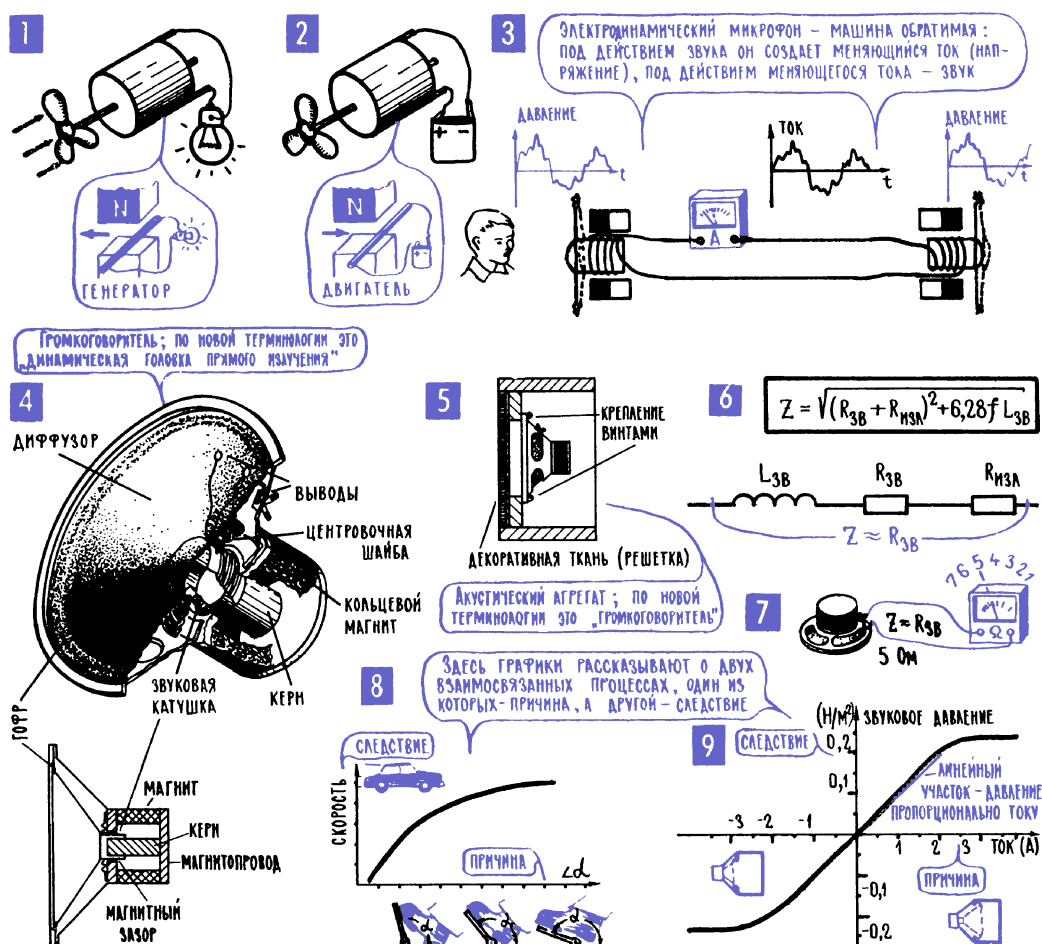


Рис. 8.6. Громкоговоритель (динамик) и его свойства

С тыльной стороны корпуса – магнитная система. В нее входит кольцеобразный магнит из магнитных сплавов или из магнитной керамики – определенным образом спрессованных и «спеченных» порошков, которые содержат ферромагнитные вещества – ферриты. В магнитную цепь входят также стальные фланцы и стальной цилиндр – керн. Только в одном месте стальная магнитная цепь разорвана, имеет кольцеобразный воздушный зазор; именно в этом зазоре находится подвижная катушка, ее обычно называют звуковой катушкой. Чтобы не ослаблять магнитное поле, охватывающее витки звуковой катушки, зазор для нее делают очень небольшим, расстояние между катушкой и стенками «туннеля», в котором она ходит, измеряется долями миллиметра, в худшем случае миллиметрами. Катушка подвешивается на эластичной центрирующей шайбе, и даже не-

большое ее случайное смещение приводит к одному из самых тяжелых повреждений громкоговорителя – катушка начинает задевать за фланец, начинает затирать.

К катушке прикреплен конический диффузор, спрессованный или отлитый из особой бумажной массы. Именно он, двигаясь вместе с катушкой, подобно поршню насоса, увлекает за собой основную массу воздуха. На самом диффузоре закреплены две луженые заклепки – к ним подпаяны выводы звуковой катушки. От этих заклепок отходят два гибких медных многожильных провода, которыми катушка соединяется с внешним миром. Распространенное и устранимое повреждение – обрыв одного из выводов – легко обнаружить, внимательно осмотрев громкоговоритель.

7. Две важные характеристики громкоговорителя – сопротивление звуковой катушки и электрическая мощность. Чтобы громкоговоритель излучал звуковые волны, к его звуковой катушке нужно подвести низкочастотный электрический сигнал – переменное напряжение. Под действием этого напряжения по звуковой катушке пойдет низкочастотный переменный ток, он создаст магнитное поле катушки, оно начнет взаимодействовать с полем постоянного магнита, и катушка придет в движение. Каким будет этот ток, а значит, и интенсивность движения диффузора, зависит не только от напряжения. В соответствии с законом Ома это еще зависит от сопротивления звуковой катушки. Сопротивление это – характеристика сложная, его величину определяют несколько физических процессов. Здесь и обычное активное сопротивление проводов, и те затраты энергии, которые связаны с излучением звуковых волн, и, наконец, индуктивное сопротивление катушки – она, правда, содержит лишь несколько десятков витков, имеет небольшую индуктивность $L_{зв}$, однако на самых высших звуковых частотах и эта индуктивность создает заметное индуктивное сопротивление (гл. 6; 16, рис. 8.6; 6), которое прибавляется к чисто активному, как иногда еще говорят, омическому сопротивлению проводов катушки $R_{зв}$.

Общее сопротивление, которое образуется и чисто активным, и реактивным сопротивлением (индуктивным или емкостным, или обоими одновременно), называют комплексным сопротивлением и обозначают буквой z . Поскольку индуктивная составляющая комплексного сопротивления катушки $z_{зв}$, как и всякая другая индуктивная составляющая, меняется с частотой (гл. 6; 16), то и общее комплексное сопротивление катушки тоже меняется с частотой. В справочных данных сопротивление звуковой катушки $z_{зв}$ указывают для частоты 1000 Гц. Обычно оно всего на 10–20 % больше чисто активного сопротивления катушки, и поэтому, смирившись с некоторой погрешностью, можно считать сопротивлением звуковой катушки именно величину $R_{зв}$. Это очень удобно, потому что $R_{зв}$ можно легко измерить омметром (рис. 8.6; 7).

Другая важная характеристика громкоговорителя – его мощность P . В данном случае понятие мощность имеет тот же смысл, что и для любого другого потребителя энергии: указанная на громкоговорителе или в справочной таблице величина мощности P – это та граница, которую нельзя переходить, то есть та мощность, которую нельзя превышать, подобно тому как нельзя подводить к электрической лампочке, двигателю или электронагревателю мощность большую, чем та, на которую они рассчитаны.

В справочных данных мощность громкоговорителя иногда указывают в непривычных для нас единицах измерения – вольт-амперах (В·А). Произведение тока 1 А на напряжение 1 В дает единицу мощности 1 Вт, то есть можно сказать, что вольт-ампер и ватт – это одно и то же. Для чего же понадобилось иметь две одинаковые единицы мощности? Только для того, чтобы подчеркнуть, что бывает мощность двух видов – активная и реактивная. Активная – это та, которая тут же потребляется нагрузкой и тут же преобразуется в тепло, свет, механическую работу. А реактивная мощность – это та, которую потребляют от генератора реактивные элементы, катушка и конденсатор, и через какое-то время возвращают ее генератору (гл. 6; 14). Так вот, когда речь идет о реактивной мощности или о комплексной (в нее входит и активная, и реактивная), то пользуются единицей вольт-ампер – В·А. А когда мощность чисто активная, то ее отмеряют в ваттах.

Мощность, потребляемая громкоговорителем, – это комплексная мощность (опять-таки в основном за счет индуктивного сопротивления катушки), в справочных таблицах она приводится для частоты 1000 Гц и, естественно, нередко указывается в вольт-амперах – В·А. Но комплексная мощность на частоте 1000 Гц весьма близка к чисто активной мощности P . Поэтому можно смело считать, что громкоговоритель потребляет именно столько, сколько потребляет активное сопротивление $R_{зв}$ его звуковой катушки.

В заключение – несколько слов горькой правды. Динамический громкоговоритель – очень плохой преобразователь энергии, он превращает в звуковые волны лишь два-три процента подводимой электрической мощности (коэффициент полезного действия громкоговорителя составляет 2–3 %). Это значит, что, получая электрическую мощность 10 Вт, громкоговоритель создает звуковые волны мощностью 0,2–0,3 Вт. Правда, к этому ужасающему факту разбазаривания энергии нужно сделать два примечания, в какой-то мере утешительных. Во-первых, на расстоянии в несколько метров мы удовлетворительно слышим звук, если его излучатель создает акустическую мощность около 1–3 мВт (то есть в тысячу раз меньше указанной). Иными словами, мы услышим звучание громкоговорителя, к которому подведена электрическая мощность 50–100 мВт. А это величины сравнительно небольшие – такие мощности подводятся к динамику карманного приемника, мощность, потребляемая лампочкой накаливания

для карманного фонаря³, в несколько раз больше. Для того чтобы создать громкий звук в достаточно большой комнате, вполне хватает электрической мощности 5–10 Вт.

Хуже дело обстоит в установках для озвучивания больших помещений, концертных залов, кинотеатров. Здесь уже нужны звуковые мощности в десятки доли ватта и даже в несколько ватт. А поэтому к громкоговорителям приходится подводить электрическую мощность в десятки и сотни ватт.

И второе утешительное примечание – можно было бы разными способами повысить коэффициент полезного действия громкоговорителя, но при этом ухудшилась бы способность точно, без искажений, изготавливать звуковую копию электрического сигнала. А именно это качество – воспроизведение звука без искажений, а не коэффициент полезного действия – важнее всего для громкоговорителя. И действительно, какой толк в том, что громкоговоритель дает более мощный звук, если вместо «А» он воспроизводит «У» или вместо мелодичного вальса – рев мотоциклетного мотора.

8. График «причина – следствие» рассказывает о работе громкоговорителя. Начнем с примера, не имеющего прямого отношения к громкоговорителю.

Шофер нажимает на педаль акселератора, или, как ее часто называют, педаль газа, и автомобиль набирает скорость. Первый из этих двух процессов (нажатие на педаль) есть причина, второй (увеличение скорости автомобиля) – следствие. Об их взаимосвязи можно рассказать словами или формулой, но проще всего с помощью графика. График (рис. 8.6; 8) покажет, что чем больше угол α отклонения педали, тем выше скорость автомобиля – водитель сильнее нажимает на педаль, в цилиндры двигателя поступает больше горючей смеси. Вначале с увеличением угла α скорость увеличивается довольно резко, но затем график идет все более полого. В значительной мере это объясняется тем, что с ростом скорости автомобиля возрастают разного рода потери энергии, например потери, связанные с завихрениями встречного воздуха. Да и мощность двигателя приближается к своему пределу.

Аналогичный график (рис. 8.6; 9) «причина – следствие» хорошо иллюстрирует и работу громкоговорителя. Причиной здесь будем считать ток в звуковой катушке, следствием – то избыточное давление воздуха, которое создает диффузор (гл. 8; 6). Для начала рассмотрим крайне упрощенную картину – диффузор помещен в небольшую замкнутую камеру и совсем уже напоминает поршень насоса. Чем больше ток в звуковой катушке, тем сильнее она втягивается в магнитное поле постоянного магнита, тем дальше выдвигается диффузор и тем, следовательно, больше давление перед ним. А если поменять направление тока (это обратное направление тока

³ И даже, добавим, современными светодиодными фонарями достаточной мощности.

условно считаем отрицательным), то катушка будет выталкиваться из магнитного поля, диффузор уйдет назад, и перед ним уже появится разрежение, то есть отрицательное давление.

9. На характеристике «причина – следствие» («ток – давление») громкоговорителя есть линейные и нелинейные участки. С увеличением тока в звуковой катушке диффузор вначале выдвигается вперед (или при отрицательном токе уходит назад) и увеличивает (уменьшает) давление, как говорится, по линейному закону – давление прямо пропорционально току. Но затем давление начинает увеличиваться все медленнее и медленнее, график загибается, идет все более и более полого. Наконец, дело доходит до того, что с увеличением тока диффузор вообще перестает смещаться, и давление перед ним остается неизменным. Вот одна из причин этого загиба характеристики – центрирующая шайба все сильнее сопротивляется деформирующей силе и, наконец, полностью исчерпав свои запасы эластичности, вообще перестает изгибаться. Здесь самый момент прекратить эксперименты, приостановить дальнейшее увеличение тока. Иначе катушку может просто-напросто вырвать из системы подвеса. Или из-за слишком большого тока она может перегреться и перегореть.

Самое важное, о чем рассказали наши простейшие мысленные эксперименты с громкоговорителем, – так это то, что на его характеристике есть линейные и нелинейные участки (изгибы).

В нашем конкретном примере (рис. 8.6; 9) линейный участок соответствует токам от -2 А до $+2$ А. За этими пределами, то есть при токах более сильных, чем $+2$ А и -2 А, характеристика загибается, становится нелинейной. Протяженность линейного участка практически и определяет ту электрическую мощность, которую можно подводить к громкоговорителю, а значит, и мощность излучаемого звука.

10. Совместив график электрического сигнала с характеристикой «ток – давление», можно получить график звука. Сейчас нам предстоит произвести довольно простую операцию – совмещение графиков, рассказывающих о том, что происходит в громкоговорителе. В дальнейшем мы будем часто выполнять точно такие же операции применительно к другим устройствам – трансформаторам, транзисторам, электронным лампам, – и есть смысл на примере громкоговорителя внимательно посмотреть, как это делается, чтобы потом уже не касаться технической стороны дела.

Будем считать, что в нашем распоряжении есть график электрического сигнала, график, который показывает, как именно меняется ток в звуковой катушке с течением времени. А задача сводится к тому, чтобы узнать, каким будет звуковой сигнал, который создаст громкоговоритель. То есть задача сводится к тому, чтобы построить график этого звукового сигнала, описать его изменение во времени.

За основу берем характеристику «ток – давление» (рис. 8.6; 9, рис. 8.7; 1) именно она показывает, как зависит давление перед диффузором от тока в звуковой катушке, а значит, именно эта характеристика позволит узнать, каким будет звуковой сигнал, как будет меняться звуковое давление, если меняется ток.

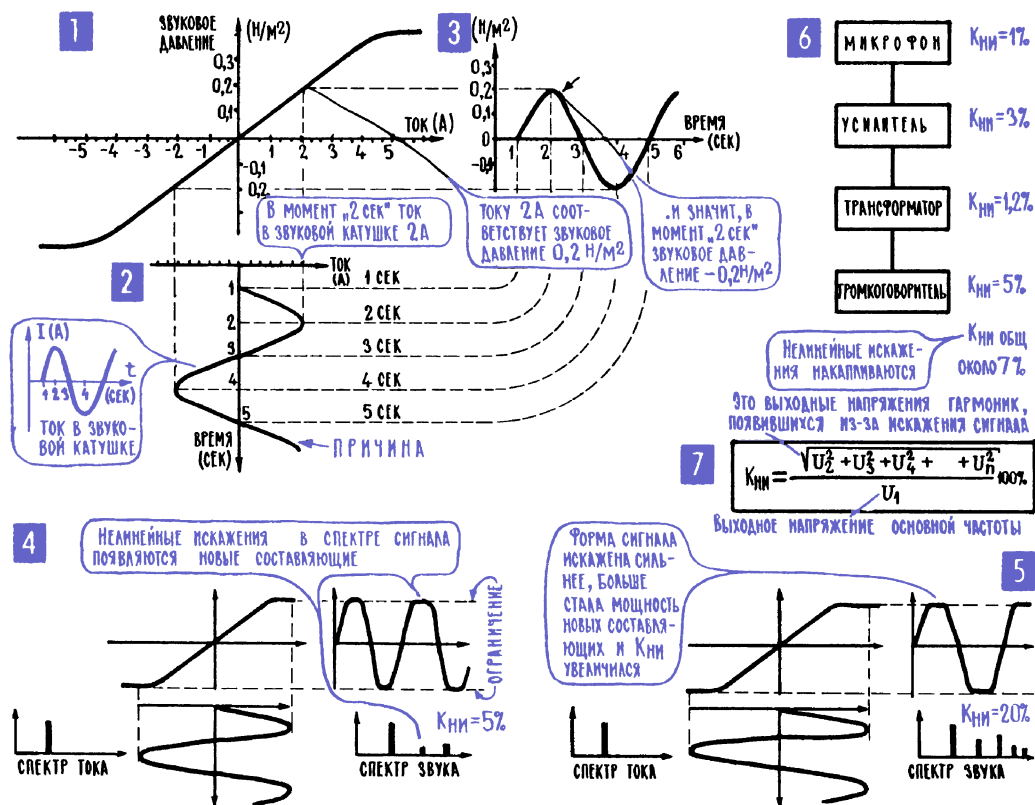


Рис. 8.7. Искажения в громкоговори́теле (динамике)

К характеристике «ток – давление» пристыковываем график тока (рис. 8.7; 2), повернув его, положив его на бок с таким расчетом, чтобы ось тока этого графика совмести́лась с осью тока на характеристике «ток – давление» (рис. 8.7; 1). Эта операция – всего лишь стремление к удобству: теперь мы сможем легко и быстро от одного графика переходить к другому, для этого достаточно провести между ними короткую пунктирную линию. Отметим, например, что в момент 2 с ток в звуковой катушке равен 2 А, и тут же перейдем к характеристике «ток – давление», определим, что под действием тока 2 А громкоговоритель создаст звуковое давление 0,2 Н/м². И подведем итог – в момент 2 с перед диффузором будет давление 0,2 Н/м². Отсюда уже остается буквально один шаг до графика звукового сигнала. Пристыкова́в к характеристике «ток – давление» две перпендикулярные

оси (рис. 8.7; 3), будем определять звуковое давление для разных моментов времени и строить график звукового сигнала.

11. Нелинейные искажения: в спектре сигнала появляются посторонние составляющие. Совмещенные графики – характеристики «ток – давление», график тока и график звука – подробно рассказывают, как создается звуковой сигнал и каким он получается. Говорят они, в частности, о том, что частота звука равна частоте тока, что с увеличением амплитуды тока растет и амплитуда звукового сигнала, что характер изменения звука, форма его графика, в точности повторяет график электрического сигнала (рис. 8.7; 2, 3).

Этот последний вывод, однако, справедлив только в случае, если ток не выходит за пределы линейного участка характеристики «ток – давление». Если же ток заходит в область загибов этой характеристики, то прямая пропорциональная зависимость между током и давлением нарушается, и график звука уже становится непохожим на график тока (рис. 8.7; 4, 5). Такое искажение сигнала называется нелинейным.

В результате нелинейных искажений в спектре сигнала появляются новые составляющие, в частности новые гармоники, составляющие с частотами, кратными основной частоте (гл. 7; 13). Практически мы слышим нелинейные искажения в виде различных посторонних хрипов и скрежетов, звук из-за них становится грязным, хрипловатым. Здесь, правда, все еще зависит от того, насколько далеко ток зашел в нелинейную область характеристики, насколько велики нелинейные искажения.

12. Коэффициент нелинейных искажений показывает, какой процент общей мощности приходится на долю посторонних составляющих. Чтобы оценить, насколько же сильно искажается сигнал, можно просуммировать всю появившуюся «грязь», просуммировать мощность всех новых, никому не нужных составляющих и посмотреть, каков удельный вес этой мощности в выходном сигнале. Именно об этом и говорит коэффициент нелинейных искажений – $K_{ни}$. Чтобы определить его, на вход устройства (в данном случае речь идет о громкоговорителе, но, как мы скоро увидим, нелинейные искажения могут возникать и в других элементах электронной аппаратуры) подают чистую синусоиду, а на выходе раздельно измеряют мощность этой синусоиды и мощность гармоник, которые появились в результате нелинейных искажений. Определенное соотношение этих мощностей (рис. 8.7; 7), выраженное в процентах, и есть коэффициент нелинейных искажений $K_{ни}$. Чаше $K_{ни}$ выражают не через мощности, а через звуковое давление, от которого, как известно, и зависит мощность звука.

Без лишних рассуждений можно сказать, что чем меньше $K_{ни}$, тем лучше, тем чище звук. Наше ухо замечает нелинейные искажения уже в 3–5 %,

а искажения в 8–10 % сильно ухудшают качество звучания музыки. При воспроизведении речи $K_{\text{ни}}$ может быть несколько больше. К сожалению, если сигнал проходит последовательно несколько устройств (микрофон, линия, громкоговоритель), то нелинейные искажения суммируются. Это, правда, не простая арифметическая сумма, суммирование производится более сложным образом, но во всех случаях чем больше «слагаемые», чем больше искажения на отдельных участках, тем больше и суммарные искажения. Вот почему нелинейные искажения стараются свести к минимуму в любом участке тракта, по которому путешествует сигнал, и часто ведут борьбу не только за каждый процент коэффициента нелинейных искажений, но даже за каждую десятую долю процента.

Нелинейные искажения ограничивают и максимальную громкость звучания громкоговорителя. Он, может быть, мог бы создавать и более мощный звук, но при этом нелинейные искажения были бы недопустимо большими. Мощность была бы получена слишком дорогой ценой. Вот почему, указывая мощность громкоговорителя, часто делают оговорку: «При нелинейных искажениях не более столько-то процентов». К сожалению, линейные участки характеристики «звук – давление» тоже не идеальны, они также имеют некоторую кривизну. И поэтому нелинейные искажения, правда небольшие, возникают во всех режимах работы громкоговорителя. Но конечно, наиболее сильные искажения появляются при перегрузке громкоговорителя, когда к нему подводится чрезмерно мощный электрический сигнал.

13. Частотные искажения: в спектре сигнала меняются соотношения между отдельными составляющими. Другой вид искажений формы сигнала, с которым мы встречаемся в громкоговорителе, а затем еще не раз встретимся в других устройствах, – это частотные искажения. Здесь никакие новые составляющие в спектре не появляются, а меняются соотношения между «старыми» составляющими сигнала (рис. 8.8).

Наш слух очень сильно ощущает частотные искажения. Из-за них меняется тембр звука, неузнаваемыми становятся голоса певцов, из оркестра исчезают целые музыкальные инструменты. Если ослабляются составляющие низших частот, то едва слышен барабан, куда-то далеко уходит контрабас, звук становится сухим, резким. А если ослабляются составляющие высших частот, то слабо звучат флейты, скрипки, звук становится глухим, бубнящим, пропадает его чистота и прозрачность.

Откуда появляются частотные искажения? Кто виноват в нарушении пропорций между составляющими спектра? Конечно же, эти искажения могут появиться в некоторых цепях переменного тока, по которым путешествует электрический сигнал. Вспомните, что реактивные элементы катушка и конденсатор имеют различное сопротивление на разных частотах

(гл. 6; 14, 16), а значит, эти элементы по самой своей природе будут создавать частотные искажения. И только некоторые особые меры помогают уменьшить эти вредные действия реактивных элементов или даже полностью их компенсировать.

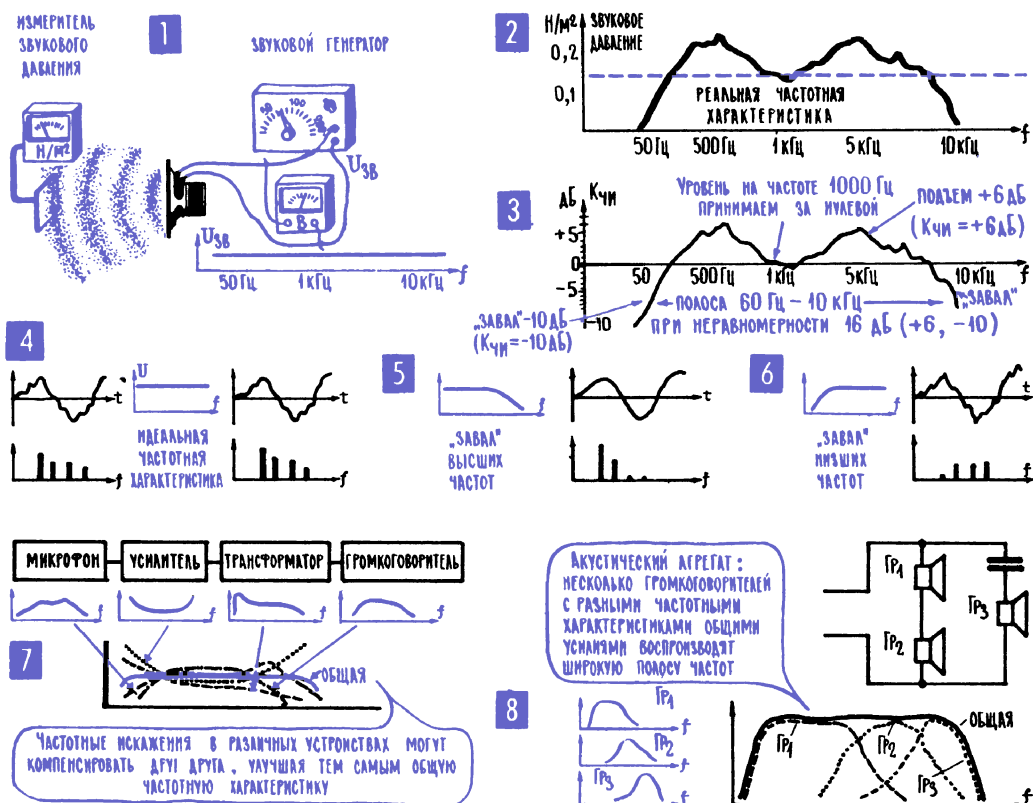


Рис. 8.8. Частотные свойства громкоговорителей (динамиков)

В этом отношении частотные искажения в принципе отличаются от нелинейных. Если в сигнале появились новые гармоники, новые составляющие, то полностью избавиться от них уже невозможно. А вот если какой-либо участок тракта создает частотные искажения, то на другом участке их можно искусственно скомпенсировать, поднять чрезмерно ослабленные составляющие. Это, кстати, делают с помощью все тех же реактивных элементов, чаще всего с помощью определенным образом подобранных конденсаторов. И получается, что в одном месте реактивные элементы создают частотные искажения, а в другом месте специально введенные иные реактивные элементы (элементы коррекции) уменьшают эти искажения. Таковы самые общие, самые предварительные замечания.

14. *Частотная характеристика громкоговорителя показывает, насколько хорошо он преобразует ток в звук на разных частотах.* С частотными характеристиками мы уже встречались, когда пытались выяснить, как ведут себя те или иные элементы электрической цепи при изменении частоты переменного тока (гл. 6; 18). Для того чтобы получить частотную характеристику громкоговорителя, нужно подвести к нему переменное напряжение, менять частоту этого напряжения (поддерживая все время одинаковой его амплитуду, число вольт) и одновременно измерять звуковое давление (рис. 8.8; 1). Желаемая частотная характеристика громкоговорителя – прямая линия, она говорит о том, что громкоговоритель будет одинаково хорошо преобразовывать ток в звук на всех частотах. Пусть даже не на всех. На всех, пожалуй, и не нужно, идеальным вполне можно было бы назвать громкоговоритель, если бы его частотная характеристика была прямой в диапазоне примерно от 20 Гц до 20 кГц, то есть в том диапазоне, в котором слышит человеческое ухо.

Однако же таких громкоговорителей, к сожалению, не бывает.

Одна из причин частотных искажений в громкоговорителе – сама звуковая катушка. С частотой ее индуктивное сопротивление растет, ток в катушке падает, а значит, она слабее взаимодействует с внешним магнитным полем. Но это далеко не самое страшное. В громкоговорителе есть механические колебательные системы, напоминающие гитарную струну. Это прежде всего сам диффузор, который, как и струна, обладает определенной массой и упругостью. Колебательные системы громкоговорителя, как и любые колебательные системы, на определенных частотах резонируют, и из-за этого на частотной характеристике появляются острые выбросы «пиков». Но и это еще не все.

Частотные характеристики громкоговорителя с большим диффузором имеют понижение, или, как принято говорить, завал, в области высших частот – за счет большой инерции большому диффузору, захватывающему большие объемы воздуха, с увеличением частоты все труднее следовать за изменениями тока. Но зато громкоговорители с большим диаметром диффузора хорошо воспроизводят низшие звуковые частоты, и их так и называют – низкочастотными. А маленькие диффузоры, наоборот, легко двигаются на высших частотах, но плохо излучают на низших, за что их и называют высокочастотными. Есть громкоговорители универсальные, они удовлетворительно воспроизводят и весьма высокие частоты, и довольно низкие. Однако же если хотят воспроизвести очень широкую полосу звуковых частот, то создают акустические агрегаты, куда входят и низкочастотные громкоговорители, и высокочастотные (рис. 8.8; 8).

Частотная характеристика громкоговорителя должна представлять собой график зависимости звукового давления (или силы звука) от частоты переменного напряжения, которое подводится к звуковой катушке. Но час-

то характеристику эту изображают иначе. Звуковое давление на некоторой частоте, обычно на частоте 1000 Гц, принимают за единицу и на частотной характеристике показывают лишь изменения силы звука (звукового давления) по отношению к этой средней величине. Возле вертикальной оси ставят букву K или $K_{\text{чи}}$, обозначая таким образом коэффициент частотных искажений – он показывает, на сколько децибел (во сколько раз) звуковое давление на данной частоте больше (положительный $K_{\text{чи}}$) или меньше (отрицательный $K_{\text{чи}}$), чем на средней частоте 1000 Гц (рис. 8.8; 3). У идеального громкоговорителя звуковое давление на всех частотах одинаково, а значит, $K_{\text{чи}}$ всегда равен нулю, частотных искажений нет.

15. Акустический экран препятствует завалу низших звуковых частот. Когда диффузор движется вперед, он создает перед собой область сжатия, а позади – область разрежения. Во время обратного движения диффузора область сжатия появляется с тыльной стороны громкоговорителя, а впереди него – область разрежения. Иными словами, громкоговоритель одновременно излучает две звуковые волны (рис. 8.9; 1), причем сдвинутые по фазе на полпериода, на 180° . И если обе эти волны одновременно придут к нашему уху, то мы вообще ничего не услышим – противофазные волны просто скомпенсируют друг друга. В реальном случае полного взаимного «пожирания» звуковых волн не происходит (хотя бы потому, что диффузор вперед излучает эффективнее, чем назад), но ослабить друг друга они могут весьма заметно. Причем главным образом в области низших частот. Дело в том, что звуковая волна, которую создает тыльная, задняя поверхность диффузора, приходит к слушателю путем несколько более длинным, чем основная волна, и появляется некоторый дополнительный сдвиг фаз между этими звуковыми волнами. На высших звуковых частотах, которым соответствуют более короткие волны, даже небольшой разницы в путях от диффузора до уха достаточно, чтобы в прошлом противофазные волны пришли к станции своего назначения – к уху – в полном согласии, в фазе. А вот на самых низших частотах и даже на средних частотах дополнительный сдвиг фаз получается небольшим, и звук заметно ослабляется. Способ борьбы с этой довольно-таки серьезной неприятностью напрашивается сам собой: нужно просто удлинить путь, по которому «задняя» звуковая волна идет к уху. Иногда это делают с помощью акустического экрана (рис. 8.9; 2) – достаточно толстой (10–20 мм) доски из фанеры, дерева или древесно-стружечной плиты.

16. Корпус – важный элемент акустических установок. Если когда-нибудь вам придется конструировать акустическую систему, то сделайте простой эксперимент: сначала послушайте громкоговоритель, не вставляя его в корпус, на весу, а затем вставьте громкоговоритель в корпус и послу-

шайте его еще раз. Вы наверняка отметите огромную разницу в звучании: «голый» громкоговоритель звучит значительно тише, средние и особенно низшие частоты сильно завалены, их почти не слышно.

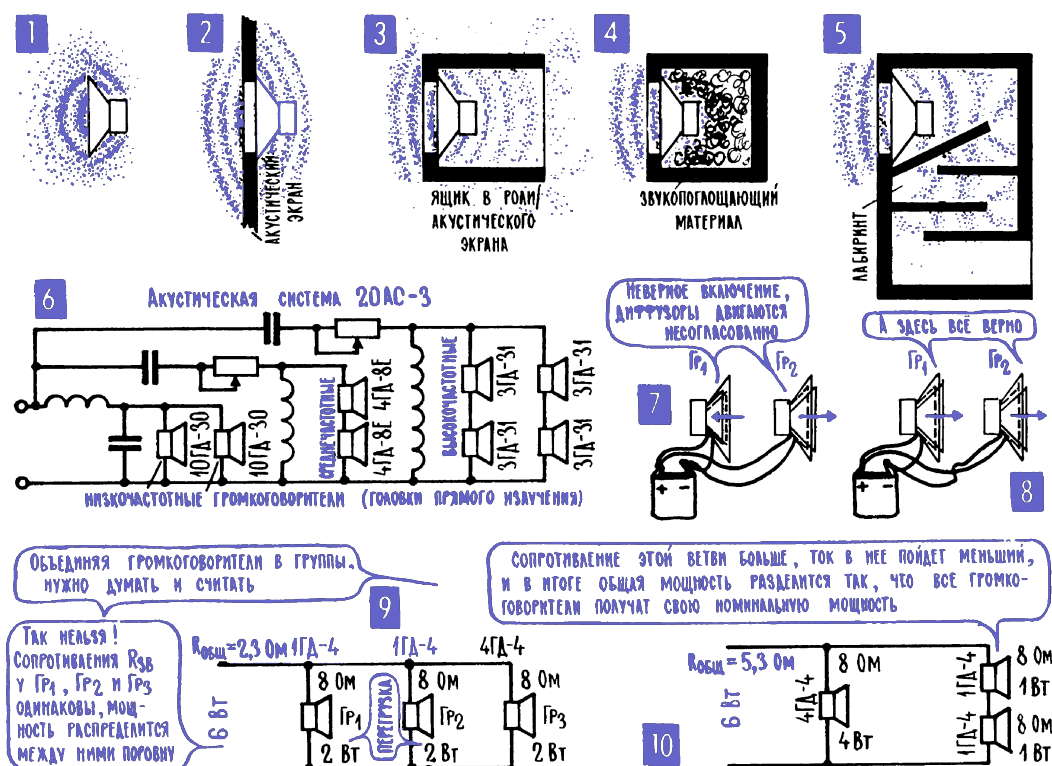


Рис. 8.9. Акустические системы (колонки)

Деревянный или пластиковый корпус – это не просто декоративная деталь, он сильно влияет на качество звучания, причем сразу несколькими «рычагами». Во-первых, он выполняет роль акустического экрана (рис. 8.9; 3). Во-вторых, корпусу передаются колебания диффузора, и он сам превращается в излучатель звука. Излучатель довольно большой, а значит, увеличивающий звуковую мощность, особенно в самой трудной области – на низших звуковых частотах. Вот почему, конструируя корпуса для акустических агрегатов, думают не только о красоте форм или о внешней отделке. Главное внимание обращается на то, как использовать корпус для улучшения качества звучания, в частности для выравнивания частотной характеристики. Есть несколько приемов формирования необходимых акустических характеристик корпуса. Один из них – размещение громкоговорителей не только на передней стенке, но и на боковых. Это улучшает диаграмму направленности акустического агрегата, он более равномерно излучает звук во всех направлениях, создает ощущение объ-

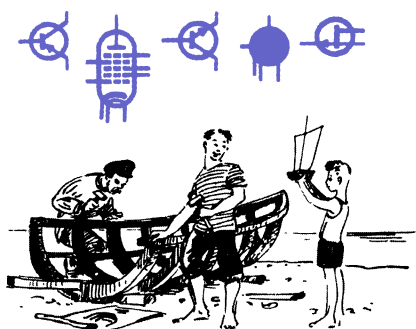
емного звучания. В некоторых случаях корпус заполняют звукопоглотителем, например ватой или стеклянной ватой, и этим несколько ослабляют неприятные резонансные явления в системе громкоговоритель – корпус.

Для подъема частотной характеристики в области низших частот в корпусе делают специально рассчитанные акустические лабиринты и фазоинверторы (рис. 8.9; 5) – устройства, которые определенным образом поворачивают фазу звуковой волны, создают условия для складывания, суммирования звуков, излучаемых разными участками акустического агрегата. На рис. 8.9; 6, 10 приведены типичные схемы акустических систем. Такие агрегаты, или, как их чаще называют, звуковые колонки, рассчитаны на разные типы громкоговорителей, на разную подводимую мощность. В зависимости от способов соединения громкоговорителей может быть различным и их общее сопротивление (рис. 8.9; 9, 10). Кстати, соединяя громкоговорители в группы, нужно их фазировать – то есть сделать так, чтобы все диффузоры одновременно двигались в одну и ту же сторону. Фазировку проще всего осуществить с помощью гальванического элемента, наблюдая, куда смещается диффузор при подаче тока (рис. 8.8; 7, 8).

Мощности, указанные на рис. 8.8; 9, 10, дают нам повод (таких поводов, правда, и раньше было довольно много) задуматься над проблемой, которая неизбежно ведет к следующей главе. Для создания достаточно громкого звука нужен электрический сигнал мощностью в несколько ватт, а то и в несколько десятков ватт. Даже в карманном приемнике, от которого особой громкости никто не требует, и то нужен электрический сигнал мощностью в десятые доли ватта.

А теперь попробуем подсчитать мощность, которую могут обеспечить наши главные поставщики электрической копии звука – микрофоны. Даже сравнительно громким звукам, уровню громкости 60 дБ, соответствует сила звука, то есть мощность, переносимая звуковой волной, всего $0,000001 \text{ Вт/м}^2$. Если предположить, что площадь воспринимающей части микрофона составляет 10 см^2 ($0,001 \text{ м}^2$), то окажется, что микрофон получает от звуковой волны всего 10^{-9} Вт , то есть одну миллиардную ватта. Это – мощность звука, который поступает в микрофон, а мощность электрического сигнала на его выходе еще во много раз меньше – коэффициент полезного действия микрофона также составляет всего несколько процентов.

Из этого можно сделать только один вывод. На пути от устройства, где рождается электрическая копия звука, до устройства, где электрический сигнал создает звук, проще говоря, на пути от микрофона до громкоговорителя, необходим еще один элемент – усилитель.



ГЛАВА 9

Создание мощной копии

1. Одна из самых распространенных операций с электрическими сигналами – их усиление. Всякое электронное устройство – это своеобразный мир электрических сигналов. Здесь они зарождаются и умирают, сюда сигналы приходят из других устройств, из других электронных миров, чтобы, пробежав по многочисленным электрическим цепям, претерпев множество самых удивительных превращений, обернуться прекрасной мелодией, красочной картинкой на телевизионном экране или включением тормозного двигателя на космическом корабле. Сигналы приходится усиливать из-за того, что тем или иным электронным устройствам для их нормальной работы нужны сигналы значительно более мощные, чем имеются в наличии.

Один пример мы уже упоминали (гл. 8; 16) – мощность электрических сигналов на выходе микрофона измеряется миллиардными долями ватта, а громкоговорителю требуются целые ватты. Такие же примеры можно найти в любом звуковом устройстве – например, после считывания музыкальной записи с компакт-диска или флеш-карты появляются чрезвычайно слабые электрические сигналы. Еще пример: к антенне автомобильного приемника радиоволны приносят электрический сигнал в тысячные доли микроватта, а динамикам нужны все те же ватты. И в телевизоре мощность сигнала нужно увеличить в миллиарды раз, чтобы можно было нарисовать картинку на экране. Усиление необходимо во многих устройствах автоматики и телеуправления, в таких, например, как автоматический турникет в метро, который по слабенькому сигналу от оптического датчика с силой выталкивает заградительные рычаги, если вы, задумавшись, забыли поднести проездной.

Коротко говоря, электрический сигнал приходится усиливать во всех случаях, когда появляется несоответствие между «нужно» и «есть». А это несоответствие в электронных системах сбора, передачи, хранения и переработки информации наблюдается очень часто.

Примечание редактора. В большинстве приведенных здесь примеров, строго говоря, речь идет не столько об усилении, сколько о преобразовании сигнала (это стало очевидно, когда они были несколько модернизированы в соответствии с со-

временными реалиями). Понятно, что на современных носителях звук не хранится непосредственно в виде кривой, описывающей его изменения, как это было на магнитной ленте или виниловой пластинке ранее. На флеш-карте или компакт-диске звук хранят в виде цифрового описания этой кривой в отдельных точках, и для того чтобы его воспроизвести, описание это сначала придется раскодировать и подвергнуть обратному преобразованию в непрерывную кривую (цифроаналоговому преобразованию). Однако после такого преобразования обычно все равно требуется усиление в смысле, который подразумевал автор, – т. е. создание более мощной копии сигнала (см. далее), хотя оно и может выполняться не всегда так, как описывается далее.

А вот пример с турникетами в метро не полностью соответствовал этой формулировке и во времена автора: здесь речь идет о подаче нужного управляющего импульса на электромагнитные приводы рычагов, и такой импульс, конечно, не является «мощной копией» сигнала оптического датчика. В устройствах автоматики уместнее говорить о том, что управляющий сигнал является *причиной* срабатывания (или *командой* на срабатывание) – подобно тому, как нажатие на курок является причиной выстрела из ружья, а сам выстрел какой-то «копией» нажатия назвать нельзя.

2. Усилить электрический сигнал – это значит создать точно такой же по характеру изменения сигнал, но большей мощности. Начнем с примера, который не имеет никакого отношения к электронным схемам, но зато помогает легко понять, в каком именно смысле применяется слово «усиление», когда речь идет об электрических сигналах.

С некоторого времени знаменитая футбольная команда «Гювейч» из города N неожиданно для всей спортивной общественности начала вписывать в турнирную таблицу один ноль за другим. И болельщики только о том и говорят, как усилить любимую команду, как улучшить ее игру. Из всех высказанных предложений остановимся на двух.

Первое предложение. Резко увеличить время тренировок и занятий по тактике футбола. Улучшить питание футболистов, условия их отдыха. Результат – команда играет лучше, сильнее, происходит усиление команды.

Второе предложение. Тренера сменить. Команду расформировать, пригласить новых, более сильных игроков. Результат – команда играет лучше, сильнее, произошло усиление команды. Но, может быть, в этом случае правильнее было бы говорить не об усилении, а о замене? Нет, нет и нет – отвечают болельщики. Замена игроков – это мелочь, второстепенная деталь. Главное в том, что команда с тем же названием «Гювейч», выступающая в той же форме (оранжевые майки, фиолетовые трусы), защищающая футбольную честь того же прекрасного города N и пока занимающая в турнирной таблице все то же последнее место, стала играть лучше. А значит, произошло не что иное, как усиление команды.

Примерно такой смысл имеет слово «усиление» в радиоэлектронике. При усилении слабого электрического сигнала с помощью дополнительных источников энергии создается новый мощный сигнал, который, одна-

ко, сохраняет главную особенность слабого – характер изменения, форму графика. Иными словами, усиление слабого электрического сигнала – это создание его мощной копии.

3. Усилители – большой класс систем, в которых слабое, маломощное воздействие управляет мощными потоками энергии. Давайте просверлим в нижней части ведра небольшое отверстие (это вполне может быть мысленный эксперимент, то, что в нем должно произойти, легко увидеть силой воображения, и наносить ущерб хозяйству, делая дырку в ведре, совсем не обязательно), напомним ведро водой и подставим под струю небольшую вертушку с лопастями, некоторое подобие рабочего колеса водяной мельницы (рис. 9.1; 1). Вначале, когда воды в ведре много, из отверстия вырывается довольно сильная струя, колесо вращается быстро. По мере того как уровень воды падает, струя становится все более вялой, и вращение колеса замедляется. Это нормальный процесс передачи энергии: потенциальная энергия поднятой на высоту воды переходит в кинетическую энергию струи, а она, в свою очередь, передается колесу-вертушке. Если не думать о потерях, то можно сказать, что сколько дает источник энергии (вода в ведре), столько и получает потребитель (вертушка). И на сколько уменьшится или увеличится энергия, которую поставляет источник, на столько же уменьшится или увеличится и энергия, получаемая потребителем.

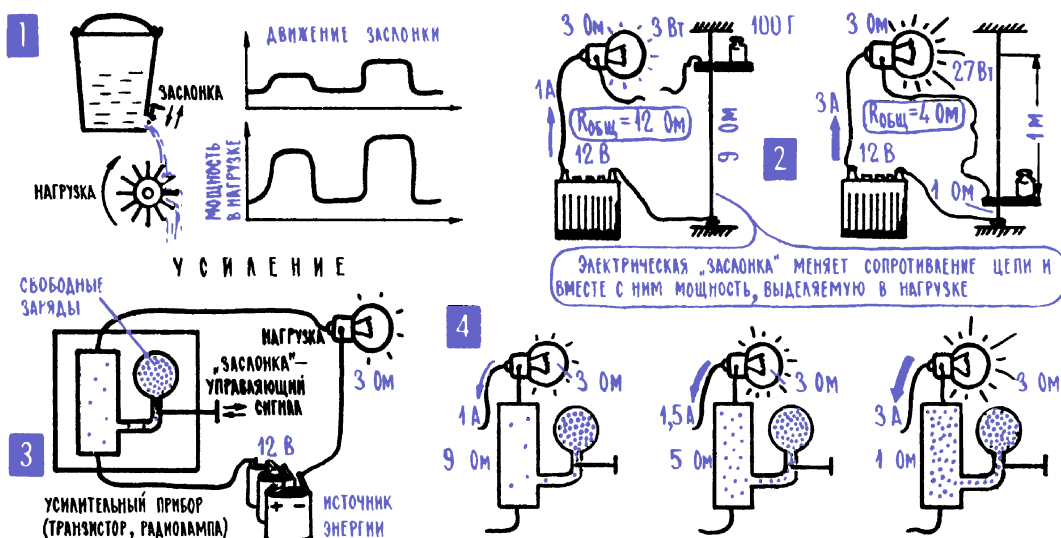


Рис. 9.1. Усиление сигнала

А теперь на пути воды поставим заслонку и, двигая ее вперед-назад, будем менять поток воды. Казалось бы, в самом процессе передачи энергии не произошло никаких изменений: кто давал энергию, тот и дает, кто по-

лучал, тот получает, сколько энергии было отдано, столько и получено. Но в действительности заслонка внесла в эту систему нечто принципиально новое: легким движением руки перемещая заслонку, можно значительно менять интенсивность потока воды. Образно говоря, затрачивая микроватты, можно менять мощность потока на целые ватты. И вывод: с помощью заслонки мы и создали усилитель, создали систему, в которой слабое воздействие управляет мощными потоками энергии.

Усилительные системы чрезвычайно распространены в природе, в технике их роль тоже очень велика и, может быть, даже еще до конца не осознана. Вот лишь несколько примеров, показывающих, что могут механические, гидравлические, химические, биологические, экономические и разные прочие усилители.

Легкое дуновение ветра лишь слегка подтолкнуло огромную скальную глыбу, нависшую над краем пропасти, глыба пошла под откос, перегородила горный поток, заставила его изменить русло и постепенно смыть огромную гору.

Небольшое количество катализатора, введенного в химический реактор, резко изменило ход химических процессов, во много раз ускорило превращение одних веществ в другие.

Разумные указания консультанта-технолога позволили лучше использовать производственные мощности завода и увеличить выпуск продукции на сумму, во много раз превышающую зарплату консультанта.

Вирус, попав на командный пункт живой клетки, заставил ее так изменить свою работу, что клетка начала сама огромными тиражами выпускать вирусы.

Все эти примеры не более чем информация к размышлению. А вот следующий пример, который представлен в виде привычного уже мысленного эксперимента, открывает прямой путь к настоящим усилителям электрических сигналов.

События разворачиваются в простейшей электрической цепи, в которую входит источник энергии – аккумулятор, нагрузка – лампочка и еще переменный резистор – реостат, выполненный в виде вертикально натянутой проволоки со скользящим контактом (рис. 9.1; 2). Подвижный контакт этот ходит по проволоке настолько легко, что если подвесить к нему стограммовую гирьку, то контакт буквально за секунду переместится сверху вниз, изменив сопротивление реостата от 9 Ом до 1 Ом.

А сейчас мы выполним несколько простейших арифметических операций, и они приведут нас к выводу, важнейшему для всей электроники.

Для начала вспомним про две расчетные формулы: $I = U / R$ и $P = I^2 \cdot R$ (рис. 4.7; 3 и рис. 4.11; 2). Согласно этим формулам, напишем два выражения – для тока в цепи лампочки $I_A = U_r / (R_A + R_p)$ (он определяется суммой двух сопротивлений – лампочки $R_A = 3$ Ом и реостата R_p) и для мощности, которая выделяется в лампочке, $P_A = I_A^2 \cdot R_A$. Теперь, пользуясь этими выра-

жениями, подсчитаем ток в цепи и мощность, выделяемую в лампочке, для двух случаев – когда сопротивление реостата равно 9 Ом и когда оно равно 1 Ом, после того как движок реостата опустился вниз. Вот результаты этих несложных расчетов.

В случае когда $R_p = 9 \text{ Ом}$ (движок вверх), получим: ток $I_A = 12 \text{ В} / (3 \text{ Ом} + 9 \text{ Ом}) = 1 \text{ А}$ и мощность $P_A = (1 \text{ А})^2 \cdot 3 \text{ Ом} = 3 \text{ Вт}$. В случае когда $R_p = 1 \text{ Ом}$ (движок вниз), получим: ток $I_A = 12 \text{ В} / (3 \text{ Ом} + 1 \text{ Ом}) = 3 \text{ А}$ и мощность $P_A = (3 \text{ А})^2 \cdot 3 \text{ Ом} = 27 \text{ Вт}$.

И наконец, последняя арифметическая операция. Теперь нетрудно подсчитать, что мощность 1 Вт, затраченная на перемещение подвижного контакта ($100 \text{ г} \cdot 1 \text{ м} = 1 \text{ Дж}$; $1 \text{ Дж} / 1 \text{ с} = 1 \text{ Вт}$), приводит к изменению электрической мощности, которую получает нагрузка (лампочка) на 24 Вт (от 3 до 27 Вт), и это можно назвать эффектом усиления: за изменение на 1 Вт мы получили изменение на 24 Вт.

Управляющий сигнал – перемещение движка реостата – сам ничего нагрузке не добавил и не убавил. Всю энергию лампочка получает только от аккумулятора. А эффект усиления появился только потому, что на одном перекрестке встретились, сошлись в одном физическом процессе два совершенно разных явления, две различные зависимости, до этого не знавшие друг друга, не имевшие друг к другу никакого отношения, – зависимость сопротивления реостата от положения движка и зависимость тока в цепи от сопротивления реостата. Такие пересечения физических процессов, такие пары зависимостей в природе образуются как бы сами собой, зачастую совершенно случайно. С одним примером мы уже знакомы: каменная глыба, если незначительно сдвинуть ее, падает с обрыва, совершая при этом огромную разрушительную работу, а даже легкий порыв ветра может произвести небольшое начальное перемещение глыбы, столкнув ее с обрыва.

В технике искусственно объединяют два разных независимых физических процесса, подбирают эти пары «пересекающихся» процессов таким образом, чтобы один из них сильно влиял на другой, чтобы можно было получить эффект усиления. Лучшим примером является усилитель электрических сигналов, до которого нам теперь остался уже буквально один шаг.

4. Распространенный тип усилителей электрических сигналов – слабый сигнал меняет ток в цепи, в которой действует мощный источник энергии. Чтобы усилить электрический сигнал, в разных типах усилителей объединяют парами самые разные физические процессы. В наиболее распространенных усилительных приборах – транзисторах и электронных лампах – используют такой принцип: слабый усиливаемый сигнал тем или иным способом меняет сопротивление цепи, в которой внешний источник энергии, например аккумулятор или гальванический элемент,

создает постоянный ток. Под действием меняющегося сопротивления постоянный ток перестает быть постоянным, он меняется, следуя за всеми изменениями слабого сигнала. Так за счет энергии внешнего источника создается мощный сигнал, точная копия слабого.

Реализовать этот принцип можно даже в нашей установке с реостатом, для этого нужно соорудить для подвижного контакта реостата систему электрического привода. Скажем, приводить в движение подвижный контакт миниатюрным электромоторчиком или электромагнитом, энергию которым давал бы сам усиливаемый сигнал. В электронных усилителях этот принцип реализуют так: сопротивление участка цепи меняют, «впрыскивая» в него то или иное количество свободных электрических зарядов (рис. 9.1; 3, 4). На само это «впрыскивание» тратится сравнительно небольшая мощность, а сопротивление меняется так, что происходит значительное изменение мощности, выделяемой на данном участке цепи.

Если вы помните, сама характеристика «сопротивление» говорит о том, легко или трудно генератору создавать ток в проводнике (гл. 3; 3). Чем больше в проводнике свободных зарядов, чем они подвижнее, тем более массовым будет упорядоченное движение зарядов под действием электродвижущей силы, тем больше будет ток. Иными словами, чем больше в проводнике свободных зарядов, чем они подвижнее, тем меньше сопротивление этого проводника. В электронных усилителях роль такого проводника с меняющимся сопротивлением выполняет сам усилительный прибор – электронная лампа или транзистор.

Слабый усиливаемый сигнал подводится к лампе или транзистору и управляет имеющейся там своего рода «заслонкой», которая увеличивает или уменьшает количество свободных зарядов, создающих электрический ток, то есть фактически меняет сопротивление приборов (рис. 9.1; 3, 4). Мы начнем с того, что посмотрим, как работает такая «заслонка» в транзисторе, как слабый сигнал меняет сопротивление этого усилительного прибора, меняет ток в его цепи. Но до этого нам еще предстоит провести кое-какую подготовительную работу. В частности, познакомиться с некоторыми процессами в полупроводниках.

5. Германий и кремний – полупроводники, в которых имеются свободные электроны и свободные положительные заряды (дырки). Электрические свойства того или иного материала часто оценивают так: вырезают из этого материала кубик со стороной 1 см и измеряют его электрическое сопротивление (рис. 9.2; 1). Эту величину называют удельным сопротивлением (гл. 4; 5), единица его измерения – Ом/см (здесь отражено то, что сторона кубика 1 см). Удельное сопротивление нихрома, одного из самых скверных проводников, – 0,00011 Ом/см (отличного проводника серебра – почти в сто раз меньше). А удельное сопротивление бумаги, одного из самых скверных изоляторов, – примерно 100 000 000 Ом/см (отличного изо-

лятора фарфора – в миллион раз больше). Вещества, которые находятся в промежутке между самыми сопротивляющимися проводниками и самыми проводящими изоляторами, называют полупроводниками, хотя с таким же успехом их можно было бы называть и полупроизолаторами.

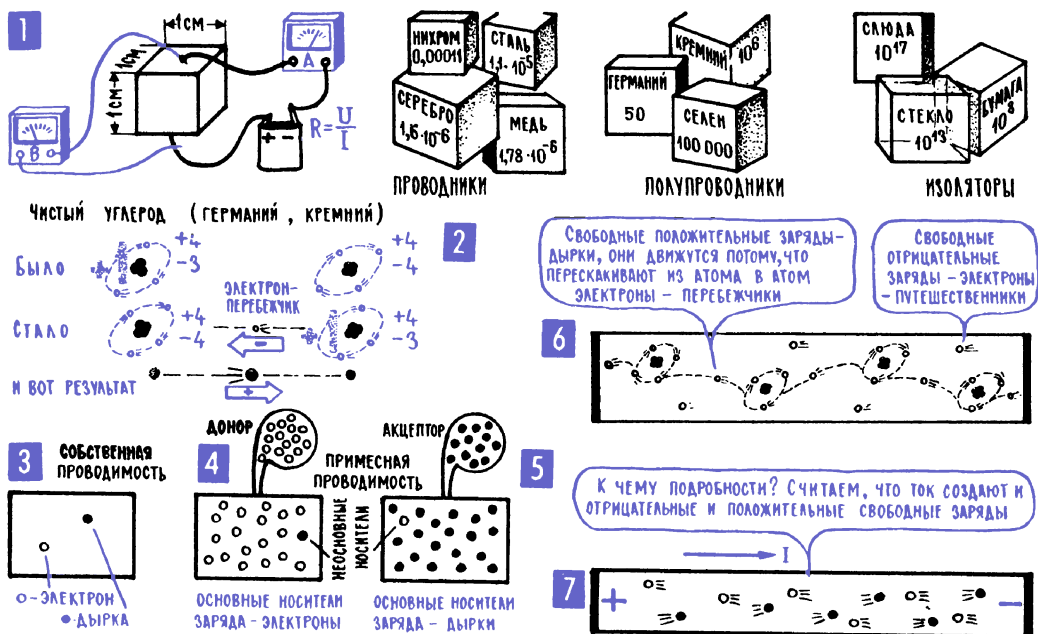


Рис. 9.2. Полупроводники

Примечание редактора. Существует очень много полупроводников, как в виде чистых элементов, так и в виде различных сплавов и соединений (включая и органические). Собственно говоря, полупроводников среди химических соединений гораздо больше, чем изоляторов и проводников. Однако различные особенности кристаллической структуры и химических свойств позволяют использовать для построения полупроводниковых приборов лишь очень небольшую часть всего этого богатства. Германий в настоящее время практически не применяется, львиная доля всех полупроводниковых приборов изготавливается из кремния. Третий по важности полупроводниковый материал – арсенид галлия (GaAs), он используется для сверхвысокочастотных приборов и оптоэлектроники, а также для производства радиационно стойкой электроники (в т. ч. солнечных батарей), могущей длительное время работать в открытом космосе. Кроме него, в оптоэлектронике – к которой относятся фотоизлучатели (светодиоды, полупроводниковые лазеры) и фотоприемники (фотодиоды и фототранзисторы) – используются другие соединения галлия, а также индия и ряда иных элементов, всего около двух-трех десятков. В технологиях дисплеев применяются органические полупроводники. В некоторых специфических областях (например, в копировальных машинах, в различных датчиках) используют и другие полупроводниковые материалы – селен, оксиды и сульфиды различных элементов, существуют даже применения в таком качестве для кристаллического углерода – алмаза.

Кристаллы элементов углеродной группы германия и кремния тоже относятся к числу полупроводников. Удельное сопротивление чистого германия примерно 50 Ом/см, кремния – 1 000 000 Ом/см. При температуре абсолютного нуля ($-273,2^{\circ}\text{C}$) германий и кремний – идеальные изоляторы. Но как только температура несколько повышается, тут же из-за тепловых колебаний атомов с некоторых внешних орбит выскакивают электроны и уходят в межатомное пространство. Атомов, не сумевших удержать на месте свои электроны, относительно немного, иначе вместо полупроводника мы имели бы просто проводник. В германии, например, при комнатной температуре появляется лишь один свободный электрон на миллиард атомов, в кремнии свободных электронов во много раз меньше.

Под действием электрического напряжения свободные электроны, блуждающие в межатомном пространстве, сразу же включаются в электрический ток, упорядоченно смещаются от «минуса» к «плюсу». Как принято говорить, свободные электроны создают *n*-проводимость (*n* – первая буква слова *negativus*, отрицательный; этим словом подчеркивается, что ток создают свободные отрицательные заряды, электроны).

Выскочив на свободу, электрон превратил свой до этого нейтральный атом в положительный ион (рис. 9.2; 2) – раз в атоме не хватает электрона, значит, его суммарный положительный заряд больше отрицательного (гл. 2; 9). Такой атом сдвинуться с места не может, он прочно закреплен в кристаллической решетке. И долго, казалось бы, должен стоять на месте этот одинокий положительный ион, дожидаясь, пока какой-нибудь электрон-путешественник случайно наткнется на пустующее место во внешней орбите, вернет атом в состояние электрического равновесия.

И вот здесь на сцене появляется еще одно действующее лицо, которое так и хочется назвать электроном-перебежчиком. Это электрон из соседнего атома. Он быстро и легко перескакивает на пустующее рядом с ним место, превращает положительный ион в нейтральный атом, а свой собственный атом – в положительный ион. И если отвлечься от второстепенных подробностей, то можно считать, что произошло перемещение положительного иона, хотя все атомы и остались на месте.

Положительный заряд атома, который появляется из-за того, что на внешней орбите не хватает электрона, называют «дыркой». В полупроводниках дырки ведут себя подобно свободным электронам – они хаотически перемещаются по кристаллу, а под действием приложенного напряжения сразу же включаются в электрический ток, упорядоченно смещаются, но уже, конечно, от «плюса» к «минусу» (рис. 9.2; 2, 6). Как принято говорить, дырки создают в полупроводнике *p*-проводимость (*p* – первая буква слова *positivus*, положительный; этим подчеркивается, что ток создают свободные положительные заряды, дырки).

В чистом, натуральном полупроводнике¹ число свободных электронов и свободных дырок одинаково, в этих полупроводниках в равной мере существует электронная и дырочная проводимость. Но с помощью определенных примесей можно нарушить это равенство и создать полупроводники с сильным преобладанием электронной или дырочной проводимости, полупроводники *n*-типа и *p*-типа.

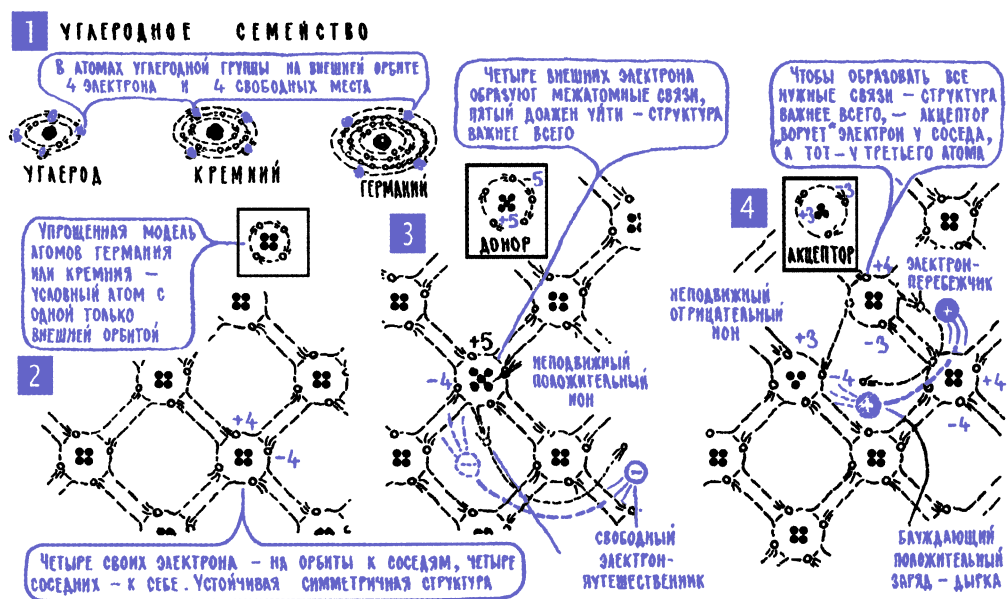


Рис. 9.3. Механизм проводимости в кристаллической решетке кремния и германия

6. Донорная примесь резко увеличивает число свободных электронов, создает *n*-проводимость. Алмазоподобные кристаллы элементов группы углерода отличаются весьма устойчивой структурой, в них трудно нарушить красивую симметричную систему межатомных связей. Образно говоря, в алмазоподобных кристаллах действует правило «структура важнее всего».

Представьте себе, что в расплавленный германий или кремний во время их кристаллизации вводят небольшое количество мышьяка, у атомов которого на внешней орбите пять электронов (рис. 9.3; 3). Атом мышьяка займет место в кристаллической решетке – а куда ему еще деваться! – но при этом он вынужден будет выбросить со своей внешней орбиты один

¹ Слово «чистый» в отношении полупроводников понимается более чем буквально: чистота кремния, из которого делают пластины-заготовки для производства полупроводниковых приборов, порядка 99,9999999 % (как говорят, «девять девяток»).

электрон. Потому что алмазоподобная структура требует, чтобы каждый атом установил связь только с четырьмя соседями – структура важнее всего. Таким образом, с добавлением мышьяка в кристаллической решетке появится некоторое количество неподвижных положительных ионов атомов мышьяка с недостающими электронами, а в межатомном пространстве при этом, естественно, появится такое же количество свободных электронов. Германий (кремний) превратится в полупроводник *n*-типа.

Мышьяк и другие примеси, благодаря которым в полупроводнике появляется заметное количество свободных электронов, называют донорами («дающими»), имея в виду, что они как бы отдают полупроводнику свои электроны, создают в нем электронную проводимость.

7. Акцепторная примесь резко увеличивает количество дырок, создает *p*-проводимость. А теперь добавим в германий или кремний некоторое количество индия, в атомах которого на внешней орбите всего три электрона (рис. 78; 4). Индий, как и мышьяк, займет место в кристаллической решетке, ему тоже больше некуда деваться. И индий тоже должен установить связь с четырьмя своими соседями. Поэтому при первой же возможности атом индия заберет у соседнего атома германия (кремния) один электрон, добавит к своим трем и превратится при этом в отрицательный ион. А атом германия, у которого индий увел электрон, станет обычной дыркой. Таким образом, с добавлением индия в германий (кремний) в нем появится некоторое количество неподвижных отрицательных ионов и такое же количество свободных положительных зарядов – дырок. Германий (кремний) станет полупроводником с *p*-проводимостью.

Индий и другие подобные примеси называют акцепторами (отбирающими), имея в виду, что они отбирают у атомов полупроводника электроны, превращают эти атомы в дырки, создают в полупроводнике дырочную проводимость.

8. Полупроводниковый диод – прибор с двумя примыкающими зонами разной проводимости. На пути к транзистору мы познакомимся еще с одним полупроводниковым прибором – диодом. Это знакомство необходимое, даже неизбежное – транзистор, по сути дела, представляет собой два полупроводниковых диода, соединенных в одном кристалле. И в то же время знакомство с диодом имеет и свое собственное важное значение. Полупроводниковый диод – прибор больших возможностей, он находит широкое применение в электронной аппаратуре.

Приставка «ди» в слове «диод» означает «два», она указывает, что в приборе имеются две основные «детали», два тесно примыкающих один к другому полупроводниковых кристалла (рис. 9.4; 1,2): один с *p*-проводимостью (это зона *p*), другой – с *n*-проводимостью (это зона *n*). Фактически же полупроводниковый диод – это один кристалл, в одну часть которого вве-

дена донорная примесь (зона n), в другую – акцепторная (зона p). К зоне p и к зоне n тем или иным способом присоединены проводники, выводы диода, с помощью которых он соединяется с внешним миром, включается в электрическую цепь.

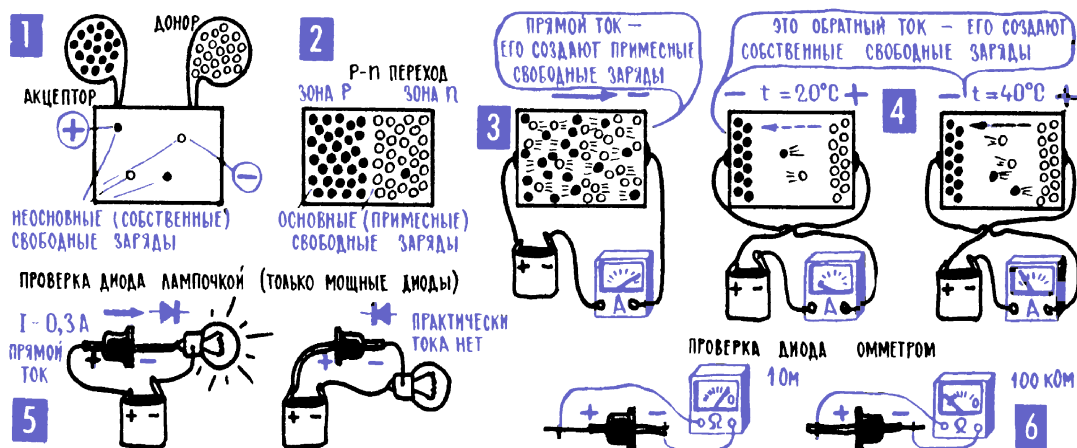


Рис. 9.4. Полупроводниковый диод

9. Основной элемент всех полупроводниковых приборов – p - n -переход, область соприкосновения зоны p и зоны n . Руководствуясь замечанием из главы 1; 8, забудем на время обо всем, что происходит в полупроводниках, и будем представлять себе вещество с n -проводимостью как некий объем, заполненный свободными электронами (на рисунках они условно обозначены белыми шариками), а вещество с p -проводимостью как объем с какими-то свободными положительными зарядами (на рисунках черные шарiki). К подробностям будем обращаться лишь по мере необходимости. Например, для того чтобы объяснить, почему свободные электроны и свободные дырки в диоде не устремляются навстречу друг другу, почему не происходит их взаимной нейтрализации.

Вспомните, что, помимо свободных зарядов, в полупроводниках с примесями имеются еще и неподвижные ионы – в зоне n это неподвижные положительные ионы донора, например мышьяка, в зоне p – неподвижные ионы акцептора, например индия. В нормальном состоянии полупроводник нейтрален, число свободных зарядов и неподвижных ионов, число «плюсов» и «минусов» в нем одинаково. Но как только первые электроны покинут зону n , она окажется наэлектризованной, в ней начнет действовать суммарный положительный заряд лишних ионов. И эти ионы начнут тянуть свободные электроны обратно, мешать их движению в сторону границы. Точно так же отрицательные ионы будут мешать свободным дыркам уходить из зоны p . В итоге между зонами будет существовать погра-

ничная линия, точнее, очень узкая пограничная зона, отделяющая область свободных положительных зарядов от области свободных электронов. Эта пограничная область называется *p-n-переход* (звучит так – «пэ-эн-переход»). С событиями в *p-n-переходе* связана работа всех полупроводниковых приборов, в частности диодов.

10. Полупроводниковый диод пропускает ток в основном только в одну сторону. Если от батареи подвести к диоду постоянное напряжение «плюсом» к зоне *p* и «минусом» к зоне *n* (рис. 9.4; 3), то свободные заряды – электроны и дырки – хлынут к границе, устремятся к *p-n-переходу*. Здесь они будут нейтрализовать друг друга, к границе будут подходить новые заряды, и в цепи диода установится постоянный ток. Это так называемое прямое включение диода – заряды интенсивно движутся через него, в цепи протекает сравнительно большой прямой ток.

Теперь сменим полярность напряжения на диоде, осуществим, как принято говорить, его обратное включение – «плюс» батареи подключим к зоне *n*, «минус» – к зоне *p*. Свободные заряды мгновенно оттянутся от границы (рис. 9.4; 4), электроны отойдут к «плюсу», дырки – к «минусу», и в итоге *p-n-переход* превратится в зону без свободных зарядов, в чистый изолятор. А значит, произойдет разрыв цепи, ток в ней прекратится.

Правда, небольшой обратный ток через диод все же будет идти. Потому что, кроме основных свободных зарядов (носителей заряда) – электронов, в зоне *n* и дырок в зоне *p*, в каждой из зон есть еще и ничтожное количество зарядов обратного знака. Это собственные неосновные носители заряда, они существуют в любом полупроводнике, появляются в нем из-за тепловых движений атомов (гл. 9; 5), и именно они и создают обратный ток через диод. Зарядов этих сравнительно мало, и обратный ток во много раз меньше прямого. Неприятно то, что ток этот зависит от температуры – при нагревании полупроводника число неосновных носителей увеличивается, и обратный ток растет (рис. 9.4; 4).

Примечание редактора. По аналогии с электронными лампами (см. гл. 10; 11 и рис. 10.6) выводы диода часто называют *анодом* (положительный вывод, *p*-зона) и *катодом* (отрицательный вывод, *n*-зона). Следует запомнить, что диод пропускает ток от анода к катоду (от *p*-зоны к *n*-зоне), в противоположном направлении он заперт. Существуют разновидности диодов (стабилитроны, фотодиоды), у которых рабочим является включение в противоположном направлении (плюсом к катоду), однако наименования выводов у них остаются теми же самыми.

Для кремниевого *p-n-перехода* обратный ток меньше прямого на много порядков (следствие того факта, что собственная проводимость кремния ничтожна, см. раздел 5 этой главы). Например, для выпрямительных диодов 1N5395 с допустимым прямым током 1,5 А обратный ток при 25 °С в 300 тыс. раз меньше и составляет 5 мкА (см. также раздел 11 этой главы). Большой обратный ток – основная причина расставания с германием: у полупроводниковых приборов на его основе он в сотни

и тысячи раз выше, чем у кремниевых. Например, у современного германиевого выпрямительного диода 1N34A при допустимом прямом токе 0,5 А обратный ток при тех же 25 °С может составить до 1 мА. Кроме того, притом что зависимость обратного тока кремниевых p - n -перехода от температуры примерно на 20 % сильнее, чем у германиевого, предельно допустимая температура кремниевых вдвое больше (см. раздел 11 далее).

О событиях в полупроводниковом диоде рассказывает его основная характеристика – зависимость тока через диод от приложенного к нему напряжения (рис. 9.5). На некоторые участки этой, как ее называют, вольт-амперной характеристики следует обратить внимание. Прежде всего мы видим, что на ее прямой ветви есть небольшой загиб, ступенька – в области малых напряжений (у германия примерно до 0,2 В, у кремния – до 0,7 В) прямой ток нарастает незначительно. Такой загиб характеристики появляется вследствие некоторых сложных процессов в p - n -переходе, он может стать причиной нелинейных искажений сигнала (гл. 8; 8, 11).

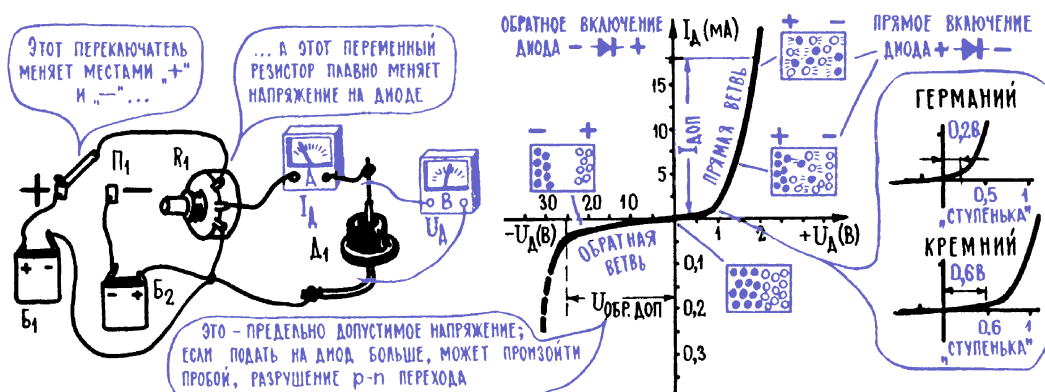


Рис. 9.5. Вольт-амперная характеристика диода

В области обратных напряжений ток почти не меняется: все собственные неосновные носители сразу же включаются в движение, и обратный ток сразу достигает своей предельной величины.

11. Важные параметры диода: допустимое обратное напряжение, допустимый прямой ток, прямое и обратное сопротивление. Но вот при некотором обратном напряжении, превышающем допустимую величину $U_{обр.доп}$, обратный ток резко нарастает. Это происходит быстрое лавинообразное разрушение структуры полупроводника, и диод выходит из строя². Кстати, возможны два разных, но одинаково трагичных поврежде-

² Не всегда именно разрушение: у некоторых типов диодов (стабилитронов, диодов Зенера) пробой при превышении обратного напряжения является обратимым, и это используется для ограничения напряжения на заданном уровне.

ния диода – разрыв, отгорание контактов внутри прибора или короткое их замыкание, превращение диода в обычный проводник. Допустимое обратное напряжение входит в число основных параметров диода и всегда указывается в справочниках. Напряжение это, естественно, ни в коем случае нельзя превышать.

Другой ограничивающий параметр – допустимый прямой ток $I_{\text{доп}}$. Проходя через диод, прямой ток выделяет в нем некоторую тепловую энергию, нагревает прибор. А нагревание очень опасно для полупроводниковых материалов, оно увеличивает количество неосновных носителей заряда. Вот почему приходится ограничивать величину прямого тока и еще ограничивать рабочую температуру полупроводниковых приборов. Для германиевых диодов и транзисторов предельная рабочая температура $+70\text{--}80\text{ }^{\circ}\text{C}$, а для кремниевых она значительно выше – стандартно до $+125\text{--}150\text{ }^{\circ}\text{C}$, для некоторых силовых диодов и транзисторов – даже до $200\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Есть у полупроводникового диода еще два важных параметра – его прямое и обратное сопротивление, то есть сопротивление при разной полярности приложенного к диоду напряжения (рис. 9.4; 3, 4). У плоскостных диодов, в которых площадь соприкосновения зон n и p сравнительно велика, прямое сопротивление обычно не более нескольких ом, обратное – несколько килоом или несколько десятков килоом. У точечных диодов, где площадь p - n -перехода мала (см. раздел 13 далее), прямое сопротивление – несколько десятков ом, обратное – сотни килоом и даже несколько мегаом.

Примечание редактора. Прямое и обратное сопротивление диода (и p - n -перехода вообще) – параметр в значительной степени условный и в справочниках никогда не указывается. Для того чтобы понять причину, достаточно посмотреть на вольт-амперные характеристики диода (рис. 9.5) – они носят экспоненциальный характер, то есть принципиально нелинейны, и в каждой точке такой характеристики сопротивление (отношение напряжения на переходе к протекающему току) будет иметь свое значение, к тому же меняющееся с температурой. Тем не менее обычное (активное) сопротивление у диодов, конечно, имеется, как у всяких проводников, просто не оно определяет свойства диодов. Активное прямое сопротивление диодов может выражаться, например, в том, что график вольт-амперной характеристики не стремится к вертикальной прямой, а свыше некоторого значения тока возрастает с небольшим наклоном. Вольт-амперные характеристики различных реальных диодов исследуются в *Практикуме* к этой главе.

Вместо того чтобы приводить ни о чем не говорящую величину сопротивления, в справочниках для диодов обычно указывают *прямое падение напряжения* при рабочем и/или предельно допустимом токе, а также величину *максимального обратного тока* при рабочем и/или предельно допустимом обратном напряжении и рабочей температуре перехода. С достаточной степенью точности для любых кремниевых диодов (и p - n -переходов вообще, кроме составных, как в выпрямительных столбах или транзисторах Дарлингтона) прямое падение напряжения мож-

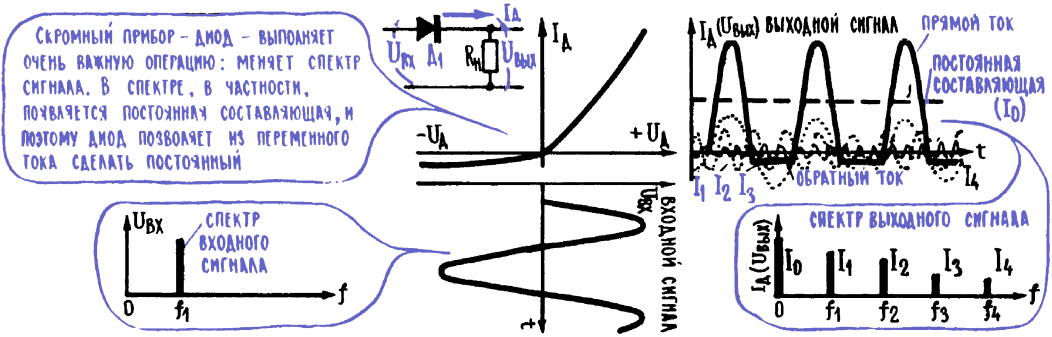
но принимать равным 0,6–0,7 В при токе в единицы-десятки миллиампер и около 0,9–1,1 В при токах в сотни миллиампер и более (напряжение при максимально допустимом токе обычно указывается в справочнике).

Для других полупроводниковых материалов и технологий эта величина может отличаться: например, для германиевого *p-n*-перехода (а также т. н. диодов Шоттки) величина прямого падения составляет 0,2–0,4 В, а для светодиодов – от 1,5 до 2,5 В для красных, желтых и зеленых и возрастает до 3–4 В для синих и белых, а также мощных осветительных и суперъярких разновидностей. А вот обратный ток диодов сильно зависит от технологии (у автора упоминаются их две – плоскостная и точечная, но существуют и другие) и температуры, так что эту величину при нужде надо смотреть в справочнике для каждого конкретного типа (хотя для практических расчетов она почти не требуется).

Во всех случаях прямое сопротивление во много раз меньше обратного, и в этом, собственно говоря, отражена так называемая односторонняя проводимость диода. Под действием напряжения диод пропускает ток, и в электрическую цепь он входит как резистор. Но, конечно же, диод принципиально отличается от нормального резистора, сопротивление которого одинаково при любых направлениях тока. И, рассматривая поведение диода в электрической цепи, его приходится считать либо большим, либо малым сопротивлением, в зависимости от полярности приложенного напряжения, в зависимости от направления тока.

12. Под действием переменного напряжения в цепи диода появляется пульсирующий ток. До сих пор мы подводили к диоду постоянные напряжения, теперь попробуем подвести переменное. Что при этом произойдет, легко узнать, если к вольт-амперной характеристике (рис. 9.5) пристыковать график переменного напряжения, подобно тому, как мы это делали, рассматривая работу громкоговорителя (рис. 8.7). Пользуясь этими двумя состыкованными графиками – вольт-амперной характеристикой и графиком переменного напряжения, – легко построить третий, график тока, который пойдет в цепи диода (рис. 9.6). Без всяких пояснений видно, что по характеру изменения ток, а вместе с ним и выходное напряжение, уже совершенно не похож на входное напряжение. В одну сторону идут значительные импульсы прямого тока, в другую – ничтожно малые импульсы обратного тока. В большинстве случаев можно вообще пренебречь этими небольшими всплесками обратного тока и считать, что в цепи диода есть только токовые импульсы одного направления.

Как видите, диод производит чрезвычайно сложную операцию – искажает форму сигнала, резко меняет его спектр, создает сильные нелинейные искажения. Такие искажения сигнала в ряде случаев совершенно необходимы, и во многих схемах диод оказывается основным действующим лицом.



13. Силовые (выпрямительные) и импульсные диоды различаются допустимыми параметрами и собственной емкостью. Полупроводниковый диод – это своего рода конденсатор: зону n и зону p можно рассматривать как обкладки конденсатора, область p - n -перехода – как изолятор между обкладками (рис. 9.7; 1). Емкость полупроводникового диода – это бесплатное приложение к его основному электрическому свойству, к односторонней проводимости. И нужно сказать, во многих случаях приложение весьма вредное. Так, в частности, собственная емкость диода создает нежелательный обходной путь для переменного тока, который нужно направить через диод (рис. 9.7; 4).

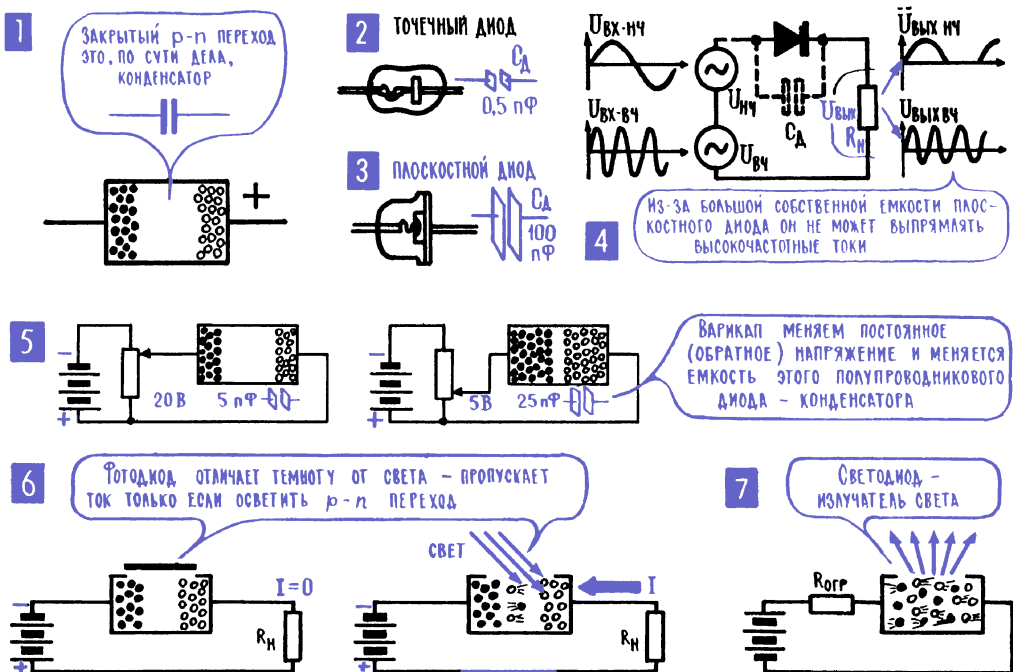


Рис. 9.7. Различные функции диодов

Чтобы поднять допустимую величину прямого тока, площадь p - n -перехода в диоде нужно увеличивать – при этом уменьшится прямое сопротивление диода, уменьшится выделяемая на нем тепловая мощность ($P = I^2 \cdot R$), а значит, и опасность перегрева. Но одновременно возрастает собственная емкость диода – чем больше площадь пластин конденсатора, тем больше его емкость. Там, где такая емкость недопустима, скажем в цепях переменного тока высокой частоты, применяются точечные (импульсные) диоды (рис. 9.7; 2). В них p - n -переход имеет очень небольшую площадь. Естественно, что импульсные диоды не могут пропускать большой ток (табл. 9.1), но, к счастью, в подавляющем большинстве случаев от них это и не требуется.

Таблица 9.1. Параметры некоторых типов кремниевых диодов

Наименование	Максимальный постоянный или средний прямой ток (максимальный импульсный ток), А	Максимально допустимое обратное напряжение, $U_{обр}$, В	Обратный ток (ток утечки), мкА	Время обратного восстановления, мкс
Импульсные				
КД521А	0,05 (0,5)	75	1 (при 25°)	0,004
1N4448 (КД510А)	0,15 (0,45)	100	5 (при 25°)	0,004
1N4936	1 (30)	400	5 (при 25°)	0,2
Выпрямительные				
КД258А – КД258Г	3 (7,5)	200 (КД258А) – 1000 (КД258Г)	2 (при 25°) 150 (при 165°)	0,25
1N4001 – 1N4007	1 (30)	50 (1N4001) – 1000 (1N4007)	5 (при 25°)	1,5
1N5400 – 1N5408	3 (200)	50 (1N5400) – 1000 (1N5408)	5 (при 25°)	1,5
Силовые				
Д112-10-10 – Д112-10-25	10 (250) – 25 (340)	1000	3000	8

Примечание редактора. В табл. 9.1 следует прежде всего обратить внимание на то, что у большинства диодов допустимый импульсный прямой ток может в разы или даже в десятки раз превышать допустимый средний ток. Это положение вызвано тем, что выход из строя диода при превышении тока обусловлен в первую очередь его нагреванием, а за время короткого импульса (миллисекунды) существенно нагреться диод не успевает. Иными словами, диоды могут выдерживать значительные перегрузки по прямому току, лишь бы они не продолжались слишком долго. Второе обстоятельство: чем на больший ток рассчитан диод, тем медленнее он работает.

У силовых диодов время восстановления достигает 8 мкс, и рабочая частота, на которой они еще выполняют свои функции, не превышает 1–1,5 кГц (у простых выпрямительных эта граница отодвигается до десятков килогерц). Кроме того, у выпрямительных и особенно силовых диодов намного больше ток обратной утечки (который еще и возрастает в десятки раз с повышением температуры), и при малых токах нагрузки они просто не будут выполнять свои выпрямительные функции. Иными словами, выбирать диоды под конкретную задачу следует очень тщательно: не существует универсальных диодов, одинаково пригодных для работы в любых условиях.

В то же время есть тип полупроводниковых диодов, где главным рабочим параметром становится «бесплатное приложение» к односторонней проводимости – собственная емкость диода. Это варикапы, полупроводниковые диоды, которые используются в качестве конденсаторов переменной емкости. Много лет назад, когда варикапов не было и в помине, радиолюбители применяли вместо конденсатора настройки обычные плоскостные диоды – их включали, например, в колебательный контур, одновременно подавали на диод обратное напряжение и меняли его с помощью потенциометра (рис. 9.5). При этом менялась собственная емкость диода, так как менялось расстояние между «обкладками» – чем больше обратное напряжение, тем сильнее оттягиваются p - и n -области от пограничной линии (рис. 9.7; 5).

Достаточно велик список профессий диода, в которых используется не его односторонняя проводимость, а прежде всего совсем иные свойства и процессы. В этом списке, например, открывание диода и пропускание прямого тока лишь под действием света (фотодиод)³, который определенным образом меняет свойства того или иного полупроводникового материала. В этом списке и излучение света в светодиодах – в излучение превращается часть энергии прямого тока. Такие светящиеся диоды давно повсеместно заменили сигнальные лампочки и быстро проникают в область освещения. Светоизлучающими диодами также высвечивают цифры в некоторых приборах (например, электронных часах) – для этого используют семи-сегментные индикаторы, то есть приборы, где конструктивно объединены семь диодов-штрихов, разные их сочетания дают цифры от 0 до 9 (см. *Практикум* в гл. 16).

Особого типа излучающие диоды – основа полупроводниковых лазеров: здесь, как и в светодиодах, излучение возникает за счет энергии прямого тока и излучателями становятся сами атомы полупроводникового кристалла. Иной механизм излучения у диодов Ганна, где под действием тока излучается уже не свет, а радиоволны. Здесь главную роль играют электрические домены – своего рода острова электрического поля в кристалле.

³ В режиме протекания прямого тока (фотогальваническом режиме) фотодиоды включают очень редко, это характерно для солнечных батарей; обычный способ использования фотодиода – в обратном включении, когда пропорционально освещенности изменяется ток утечки.

Уместно вспомнить еще и туннельный диод, в числе основных профессий которого тоже генерирование высокочастотных колебаний – здесь благодаря тонким физическим процессам в p - n -переходе (туннельный эффект) у диода при определенном режиме появляется так называемое отрицательное сопротивление: диод не отбирает энергию, а как бы отдает ее в ту цепь, куда включен. Сложные физические процессы определяют важнейшее качество диода-стабилитрона, позволяющего поддерживать неизменным режим электрической цепи при случайных изменениях питающего напряжения (см. главу 17).

14. Односторонняя проводимость полупроводникового диода обнаруживается уже в простейших опытах. Нетрудно понять человека, который, познакомившись со сложным физическим процессом по его краткому и упрощенному описанию с картинками, испытывает некоторые сомнения. Откуда известно, что все происходит именно так? Как доказать, что добавление индия действительно создает в германии или кремнии дырочную проводимость? Что при одной полярности напряжения заряды оттягиваются от p - n -перехода, а при другой полярности – устремляются к нему? И что он вообще существует, этот p - n -переход, что есть зоны разной проводимости в совершенно однородном по внешнему виду кристаллике?

Процессы, которые происходят в полупроводниковых приборах, конечно же, тщательно исследованы специалистами. Более того, создание диодов и транзисторов стало возможным только благодаря тому, что физики глубоко проникли в самые тонкие механизмы взаимодействия атомов, изменения структуры вещества, поведения его в разных условиях. Сегодня исследователи полупроводниковых кристаллов могут не только экспериментально доказать, что добавление индия создает в германии или кремнии дырочную проводимость. Они могут точно определить количество дырок или свободных электронов в единице объема, измерить время жизни свободных зарядов, среднюю скорость их перемещения в электрическом поле. С помощью электронного микроскопа исследователи могут просто увидеть p - n -переход, проследить за процессами, которые в нем происходят при прямом и обратном включении.

У вас под руками нет, по-видимому, электронного микроскопа и других приборов, которые помогли бы прямыми опытами и демонстрациями проиллюстрировать рассказ о событиях в полупроводниковом диоде. Но вы все же можете провести эксперимент, который, по крайней мере, докажет правдоподобность выводов об односторонней проводимости p - n -перехода. Причем не мысленный эксперимент, как часто бывало раньше, а настоящий, «в металле». Для него нужны батарейка, лампочка и любой плоскостной диод. Весь ход эксперимента показан на рис. 9.4; 5. Он безоговорочно подтверждает: диод пропускает ток в одну сторону, его прямое сопротивление мало, а обратное – велико.

15. **Транзистор** – полупроводниковый прибор с двумя *p-n*-переходами и тремя зонами разной проводимости, со структурой *p-n-p* или *n-p-n*. Слово «транзистор» происходит от сокращения термина *transresistance* (от слов «трансфер», в переводе с английского – «переносчик», и «резистор»). В конце этой главы мы поясним, с чем именно связано такое название, а пока несколько слов об устройстве прибора.

Можно сказать, что транзистор представляет собой два полупроводниковых диода с одной общей проводящей зоной (рис. 9.8). В зависимости от типа проводимости этой общей зоны могут быть и два типа транзисторов, с двумя разными последовательностями проводящих зон: *p-n-p* и *n-p-n* (рис. 9.8; 1, 2). Такие транзисторы с разной структурой, или, как их принято называть, транзисторы разной проводимости, не отличаются по принципу действия, по своим основным характеристикам и возможностям. Однако технология производства *p-n-p*-транзисторов в какое-то время была проще, удобнее, и тогда они стали основным типом полупроводниковых усилительных приборов. С того времени транзисторы со структурой *p-n-p* иногда называют транзисторами прямой проводимости, а со структурой *n-p-n*-транзисторами обратной проводимости.

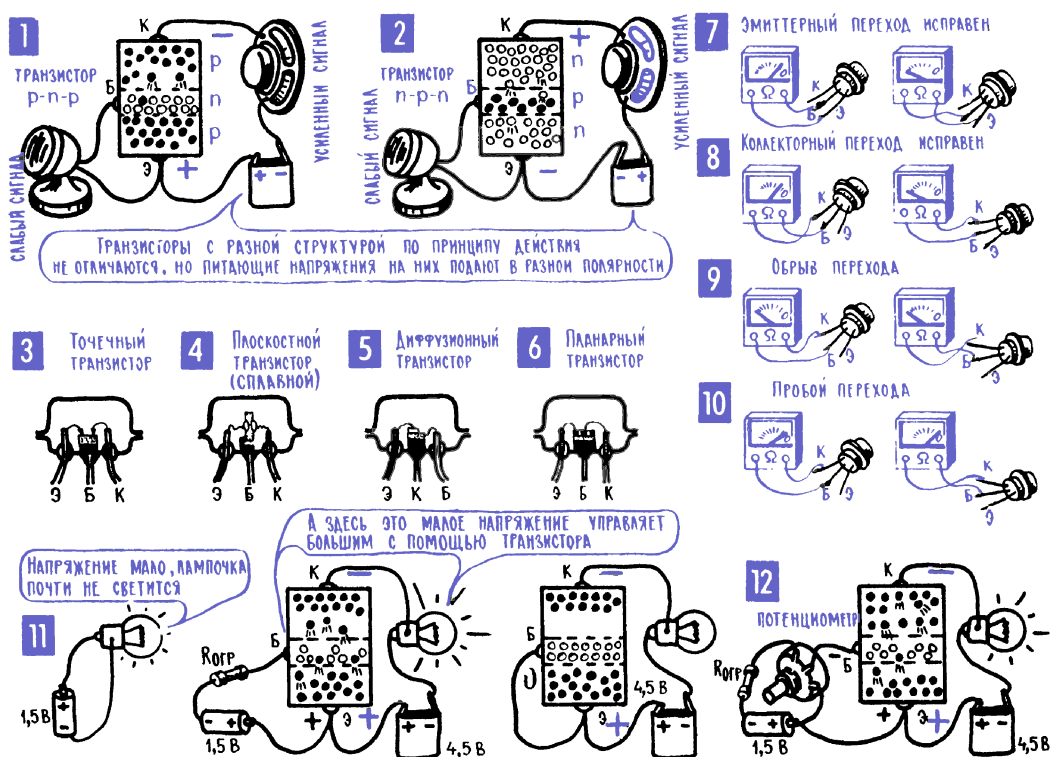


Рис. 9.8. Транзисторы

Примечание редактора. Биполярные транзисторы типа p - n - p были доминирующим типом в период господства германия (в 1950–1960-х годах) – в нем действительно такие структуры формировать проще. С приходом на ведущие позиции кремния в качестве основного типа твердо установилась структура n - p - n . При этом кремниевых p - n - p -транзисторов выпускается меньше, и они в целом несколько хуже по характеристикам – как правило, у p - n - p меньший коэффициент усиления и несколько ниже рабочие частоты, чем у n - p - n . Связан этот эффект в кремнии с разной подвижностью носителей заряда – меньшей у «дырок» в p -области в сравнении с более подвижными электронами в n -области. Это положение еще больше упрочилось с появлением микросхем: известно, что в исторически первой массовой логической серии ТТЛ-логики 74 (отечественные 133 и К155) p - n - p -структуры долго не поддавались воспроизведению, и сначала все микросхемы базировались на структурах n - p - n .

Так как у n - p - n -транзисторов коллекторная (нагрузочная) цепь подключается к положительному выводу источника питания, то доминирование n - p - n -структур привело к тому, что при однополярном питании стало окончательно принято общий провод («корпус», «землю») на схемах подключать к отрицательному выводу основного источника питания. Схемы в этом издании по возможности приведены в соответствии с данным положением.

16. Три зоны транзистора – эмиттер, коллектор и база; усиливаемый сигнал подводят к эмиттерному p - n -переходу, усиленный получают в коллекторной цепи. Средняя зона транзистора называется базой, сокращенное обозначение – «Б». Это название идет с давних времен, если, конечно, здесь применимо само это слово «давний» – транзистор изобретен в 1947 году. Тогда существовали только точечные транзисторы, у которых средняя зона была конструктивным основанием, базой прибора (рис. 9.8; 3). Сейчас ни точечных, ни плоскостных (рис. 9.8; 4) транзисторов уже не делают, их полностью вытеснили более технологичные и совершенные сначала диффузионные, а затем и планарные⁴ приборы (рис. 9.8; 6), однако названия рабочих зон, в том числе и название «база», остались без изменений.

С двух сторон к базе примыкают две зоны иной проводимости – эмиттер «Э» (испускающий заряды) и коллектор «К» (собирающий заряды). По своим электрическим характеристикам коллектор и эмиттер в основном одинаковы – некоторые транзисторы работают, если по ошибке включить эмиттер вместо коллектора. Однако они различаются конструктивно – коллектор делают более массивным и в мощных транзисторах часто подключают к корпусу (он должен выдерживать значительно большие тепловые нагрузки).

На рис. 9.8; 1, 2 в самом общем виде показана схема включения транзистора в усилитель электрических сигналов. Транзистор позволяет практически осуществить систему усиления электрических сигналов, в которой

⁴ Планарная (эпитаксиально-планарная) технология – в настоящее время основная технология производства как микросхем, так и отдельных (дискретных) полупроводниковых приборов.

слабый сигнал меняет сопротивление переменного резистора (реостата), включенного в цепь источника постоянного тока (рис. 9.1). При этом эмиттерный p - n -переход играет роль привода, он легко «перемещает движок реостата», роль которого играет коллекторная цепь.

Знакомство с полупроводниковым диодом мы закончили экспериментом, доказывающим его одностороннюю проводимость. Знакомство с транзистором начинаем с экспериментов, которые должны подтвердить, что он может быть использован для усиления электрических сигналов.

17. Усилительные возможности транзистора обнаруживаются в простейших опытах. Основное оборудование, необходимое для этих опытов, – лампочка на 3,5 В, батарейка на 4,5 В, любой гальванический элемент на 1,5 В, переменный резистор сопротивлением около 1 кОм, постоянный резистор 100 Ом и любой транзистор. Как у него расположены выводы эмиттера, базы и коллектора, можно узнать по справочным данным, которые легко разыскать в интернете.

Примечание редактора. Для этого эксперимента подойдут отечественные транзисторы КТ3107 (p - n - p) или КТ3102 (n - p - n), а также импортные BC-327 (p - n - p) или BC-337 (n - p - n). Много потребляющая лампочка накаливания на 3,5 В в этих экспериментах может быть заменена на любой маломощный светодиод с ограничительным резистором 220–620 Ом (лучше желтый, зеленый или синий). Не забудьте, что для светодиода, в отличие от лампочки, нужно соблюдать полярность подключения. Чтобы не возиться с этим, в подобных опытах удобно использовать двухцветный двухвыводной тип светодиода, который при наличии тока в цепи будет светиться в любом подключении, только разным цветом в зависимости от направления тока.

В опыте с подключением лампочки непосредственно к батарейке 1,5 В (рис. 9.8; 11) красный светодиод может в принципе тускло светиться (в зависимости от того, насколько батарейка новая), поэтому лучше выбирать других цветов – они гарантированно при таком напряжении светиться не будут. В эксперименте на рис. 9.8; 12 для современных транзисторов с большим коэффициентом передачи тока (β , см. гл. 10; 3, рис. 10.1; 7) переменного резистора с максимальным сопротивлением 1 кОм может не хватить – лампочка (светодиод) будет светиться одинаково при любом положении потенциометра. Лучше взять заведомо большее переменное сопротивление: 20–30 кОм и более (в зависимости от транзистора). Не забывайте про ограничительный резистор $R_{\text{огр}}$ (100 Ом) – его отсутствие может привести к выгоранию перехода эмиттер–база.

Первая серия опытов (рис. 9.8; 7, 8; в мысленном эксперименте вместо омметра вполне можно включить лампочку и батарейку: чем ярче светится лампочка, тем, значит, больше ток и, следовательно, меньше сопротивление) – предварительная, она лишь подтверждает, что в p - n - p -транзисторе есть два p - n -перехода и его можно рассматривать как два диода с общей зоной n . Транзистор типа p - n - p мы выбрали для определенности, но мож-

но взять и транзистор $n-p-n$ (сменив полярность всех батарей), результат опытов при этом не изменится.

Вторая серия опытов начинается с того, что лампочку на 3,5 В мы подключаем к источнику с напряжением 1,5 В и убеждаемся, что лампочка не горит. Однако напряжение 1,5 В можно использовать для зажигания лампочки, если управлять этим процессом через транзистор (рис. 9.8; 11). Здесь энергию для свечения лампочки дает коллекторная батарея 4,5 В, а напряжение 1,5 В от элемента лишь подает команду «Светить!» ($R_{\text{отр}} = 100 \text{ Ом}$ ограничивает базовый ток; этот резистор нужен во всех случаях, когда мы от мысленных экспериментов переходим к опытам «в металле» и при этом напряжение на базу подаем от отдельной батареи).

Следующий шаг: плавное изменение управляющего напряжения с помощью переменного резистора (рис. 9.8; 12) – ток в коллекторной цепи (о нем можно судить по яркости свечения лампочки) следует за всеми изменениями входного напряжения. Значит, если подать на вход транзистора, то есть подвести к эмиттерному $p-n$ -переходу, реальный электрический сигнал, то в коллекторной цепи появится его мощная копия.

О других опытах по усилению с помощью транзистора см. *Практикум* в главе 10. Убедившись на опыте в замечательных усилительных способностях транзистора, шагнем дальше, попробуем разобраться в том, «как это делается».

18. Открытый эмиттерный $p-n$ -переход «впрыскивает» заряды в коллекторный $p-n$ -переход и тем самым меняет его сопротивление, управляет коллекторным током. Прежде всего обратите внимание на то, в какой полярности поданы напряжения на эмиттерный и коллекторный $p-n$ -переходы в $p-n-p$ -транзисторе. Коллекторная батарея подключена «минусом» к коллектору и «плюсом» к базе (в наших схемах «плюс» соединен с базой через эмиттер, но бывают схемы, где они соединяются непосредственно), и поэтому коллекторный переход, по сути дела, представляет собой диод, включенный в обратном направлении, сопротивление его очень велико (см. рис. 10.1; 6 в главе 10).

А к эмиттерному $p-n$ -переходу напряжение подведено в такой полярности, что переход открыт и участок база–эмиттер ведет себя как диод, включенный в прямом направлении: сопротивление его мало, через переход идет прямой ток. Все то же самое будет и при подключении $n-p-n$ -транзистора с одновременным «переворотом» полярности питающих батареек.

Если бы коллекторный и эмиттерный $p-n$ -переходы были изолированы один от другого, то на этом описание событий и закончилось бы. Но в $p-n-p$ -транзисторе у двух диодов общая зона n , и именно в ней вступает в действие новая сила – диффузия. Диффузию нам приходится наблюдать довольно часто. Например, когда в стакан воды попадает капля чернил и быстро окрашивает всю воду. Или когда случайно проливается на землю

несколько граммов бензина и мы чувствуем, как бензиновый запах быстро распространяется в воздухе. Все это работает диффузия – «распространение вещества в среде, обусловленное неодинаковостью его концентрации за счет энергии теплового движения».

Диффузия играет исключительно важную роль в работе транзистора. Свободные положительные заряды – дырки, которые приносит в базу эмиттерный ток, – в результате диффузии быстро распространяются по всей базе и при этом, естественно, попадают в область коллекторного p - n -перехода. И вот тут-то и происходит самое главное – «минус» коллекторной батареи хватается положительные заряды и сильно тянет их к себе, в транзисторе появляется коллекторный ток. Попавшие в закрытый коллекторный переход свободные заряды резко уменьшают его сопротивление, и коллекторная цепь, до этого разорванная большим сопротивлением закрытого p - n -перехода, начинает проводить ток: его всегда готова создать коллекторная батарея, были бы свободные заряды. И поэтому, если меняется ток в эмиттерном переходе, то меняется и ток в коллекторном переходе, для которого эмиттерный переход просто-напросто дает сырье, поставляет свободные заряды.

Итак, мы нашли нужную пару независимых и в то же время «пересекающихся» физических процессов: ток в цепи эмиттер–база и коллекторный ток. Образно говоря, мы нашли «заслонку», которую искали (гл. 9; 4), нашли способ менять сопротивление реостата (коллекторная цепь) с помощью электрического сигнала (напряжение на участке база–эмиттер). Но сможет ли эта пара процессов, сможет ли наш реостат, управляемый электрическим сигналом, давать усиление? Будет ли изменение мощности в коллекторной цепи больше, чем затраты мощности на создание тока в цепи эмиттер–база? Ответ на этот принципиальный вопрос – усилитель или ослабитель? – был получен нами еще «до того», в нескольких простейших экспериментах (рис. 9.8; 11, 12), доказавших: с помощью транзистора можно усиливать электрические сигналы. И, вдохновившись этим приятным «транзистор – да!», попробуем в деталях выяснить, что конкретно делает транзистор в усилителе сигналов, сколько чего получает и отдает.

Практикум. Исследование вольт-амперной характеристики диодов и светодиодов

Для этого эксперимента понадобятся:

- выпрямительные диоды, например из серии 1N4001...1N4007 и др., по 1 шт.;

- несколько резисторов, в том числе мощные:
 - 10–12 Ом, мощность не менее 10–15 Вт, 2 шт.;
 - 82 Ом, 120 Ом, 180 Ом, мощность не менее 2 Вт, по 1 шт.;
 - 360, 560 Ом, мощность не менее 0,5 Вт, 1 шт.;
 - 1, 5,6, 10, 18–20, 30, 51, 75, 100, 220, 430 кОм, 1 МОм – обычные 0,25 Вт, по 1 шт.;
- светодиоды разных типов: красный, белый яркий (наподобие тех, что устанавливаются в карманные фонарики), синий, фиолетовый или ультрафиолетовый и пр.;
- источник питания стабилизированный 12 В, 2 А.

Источник питания рекомендуется не менее, чем на 10–12 В, так как при меньшем напряжении прямое падение напряжения на диоде или светодиоде будет слишком сильно влиять на ток. Диод или светодиод подключаем к источнику питания через резистор в прямом направлении, по общей схеме, показанной на рис. 9.9; 2. К минусу источника питания у обычного диода подключается вывод со стороны кольца на корпусе (катод), у светодиода – более короткий; у круглых светодиодов катод часто обозначается также скосом на корпусе (см. рис. 9.9; 1).

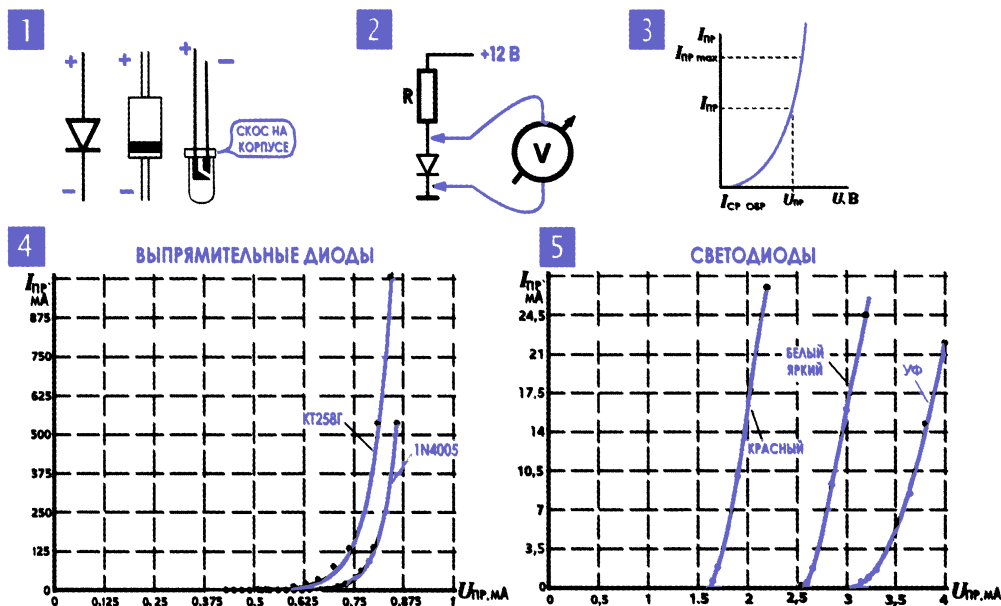


Рис. 9.9. Исследование вольт-амперной характеристики диодов и светодиодов

Установив диод на макетную плату, параллельно ему подключаем мультиметр в режиме измерения напряжения и, соединяя положительный вывод (анод) диода с плюсом источника питания через различные резисторы, каждый раз отмечаем значение прямого падения напряжения $U_{пр}$. Если источник питания нестабилизированный, то нужно также каждый раз отмечать значение его напряжения $U_{ист}$ – оно может меняться при изменении нагрузки. Ток через диод $I_{пр}$ при этом рассчитывается по формуле: $I_{пр} = (U_{ист} - U_{пр}) / R$. Минимальное значение сопротивления резистора R в каждом случае выбирается так, чтобы не был превышен максимально допустимый ток $I_{пр.макс}$ через диод (до 1–2 А) или светодиод (до 30 мА).

Теоретическая вольт-амперная характеристика кремниевого диода (кривая зависимости напряжения на диоде от тока) показана на рис. 9.9; 3. На практике она может довольно сильно отличаться от теоретической, и, что самое главное, прямое падение напряжения на диодах различных типов будет существенно отличаться. В таблицах далее и на графиках рис. 9.9; 4, 5 показаны результаты измерений $U_{пр}$ для некоторых типов диодов и светодиодов.

Как мы видим из этих результатов, характеристика выпрямительных диодов довольно круто загибается вверх, и напряжение $U_{пр}$ при обычных прямых токах можно считать примерно равным 0,7–0,8 В (для маломощных диодов эти результаты будут аналогичны, только кривые будут лежать чуть левее, и $U_{пр}$ составит примерно 0,6–0,7 В – проверьте!).

А вот для светодиодов падение напряжения существенно больше, сильнее меняется при изменении тока и больше разнится от типа к типу (рис. 9.9; 5). Для красных светодиодов (длина волны 700 нм) напряжение $U_{пр}$ минимально и лежит в пределах 1,7–2,2 В; оно повышается с понижением длины волны, и для синих-фиолетовых-ультрафиолетовых светодиодов (длина волны 400–430 нм) может достигать 3,5–4 В. Для белых ярких светодиодов, используемых в источниках света, $U_{пр}$ может лежать в пределах от 2,5 до 3,3 В.

Причем здесь представлен результат для маломощного осветительного светодиода вроде тех, что используются для карманных фонариков, а в светодиодных лампах стоят куда более мощные с допустимыми токами до 0,7–0,8 А. Этим объясняется значительное количество тепла, которое вынуждены рассеивать мощные осветительные диоды: при таких токах через них выделяющаяся тепловая мощность составит не менее 2–3 В. Это намного меньше, чем выделяет лампочка накаливания с такой же силой света (примерно 15–20 Вт), но для мощных осветительных светодиодов достаточно, чтобы сильно ограничить их срок службы (в отличие от маломощных сигнальных, которые в правильном режиме эксплуатации могут служить практически вечно).

Выпрямительный диод 1N4005

Сопротивление резистора R	Напряжение на диоде U_{np} , В	Ток через диод I_{np} , мА
20 Ом	0,85	537
82 Ом	0,80	137
120 Ом	0,79	93
180 Ом	0,77	62
560 Ом	0,73	20,1
1 кОм	0,71	11,3
5,6 кОм	0,64	2,0
10 кОм	0,62	1,1
20 кОм	0,60	0,57
30 кОм	0,58	0,38
51 кОм	0,56	0,22
75 кОм	0,54	0,153
100 кОм	0,52	0,115
220 кОм	0,49	0,052
430 кОм	0,45	0,027
1 МОм	0,43	0,0116

Выпрямительный диод КД258Г

Сопротивление резистора R	Напряжение на диоде U_{np} , В	Ток через диод I_{np} , мА
10 Ом	0,89	1043
20 Ом	0,81	537
82 Ом	0,74	134
150 Ом	0,7	74
330 Ом	0,66	33,8
560 Ом	0,63	20,3
1 кОм	0,60	11,5
5,6 кОм	0,53	2,0
10 кОм	0,51	1,16
30 кОм	0,47	0,4
100 кОм	0,43	0,12

Светодиод красный GNL-5013HT

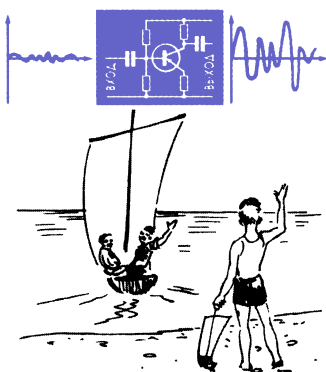
Сопротивление резистора R	Напряжение на диоде U_{np} , В	Ток через диод I_{np} , мА
360 Ом	2,2	27
560 Ом	2,03	17,8
1 кОм	1,9	10
5,6 кОм	1,7	1,85
18 кОм	1,65	0,58

Светодиод белый яркий BL-L101UWC

Сопротивление резистора R	Напряжение на диоде U_{np} , В	Ток через диод I_{np} , мА
360 Ом	3,2	24,5
560 Ом	3,0	16
1 кОм	2,85	9,2
5,6 кОм	2,66	1,7
20 кОм	2,6	0,47
51 кОм	2,55	0,18
100 кОм	2,54	0,09

Светодиод ультрафиолетовый BL-L522VC

Сопротивление резистора R	Напряжение на диоде U_{np} , В	Ток через диод I_{np} , мА
360 Ом	4,0	22
560 Ом	3,8	14,7
1 кОм	3,64	8,44
5,6 кОм	3,3	1,57
10 кОм	3,22	0,89
18 кОм	3,15	0,5



ГЛАВА 10

От усиления к усилителю

1. Мощность усиленного сигнала выделяется в нагрузке. Чтобы от общих представлений об усилителях, от усилителя в принципе, сделать первый шаг к конкретным усилительным схемам, нужно включить в цепь, где проходит коллекторный ток, нагрузку. Именно нагрузка отбирает у меняющегося коллекторного тока мощность, отбирает мощность у «мощной копии» сигнала, превращает ее в звук, в свет на экране, в какое-либо действие в системе автоматического управления или, наконец, просто в более мощный электрический сигнал, который подвергается дальнейшей обработке. Соответственно, в качестве нагрузки может быть включен громкоговоритель, светодиод, исполнительное устройство электронного автомата. Но для электрических цепей усилителя все они не более чем потребители энергии, такие же, как резисторы. И, интересуясь пока только «электрическими событиями» в транзисторном усилителе, будем считать его нагрузкой обычный резистор R_H (рис. 10.1; 6). Тем более что очень часто, когда от усилителя требуется просто более мощный электрический сигнал, именно резистор включен в коллекторную цепь.

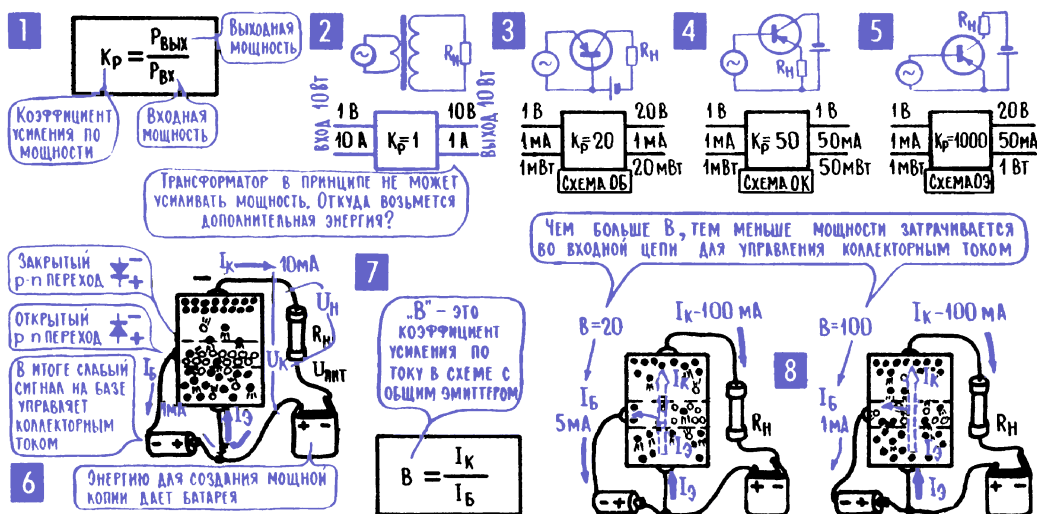


Рис. 10.1. Свойства транзистора

2. Усиление по мощности складывается из усиления по току и усиления по напряжению. Что должен сделать усилитель, усиливая слабый сигнал? Увеличить ток? Увеличить напряжение? Усилитель должен увеличить мощность сигнала. Если можно было бы обойтись только напряжением или только током, то не нужен был бы никакой усилитель, все прекрасно сделал бы обычный трансформатор. Усилитель применяют, когда от сигнала требуется большая мощность, когда у него просто не хватает сил, как, скажем, в примере с микрофоном и громкоговорителем (гл. 8; 16).

Мощность – произведение тока на напряжение, $P = U \cdot I$ (гл. 4; 11). А значит, можно разными способами увеличивать мощность, менять один из сомножителей – ток I или напряжение U – или оба вместе.

На рис. 10.1 показано несколько примеров того, что может произойти с мощностью электрического сигнала в некотором условном его преобразователе – он изображен в виде квадрата. Цифры в примерах подобраны так, чтобы без громоздких вычислений можно было уловить суть дела. Первый пример относится к трансформатору и подтверждает, что он не увеличивает мощность сигнала¹. Мощность могут повысить разные схемы транзисторных усилителей, но делают они это по-разному. Схема с общей базой (ОБ) повышает мощность, увеличивая напряжение сигнала (об этом принято говорить так: схема дает усиление по напряжению), схема с общим коллектором (ОК) – за счет увеличения тока (усиление по току), а схема с общим эмиттером (ОЭ) – увеличивая и ток и напряжение, причем, как правило, в разное число раз. Нужно, по-видимому, пояснить, что термины «общая база» ОБ, «общий коллектор» ОК и «общий эмиттер» ОЭ отражают особенности включения самого транзистора в схему усилителя. Об этих особенностях речь впереди (см. гл. 12; 8–16), а пока знакомство с транзисторным усилителем продолжим на примере самой распространенной его схемы с общим эмиттером ОЭ, которая, кстати, рассматривалась и во всех предыдущих примерах (рис. 9.8, рис. 10.1; 6).

3. Усилительные возможности транзистора отражает его коэффициент усиления по току (β). То, что транзистор дает усиление по току, связано с процессами, которые происходят в базе. Все попавшие сюда из эмиттера заряды можно разделить на две части – те, что проходят в коллекторный переход и в итоге включаются в коллекторный ток, и те заряды, которые в коллекторный переход не попадают, а циркулируют во входной цепи, поддавшись притягивающему действию напряжения на базе.

Не забывайте – эмиттерный переход открыт: у p - n - p -транзистора на базе «минус», и он старается забрать себе все свободные положительные заряды, все дырки, которые приходят из эмиттера. Это нормальное, законное действие базы; если бы оторвать от транзистора коллектор, то в базовой цепи циркулировали бы вообще все заряды, вышедшие из эмиттера. Од-

¹ Даже несколько уменьшает, т. к. трансформаторов без потерь не существует.

нако же коллектор существует, и за счет диффузии в тонкой базе часть зарядов отклоняется от своего нормального, законного пути во входную цепь, попадает в коллекторный переход.

Введем несколько обозначений. Все заряды, которые вышли из эмиттера, создают эмиттерный ток I_E (рис. 10.2; 1), те, что попали в коллекторный переход, создают коллекторный ток I_K , а те, что сумела захватить база, воспользовавшись своими законными правами, своим «минусом», замыкают по входной цепи и создают базовый ток I_B .

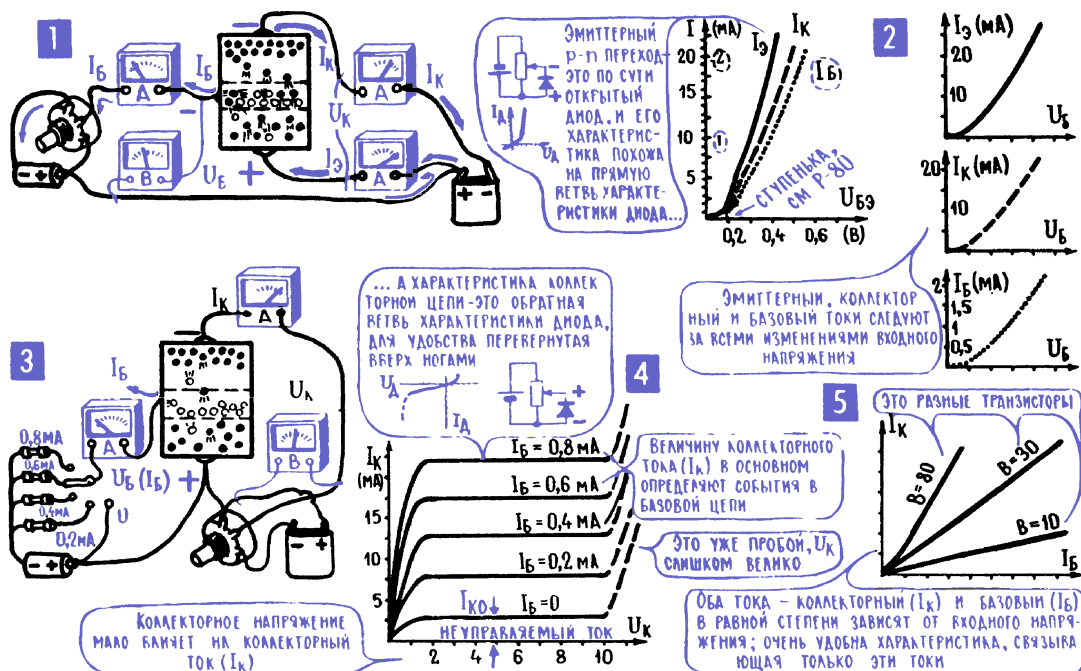


Рис. 10.2. Усилительные функции транзистора

Если распутать всю цепочку событий во входной цепи усилителя, то она будет выглядеть так: усиливаемый сигнал – напряжение U_E – действует между базой и эмиттером; слабый сигнал U_E создает прямой ток I_E в эмиттерном переходе; часть этого тока – I_K – уходит в коллекторную цепь, она будет использована для создания мощной копии сигнала. Когда меняется напряжение U_E , то меняется I_E , а вместе с ним I_K , это и означает, что слабый сигнал U_E управляет мощным потоком энергии I_K . Часть общего тока I_E замыкается во входной цепи – это базовый ток I_B , он, по сути дела, и определяет ту энергию, которую должен отдавать транзистору источник слабого усиливаемого сигнала.

Отсюда – предельно простой и исключительно важный вывод: чем большая часть I_E приходится на долю I_K , то есть чем больше I_K , по сравнению с I_B , тем большее усиление по току дает транзистор. Или, иными словами,

несколько более глубоко отражающими суть дела: чем больший коллекторный ток I_k создается сигналом, который создает при этом во входной цепи ток I_{ϵ} , тем выше усиление по току. И наконец, третье описание сложившихся взаимоотношений между токами транзистора: отношение I_k к I_{ϵ} называется «коэффициент усиления по току» β , и чем выше этот коэффициент β , тем лучше транзистор усиливает ток (рис. 10.1; 7, 8).

Если бы заряды, вышедшие из эмиттера, поровну делились бы между I_k и I_{ϵ} , то коэффициент β был бы равен единице и никакого усиления по току не было бы. Если бы I_{ϵ} оказался больше, чем I_k , то β был бы меньше единицы, и транзистор вместо усиления ослаблял бы ток. Чтобы ток усиливался, нужно, чтобы β было больше единицы, и чем оно больше, тем выше усиление тока. Коэффициент усиления по току для реальных транзисторов лежит в пределах от 10–15 до 250–300. Узнать коэффициент β можно по названию транзистора, пользуясь справочником (см. далее табл. 10.1), а можно измерить его с помощью простейших приборов.

Примечание редактора. Коэффициент усиления по току (полное название «коэффициент передачи тока в режиме малого сигнала в схеме с общим эмиттером») иногда обозначают греческой буквой β , но в справочниках чаще всего используют странно выглядящее для непосвященного обозначение h_{21} . При этом коэффициент передачи тока «в режиме большого сигнала» иногда обозначают большой буквой β , на практике он употребляется для мощных транзисторов и в справочниках обозначается как h_{21} (с большой буквой «Э» в конце). Разница между ними (см. [1]) для практических нужд незначительна, и ей можно пренебречь, поэтому мы везде употребляем букву β . Объяснение этим странным обозначениям читатель может найти во множестве источников, но для практики оно не требуется: достаточно обозначение просто запомнить. Для современных биполярных транзисторов малой мощности β (h_{21}) обычно не менее 200; для старых моделей, находящихся применение и сегодня, таких как отечественные КТ3102, – не менее 100; верхняя граница от 300–500 до 1000. Поэтому обычно измерять его не требуется: с достаточным запасом можно принять этот коэффициент равным 50–100, чего для практических расчетов достаточно. Для транзисторов средней и большой мощности β (h_{21}) обычно гораздо меньше (см. табл. 10.1).

4. О взаимосвязи токов и напряжений в транзисторном усилителе рассказывают его вольт-амперные характеристики. Зависимость общего тока I_{Σ} в эмиттерном p - n -переходе от приложенного к нему напряжения U_{ϵ} , а вместе с ней зависимость базового тока I_{ϵ} и коллекторного I_k от этого напряжения (рис. 10.2; 2) в точности повторяют уже знакомую нам вольт-амперную характеристику диода (рис. 9.5). Строго говоря, только ток I_{Σ} можно считать истинным током через диод, а токи I_{ϵ} и I_k – это лишь его ответвления, его части. Но части, которые в точности следуют за всеми изменениями целого. Поэтому вольт-амперные характеристики для токов I_{ϵ} и I_k почти в точности повторяют вольт-амперную характеристику для тока I_{Σ} , и если их построить в определенных масштабах (одинаковым

отрезкам на вертикальной оси соответствуют разные значения токов), то все три характеристики будут почти неотличимы (рис. 10.2; 2).

На основе последних двух характеристик можно построить еще одну – она покажет, как зависит коллекторный ток от базового (рис. 10.2; 5), то есть ток I_k , в котором отражен выходной сигнал, от тока I_b , в котором отражен входной сигнал. Эта характеристика пойдет тем круче, чем больше коэффициент усиления по току β – одному и тому же изменению базового (входного) тока при разных β будут соответствовать разные изменения коллекторного (выходного) тока.

Нетрудно построить вольт-амперную характеристику и для коллекторного p - n -перехода. Нужно только помнить, что на коллектор подается «минус» (в p - n -транзисторе), что коллекторный переход работает в режиме диода, включенного в обратном направлении, запертого. Вольт-амперная характеристика коллекторной цепи (рис. 10.2; 4) – это есть обратная ветвь вольт-амперной характеристики диода (рис. 9.5), для удобства лишь перевернутая «вверх ногами». На этой характеристике целое семейство кривых – они относятся к нескольким значениям тока в эмиттерном p - n -переходе.

Вспомните: чем больше открыт транзистор, то есть чем больше напряжение, подведенное к участку эмиттер–база, и, следовательно, чем больший ток I_b идет в этой цепи, тем больше и коллекторный ток I_k . На характеристиках коллекторной цепи это влияние I_b на I_k отражено именно в том, что характеристик этих много, каждая более высокая кривая соответствует большему входному току транзистора. Семейство коллекторных характеристик не только говорит о том, как ведет себя выходная цепь транзистора сама по себе (как I_k зависит от U_k), но и как влияет на ее поведение входная цепь.

Примечание редактора. Во избежание недоумений читателя необходимы пояснения по поводу часто и далее упоминаемого автором напряжения база–эмиттер как управляющего током коллектора. В теоретических источниках [1–4] неоднократно подчеркивается, что напряжение эмиттер–база не может выйти за пределы прямого падения напряжения на p - n -переходе (0,6–0,7 В), так как базовый переход представляет собой диод, включенный в прямом направлении. В этом легко убедиться и на практике, просто померив напряжение база–эмиттер на правильно включенном открытом транзисторе (например, по схеме на рис. 10.13; 1 при верхнем положении переключателя К1). Если вы попытаетесь подать на базу в таком включении напряжение, например, 2 В от достаточно мощного источника, то базовый переход просто выгорит; если ток каким-то образом ограничить (например, резистором, как на рис. 10.3; 5 или том же рис. 10.13; 1), то напряжение установится все равно на уровне 0,6–0,7 В. О каком же управлении коллекторным током с помощью напряжения на базе можно говорить?

В теории действительно утверждается, что напряжение между базой и эмиттером $U_{бэ}$ задает коллекторный ток I_k (т. н. модель Эберса–Молла, см. [1, 3]). Только

величина $U_{\text{ба}}$ при этом измеряется милливольтами и при практически значимых токах $I_{\text{к}}$ не выходит за пределы значений 0,4–0,7 В (для сравнения см. вольт-амперную характеристику диода, например, на рис. 9.9; 4). К тому же это напряжение зависит от температуры (падает примерно на 2 мВ на каждый градус повышения температуры, соответственно, меняется и $I_{\text{к}}$), потому даже если вы исхитритесь точно задать его величину в таком узком диапазоне, никакого стабильного усиления вы не получите (см. также «Примечание редактора» к разделу 21 этой главы). Истинной задающей величиной является ток базы $I_{\text{б}}$, которым манипулировать гораздо проще, и именно с его помощью задается режим усиления транзистора. С учетом этих замечаний следует рассматривать примеры усилительных схем автора в этой и последующих главах. Подробнее вопрос правильного построения усилительного каскада на транзисторе разбирается в *Практикуме* в конце данной главы.

Что же касается собственного поведения коллекторного перехода, то оно всегда одинаково – с увеличением напряжения на коллекторе $U_{\text{к}}$ коллекторный ток $I_{\text{к}}$ сначала быстро нарастает, а потом почти не меняется: почти все заряды, которые база впрыснула в коллекторный переход, уже включились в коллекторный ток, и дальше он расти просто не может. Нет материала, нет резерва в армии движущихся зарядов. Теперь существует только один способ увеличить ток $I_{\text{к}}$: нужно увеличить базовый ток $I_{\text{б}}$ и тем самым перейти на следующую ступень в семействе коллекторных характеристик.

5. Во избежание искажений нужно создать в базовой цепи некоторый начальный ток – ток смещения. Пристыковав к одной из входных вольт-амперных характеристик транзистора (рис. 10.2; 2) график переменного напряжения, которое нужно усилить, график слабого усиливаемого сигнала, можно получить график его мощной копии, график изменения коллекторного тока. Первая же попытка выполнить такую операцию сталкивает нас с чрезвычайно неприятным явлением, которого, между прочим, следовало ожидать: под действием переменного напряжения во входной цепи транзистора идет не переменный, а пульсирующий ток (рис. 10.3; 1), так же, как шел пульсирующий ток в цепи полупроводникового диода (рис. 9.6). И поэтому в процессе усиления мы до неузнаваемости искажим слабый сигнал, что, мягко говоря, весьма нежелательно. Без подробного анализа обстановки сразу же предложим верный способ борьбы с такими искажениями сигнала: к входной цепи транзистора вместе с усиливаемым сигналом нужно подвести еще некоторое постоянное напряжение, создать некоторый ток смещения. И подобрать этот ток смещения нужно с таким расчетом, чтобы сигнал на входе транзистора, с одной стороны, не переходил опасную границу допустимого прямого тока базы, а с другой – не попадал в область запирающих напряжений, в область «минуса» на базе *n-p-n*-транзистора (рис. 10.3; 2). Устанавливая начальное смещение, очень часто приходится поглядывать и на допустимый коллекторный ток, его тоже нельзя превышать.

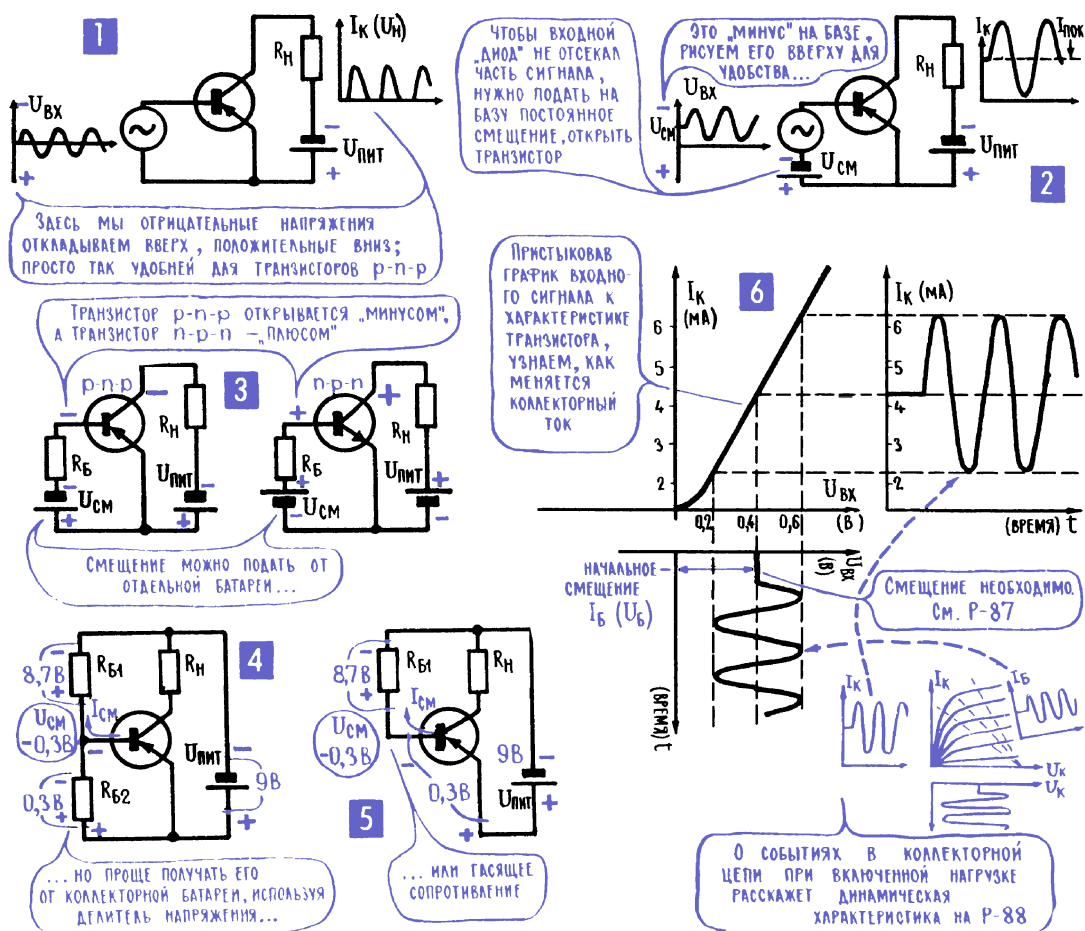


Рис. 10.3. Смещение рабочей точки транзистора

6. Смещение на базу легко подать от коллекторной батареи. Существуют разные способы введения в базовую цепь постоянного тока смещения $I_{см}$. Можно для этого использовать отдельную батарею (рис. 10.3; 3), а можно подать на базу необходимое постоянное напряжение от коллекторной батареи. Чтобы открыть эмиттерный переход, на базе относительно эмиттера в $n-p-n$ -транзисторах должен быть «плюс» (чтобы появился постоянный ток $I_{см}$ между базой и эмиттером, должно появиться постоянное напряжение $U_{см}$). Но коллекторная батарея тоже дает «плюс» относительно эмиттера — этот «плюс» как раз и подается на коллектор. Коллекторное напряжение, если можно так сказать, имеет удачную полярность, чтобы по совместительству использовать его для подачи положительного смещения на базу.

Можно попробовать сделать это с помощью делителя (рис. 10.3; 4), который в нужное число раз уменьшает напряжение – на коллектор подается несколько вольт, а смещение на базе составляет доли вольта. Более простой и надежный способ подачи смещения – «минус» попадает на базу через гасящий резистор R_6 (рис. 10.3; 5). Ток базы, проходя по этому резистору, создает на нем значительное падение напряжения, и на базе остается малая часть коллекторного напряжения. Чем меньше сопротивление гасящего резистора R_6 , тем меньшая часть коллекторного напряжения теряется на нем, тем больше отпирающий «плюс» на базе. Об этом можно сказать и иначе: входное сопротивление эмиттерного перехода мало (транзистор открыт), а последовательно с ним включено R_6 со сравнительно большим сопротивлением. И поэтому именно R_6 определяет ток в цепи (рис. 4.5): чем меньше R_6 , тем больше этот ток, который для транзистора служит начальным током смещения.

Точно подобрав величину начального смещения, можно попробовать установить такой режим транзистора, при котором, по крайней мере, не будут «отрезаться» куски сигнала и не будет связанных с этим огромных нелинейных искажений. Однако же неизбежной платой за неискаженный сигнал станет некоторый напрасный расход энергии батареи, в частности начальный ток смещения $I_{см'}$, а вместе с ним постоянный ток в коллекторной цепи – ток покоя $I_{пок}$ – будут потреблять энергию даже в том случае, когда сигнала нет («молчание перед микрофоном»; рис. 10.4).

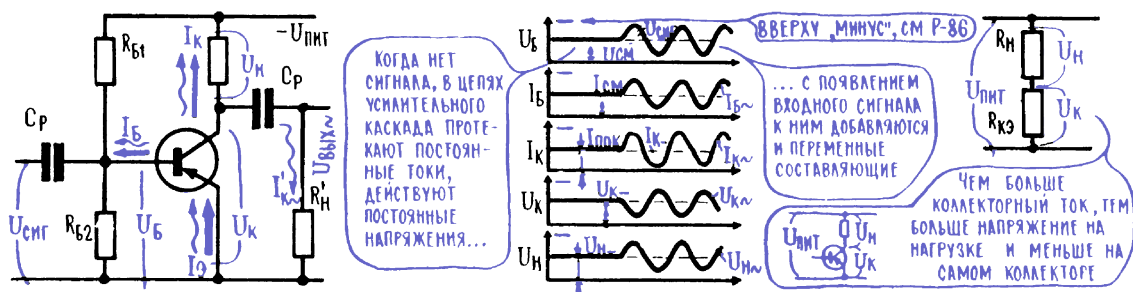


Рис. 10.4. Включение транзистора для усиления переменного сигнала

7. Меняющийся коллекторный ток создает на нагрузке меняющееся напряжение. Коллекторный ток, по сути дела, есть сумма переменной составляющей $I_{к-}$ и постоянной $I_{к'}$, которая при отсутствии сигнала равна току покоя $I_{пок}$ (рис. 10.4). Ток покоя появился в коллекторной цепи под действием постоянного смещения на базе $U_{см'}$, а переменная составляющая – под действием оруduющего на базе сигнала $U_{сиг}$. В случае необходимости переменную составляющую коллекторного тока, точнее часть ее, можно отделить, ответить в сторону с помощью простейшего RC-фильтра (гл. 6; 17) и получить таким образом усиленный сигнал $U_{вых}$ в чистом виде.

Но это все будет потом, а пока придется признать, что если коллекторный ток I_k есть сумма постоянной и переменной составляющих, то и напряжение на нагрузке U_n тоже можно рассматривать как сумму постоянного и переменного напряжений: $U_n = U_{n-} + U_{n+}$. Напряжение на нагрузке по пятам следует за всеми изменениями коллекторного тока: ток увеличивается – и оно растет, ток уменьшается – и оно падает. И одновременно с изменением напряжения на нагрузке меняется и напряжение U_k на самом коллекторе, точнее между коллектором и эмиттером.

8. При включенной нагрузке в момент наибольшего коллекторного тока напряжение на коллекторе минимально. Все напряжение питания $U_{пит}$ распределяется между нагрузкой R_n и самим транзистором. И чем большая часть этого напряжения остается на нагрузке, тем меньше достается коллектору. Поэтому при максимальном коллекторном токе, при котором напряжение на нагрузке самое большое, на коллекторе остается минимальное напряжение. Об этом можно сказать еще и так: сопротивление нагрузки R_n и сопротивление коллекторной цепи транзистора $R_{кэ}$ (это в основном сопротивление коллекторного $p-n$ -перехода) образуют делитель напряжения (гл. 4; 10), на котором распределяется все напряжение питания $U_{пит}$. Усиливаемый сигнал, действуя с командного пункта, с базы, меняет сопротивление коллекторного $p-n$ -перехода, а значит, меняет соотношение сопротивлений в делителе $R_n / R_{кэ}$, меняет распределение напряжений на нем. В сумме эти напряжения всегда равны $U_{пит}$, поэтому если уменьшается сопротивление $R_{кэ}$ и вместе с ним U_k , то одновременно на столько же вольт возрастает U_n .

Напряжения U_n и U_k меняются противофазно: когда напряжение на нагрузке растет, напряжение на коллекторе падает, и наибольшему коллекторному току соответствует наименьшее коллекторное напряжение.

Вспомним (в который раз!), что мощность – это произведение тока на напряжение, и отсюда сделаем вывод, что мощность усиленного сигнала на нагрузке транзистора $P_{н-} = I_{к-} \cdot U_{н-}$. Добиваясь от транзисторного усилителя большой выходной мощности, мы, к сожалению, никак не можем влиять на переменную составляющую коллекторного тока $I_{к-}$: она зависит от того, что дает источник сигнала, и от того, во сколько раз базовый ток усиливается в транзисторе (β). А вот второй множитель выходной мощности – переменное напряжение на нагрузке $U_{н+}$ – целиком в наших руках.

Человек, который всегда носит с собой закон Ома, пользуясь формулой $U = I \cdot R$, сумеет повысить $U_{н-}$ простейшим способом – нужно лишь увеличить сопротивление нагрузки R_n . Но, конечно, делать это, как и вообще все на свете, можно лишь до определенного предела². Пытаясь выяснить,

² А именно – до нарушения условия нахождения постоянного напряжения коллектора (рабочей точки, напряжения смещения) в пределах линейного участка характеристик (см. рис. 10.3; 6 и рис. 10.5 далее). Более подробные пояснения см. в разделе 22 этой главы.

что именно и в какой степени ограничивает сопротивление нагрузки, мы входим в область конструирования и налаживания практических схем транзисторных усилителей. Но прежде, чем сделать первый шаг в эту огромную и интересную область, несколько слов об основных типах транзисторов и некоторых их параметрах.

9. Важные параметры транзисторов: допустимые токи, напряжения, мощности, усиление по току β , обратный ток коллектора $I_{кбо}$ ³, граничная частота f_p . Допустимые параметры для данного типа транзисторов – предельно допустимый постоянный коллекторный ток $I_{доп}$, допустимые напряжения между коллектором и эмиттером $U_{кэ,доп}$ между базой и эмиттером $U_{бэ,доп}$ ⁴, допустимая рассеиваемая мощность на коллекторе $P_{к,доп}$ – приводятся в справочниках (см. табл. 10.1) и имеют тот же смысл, что и любые допустимые параметры, – их ни в коем случае нельзя превышать.

Все ограничения токов и напряжений в транзисторе чаще всего связаны с их тепловым режимом. Полупроводники очень чувствительны к повышению температуры. Нагрев приводит к резкому увеличению числа собственных носителей заряда, лавинообразно нарастают созданные этими зарядами токи, которые в итоге и производят разрушительную работу – соединяют накоротко, сваривают зоны транзистора, превращают его в простой проводник. Или наоборот – разрушают материал настолько, что образуется разрыв цепи. Обе эти разновидности неустраимых повреждений легко обнаружить омметром (рис. 9.8; 9, 10). Но еще проще сделать так, чтобы повреждений этих не было совсем.

Примечание редактора. Предельно допустимые параметры не только не могут быть превышены: нельзя эксплуатировать полупроводниковые приборы в условиях, когда одновременно два и более параметров достигают предельных значений. Это положение наглядно можно проиллюстрировать на примере йога, который ходит по горячим углям, выдерживает давление многотонного грузовика на грудную клетку и не мерзнет голым на 30-градусном морозе. А теперь представьте, что его заставили все это проделать одновременно, а?

Особенно велики опасности разрушительного перегрева в коллекторной цепи, где создается «мощная копия» сигнала, циркулируют довольно большие токи и действуют немалые напряжения. Для коллекторной цепи указывают предельные токи и напряжения, а также отдельно предель-

³ В оригинале «неуправляемый коллекторный ток $I_{кю}$ » – такой термин никогда не употреблялся, в справочниках вы его не встретите, поэтому он здесь, как и далее, заменен на официально принятый «обратный ток коллектора $I_{кбо}$ ». Полностью параметр называется «ток через переход коллектор–база при заданном обратном напряжении на коллекторе и при разомкнутой цепи эмиттера» (ГОСТ 18604.4–74).

⁴ Имеется в виду обратное напряжение база–эмиттер, при запертом эмиттерном переходе (при подаче тока в прямом направлении переход открыт, и напряжение на нем в соответствии с рис. 9.5 менее 1 В).

ную мощность. Легко увидеть (см. табл. 10.1), что предельно допустимый коллекторный ток $I_{к.доп}$ и предельно допустимое напряжение на коллекторе $U_{кэ.доп}$, установленные одновременно, дадут мощность на коллекторе, значительно превышающую максимально допустимую (например, для мощного транзистора BD809 произведение $I_{к.доп}$ на $U_{кэ.доп}$ даст мощность 800 Вт, тогда как транзистор даже с теплоотводом допускает лишь 90 Вт). Поэтому придется рассчитать схему так, чтобы при предельно допустимом токе 10 А напряжение никогда не превышало 90 В / 10 А = 9 В, или наоборот – при предельно допустимом напряжении 80 В ток не мог превысить 90 В / 80 В ≈ 1,1 А.

Таблица 10.1. Основные параметры некоторых комплементарных⁵ пар биполярных транзисторов

Название	$I_{к.доп}$, А	$U_{кэ.доп}$, В	$P_{к.доп}$, Вт	$\beta(h_{21э})$	$I_{кбо}$, мкА	$f_{гр}$, МГц
Малой мощности						
КТ3102* (n-p-n)	0,1	20–50	0,25	100–1000	0,1 (25°) 5 (85°)	150–200
КТ3107* (p-n-p)	0,1	25–50	0,25	70–800	0,1 (25°) 4 (125°)	200
BC337-40 (n-p-n) BC327-40 (p-n-p)	0,8	50	0,625	250–630	0,1 (25°)	100
Средней мощности						
BD139 (n-p-n) BD140 (p-n-p)	1,5	80	1,25** 8***	40–250	0,1 (25°)	190
Большой мощности						
КТ818Б (p-n-p) КТ819Б (n-p-n)	10–15	100	1,5** 60***	12	1 мА (25°) 10 мА (100°)	3
BD809 (n-p-n) BD810 (p-n-p)	10	80	90***	15–30	1 мА (25°)	1,5

* Обобщенные данные для транзисторов с разными буквенными индексами (КТ3102Г–КТ3102К и КТ3107А–КТ3107Л).

** Постоянная рассеиваемая мощность без дополнительного теплоотвода.

*** Максимальная постоянная рассеиваемая мощность (с теплоотводом).

В таблице приведены следующие параметры: предельно допустимый постоянный ток коллектора $I_{к.доп}$, предельно допустимое напряжение коллектор–эмиттер $U_{кэ.доп}$, предельно допустимая постоянная рассеиваемая мощность коллектора $P_{к.доп}$; усиление по току $\beta(h_{21э})$, обратный ток коллектора $I_{кбо}$, граничная частота $f_{гр}$ (пояснение к этому параметру см. далее в тексте). Предельно допустимое напряжение между базой и эмиттером

⁵ Комплементарными (дополнительными) называют транзисторы разной полярности, но с близкими (хотя и необязательно полностью идентичными) характеристиками.

$U_{бэ, доп}$ для всех кремниевых транзисторов, за редчайшим исключением, может быть принято равным 5 В.

В процессе производства большинство транзисторов подвергают квалификационным испытаниям и в зависимости от результатов делят на категории по параметрам (см. далее гл. 10; 10). Категории в отечественной практике обозначаются дополнительной буквой после названия: КТ3102Г, КТ3102Е, КТ3102Ж и т. д.; у импортных транзисторов это может быть число (BC337-40). Причем у отечественных транзисторов одна категория может превышать другие по одному параметру, но отставать по другому: так, КТ3102Е имеет высокий коэффициент усиления по току (400...1000), но ниже других категорий по допустимому напряжению коллектор-эмиттер (всего 20 В). У импортных деление на категории, как правило, означает отличия только по одному параметру (обычно допустимому напряжению $U_{кэ, доп}$ или коэффициенту усиления $h_{21э}$).

На вольт-амперной характеристике коллекторной цепи (рис. 10.5) есть дугообразная линия, граница допустимой мощности. Эта линия появилась как результат простых арифметических операций: определялись такие пары тока I_k и напряжения U_k , при которых $P_k = I_k \cdot U_k$ не превышает допустимую мощность $P_{к, доп}$. Точно такая же граница допустимых токов и напряжений может быть построена для любого реального транзистора.

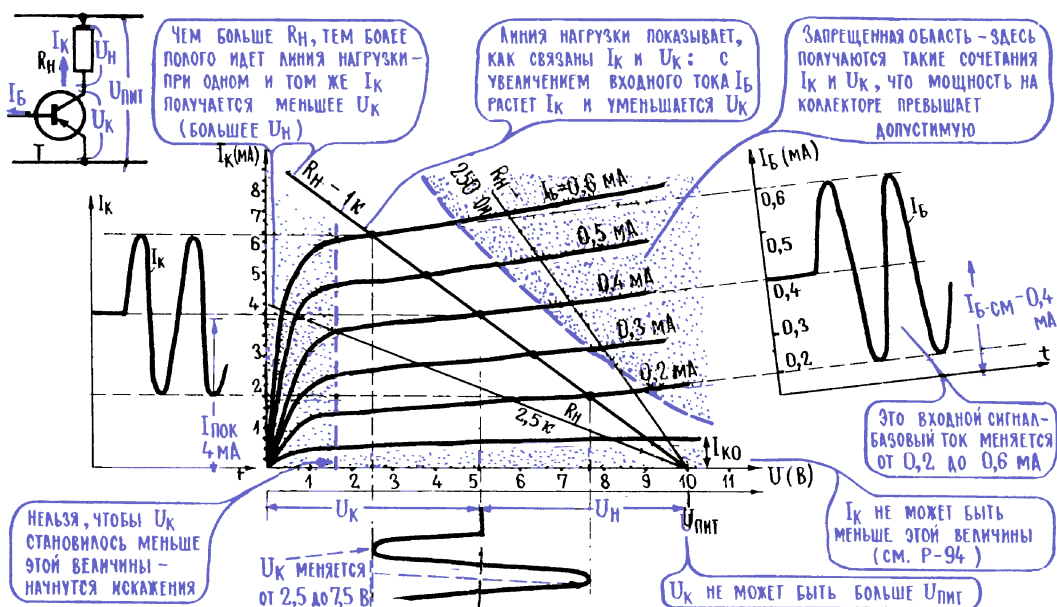


Рис. 10.5. Выходные характеристики транзистора

Допустимые параметры для мощных транзисторов (BD809/BD810 в табл. 10.1) обычно приводятся в расчете на то, что они работают с внешними радиаторами, которые отводят тепло, предотвращают повышение

температуры полупроводниковых материалов. При работе без радиаторов предельные параметры мощных транзисторов снижаются, как правило, в десять–двадцать раз (см. характеристики для пары BD139/BD140). Если, скажем, с радиатором транзистор может создать «мощную копию» сигнала в 10 Вт, то без радиатора он едва вытерпит режим, при котором выходная мощность один ватт, а то и полватта.

О важнейшем усилительном параметре транзистора, коэффициенте усиления по току β , мы уже говорили (гл. 10; 3). Стоит лишь добавить, что измерение β может производиться в разных схемах и режимах. Если входить в тонкости, то можно насчитать несколько разных значений этого коэффициента. Мы же ограничимся одним значением β – так называемым статическим коэффициентом усиления ($h_{21э}$), который получают, измерив на прямолинейном участке вольт-амперной характеристики постоянный ток $I_б$ и соответствующий ему постоянный ток $I_к$. Многие мультиметры имеют специальные гнезда для измерения коэффициента усиления транзисторов.

Параметр «предельная частота», или, иначе, «границная частота» $f_{гр}$, тоже не требует особых пояснений. Разные типы транзисторов по-разному работают на разных частотах. Причем граница существует только со стороны высоких частот: если транзистор работает на частоте $f_{гр}$, то он прекрасно работает и на более низких частотах. Граничной обычно считают ту частоту, на которой усилительные способности транзистора ухудшаются примерно на 30 %. При дальнейшем увеличении частоты коэффициент усиления быстро падает, и вскоре транзистор вообще перестает усиливать.

И несколько слов о еще одном важном параметре – обратном токе коллектора $I_{кбо}$. Во всяком полупроводниковом материале, кроме тех свободных зарядов, которые появились с введением донора или акцептора, есть еще и собственные свободные заряды. Их сравнительно немного, но они есть. Причем если примесь создает в полупроводнике лишь один тип проводимости – только p или только n , – то собственных дырок и электронов в любом проводнике поровну. В зоне n собственные свободные электроны смешиваются с примесными, а вот собственные дырки так и живут особняком, создают в зоне n небольшую дырочную проводимость. Точно так же в зоне p собственные дырки полупроводника теряются в общей массе примесных положительных зарядов, а собственные свободные электроны создают небольшую проводимость n -типа.

Пользы от этих собственных свободных зарядов, собственных носителей электрического заряда, нет никакой, сплошной вред. Они создают ток, когда p - n -переход закрыт, именно из-за них полупроводниковый диод пропускает ток не только в прямом, но и в обратном направлении (гл. 9; 10). Неосновных носителей немного, обратный ток через p - n -переход невелик, но все-таки он есть и нередко доставляет массу хлопот.

Особенно неприятен обратный ток коллекторного p - n -перехода $I_{кбо}$. На рис. 10.5 отмечен некий ток $I_{ко}$, который течет через транзистор даже тогда, когда он полностью закрыт (база соединена с эмиттером, ток базы равен нулю). Это следствие как раз наличия обратного тока коллектора, и самое неприятное не то, что он есть, а то, что он сильно зависит от температуры (см. табл. 10.1). Появление собственных носителей, собственных свободных зарядов, связано только с тепловыми движениями атомов в кристаллической решетке полупроводника (гл. 9; 5). И чем выше температура, тем энергичнее эти движения, тем больше становится собственных носителей. Изменяясь с температурой, обратный ток коллектора может влиять на работу всего усилителя, и поэтому стараются, чтобы ток $I_{кбо}$ был как можно меньше.

Примечание редактора. Обратный ток перехода коллектор–база $I_{кбо}$ в германиевых транзисторах достигал десятков микроампер при комнатной температуре 20–25°. Ток этот увеличивается примерно вдвое на каждые 10° повышения температуры, потому при нагревании транзистора до 70° он мог, как легко подсчитать, вырасти примерно в $2^5 = 32$ раза и составить уже единицы миллиампер, что сравнимо с рабочими токами маломощных каскадов усиления. Более того, наличие обратного тока в германиевых транзисторах приводило к эффекту лавинообразного нарастания тока коллектора при случайном включении с «оборванной базой» – растущий коллекторный ток нагревает транзистор, а нагревание, в свою очередь, еще больше увеличивает коллекторный ток. Из-за этого эффекта транзистор «с оборванной базой» очень быстро сгорал. Поэтому в германиевых транзисторах с током $I_{кбо}$ пришлось серьезно бороться.

У маломощных кремниевых транзисторов температурная зависимость тока $I_{кбо}$ даже немного выше, чем у германиевых (увеличение примерно в 10 раз на каждые 30°), но сама абсолютная величина тока ничтожна – при комнатной температуре составляет доли микроампера и даже при повышенной не превышает единиц микроампер (см. табл. 10.1) (почему так, легко понять, если сравнить собственные проводимости германия и кремния, см. гл. 9; 5). Поэтому в схемах с кремниевыми транзисторами наличие обратного тока коллектора можно спокойно игнорировать: величина $I_{ко}$, показанная на рис. 10.5, для них настолько мала, что ее невозможно изобразить в нормальном масштабе. Единственное, что осталось в практике с тех времен: рекомендация «на всякий случай» не включать питание транзисторов с нигде не подключенной («оборванной») базой. Действительно, для мощных транзисторов величина $I_{кбо}$ может быть достаточно велика для того, чтобы основательно «саморазогреть» транзистор (см. данные КТ818Б/КТ819Б в табл. 10.1: 10 мА ($I_{кбо}$ при 100°) · 100 В ($U_{кз,доп}$) = 1 Вт!).

10. Основные типы транзисторов: высокочастотные и низкочастотные, германиевые и кремниевые, p - n - p - и n - p - n -транзисторы малой, средней и большой мощности. Заглянув в справочник по полупроводниковым приборам, можно увидеть там такое огромное множество наименований диодов и транзисторов, что даже страшно становится. К счастью,

многие типы полупроводниковых приборов очень похожи, они имеют близкие характеристики и параметры, во многих случаях возможна совершенно безболезненная замена одних приборов другими. Да и вообще диоды и транзисторы можно разбить на несколько групп, внутри которых уже не так-то сложно разобраться, какой прибор от какого и чем отличается. В свое время мы разделили все диоды на несколько групп – импульсные, выпрямительные, силовые. Среди, например, выпрямительных диодов можно выделить сравнительно силовоточные приборы, допускающие прямые токи в несколько ампер и более, и группу приборов, допускающих прямой ток порядка 1 А и менее. В этой второй группе диоды различаются в основном только допустимым обратным напряжением (диоды 1N4001–1N4007, табл. 9.1), и можно совершенно спокойно заменять один тип диодов другим, если следить за тем, чтобы напряжение, действующее в схеме, не превысило допустимую для данного диода величину.

Нужно сказать, что многообразие типов полупроводниковых приборов получается как бы само собой, как результат выбранного технологического процесса. Действительно, зачем было бы делать семь типов диодов 1N4001–1N4007, рассчитанных на напряжение от 50 до 1000 В, если у них все остальные параметры одинаковы? Можно было, казалось бы, ограничиться одним типом 1N4007, выдерживающим 1000 В, и использовать его во всех схемах с более низким напряжением. Однако же технология производства диодов такова, что в каждой партии получают диоды, которые могут выдержать сравнительно большое напряжение, и такие, что терпят напряжение поменьше. Все эти диоды делят на категории и устанавливают цену на них с таким расчетом, чтобы было невыгодно применять высоковольтный прибор там, где можно обойтись более низковольтным.

Вот так же нередко появляются разные типы транзисторов в пределах одной группы или одного основного типа приборов. И бывает даже, сами эти основные типы различаются не очень сильно, не больше, наверное, чем разные модели «жигулей» (см. примечание к табл. 10.1).

Все транзисторы также можно разбить на несколько основных групп, которые уже сильно отличаются и по своим возможностям, и по использованию в схемах. Когда-то одним из главных признаков деления был сам материал, из которого сделан транзистор: кремний или германий. Кремниевые приборы работают при более высоких температурах, у кремниевых транзисторов при прочих равных условиях удастся получить меньшие значения обратного тока коллектора, и кремний в настоящее время остался почти монополистом в производстве транзисторов⁶. Другой признак деления – граничная частота, он делит все транзисторы на две большие

⁶ Некоторое количество дискретных (то есть не входящих в микросхемы или другие интегральные устройства) транзисторов производится из арсенида галлия, в основном для военных или космических применений.

группы – низкочастотные и высокочастотные. К первым относят транзисторы с граничной частотой в десятки, в лучшем случае сотни килогерц. А высокочастотные приборы добрались уже до частот в сотни и тысячи мегагерц⁷.

Очень сильно отличаются транзисторы, рассчитанные на получение различной выходной мощности. Их можно условно разбить на две группы – маломощные, у которых $P_{к.доп}$ около 0,5 Вт и менее, и транзисторы средней и большой мощности – у них $P_{к.доп}$ несколько ватт или несколько десятков ватт. Эти приборы различаются и по электрическим параметрам, и чисто внешне, они никогда не заменяют друг друга. Здесь, наверное, уместно такое сравнение: маломощные транзисторы и мощные похожи не больше, чем юркие «запорожцы» на многотонные МАЗы.

И наконец, все транзисторы – низкочастотные и высокочастотные, маломощные и мощные, германиевые и кремниевые – можно четко разделить на две группы: транзисторы со структурой $p-n-p$ и транзисторы со структурой $n-p-n$ ⁸. В принципе, тип проводимости, структура транзистора мало влияют на его свойства и возможности: высокочастотный мощный кремниевый $p-n-p$ -транзистор работает примерно так же, как и высокочастотный мощный кремниевый транзистор $n-p-n$. Так, может быть, стоит ограничиться транзисторами одного какого-нибудь типа проводимости и другие вообще не выпускать? Оказывается, совместное применение транзисторов разной проводимости открывает новые возможности построения электронных схем, делает их проще, надежнее.

Напомним, к транзисторам разной проводимости нужно в противоположной полярности подводить питающие напряжения, в них разное направление имеют все токи, и если транзистор $p-n-p$ отпирается «минусом» на базе, а «плюсом» запирается, то транзистор $n-p-n$ совсем наоборот – отпирается «плюсом» и запирается «минусом» (рис. 9.8 и 10.3). Все так и должно быть: в транзисторах разной проводимости одну и ту же работу на одних и тех же участках выполняют разные заряды – там, где у одного работают свободные положительные заряды, дырки, у другого трудятся свободные отрицательные заряды, электроны.

Привыканию к конкретным типам транзисторов наверняка будет способствовать знакомство с конкретными схемами, к которым уже можно было бы перейти. Однако сейчас мы ненадолго прерываем путешествие в транзисторную электронику, чтобы отдать дань уважения электронной лампе: изумительному прибору, с которого, по сути дела, началась электроника и который достойно и честно уступил транзистору огромные свои завоевания.

⁷ Деление на низкочастотные, среднечастотные и высокочастотные почти потеряло актуальность – практически все современные маломощные транзисторы относятся к высокочастотным, а мощные – как минимум к среднечастотным (единицы мегагерц).

⁸ См. также «Примечание редактора» в гл. 9; 15.

Примечание редактора. Электронные лампы, о которых идет речь в разделах 11–18 этой главы, в настоящее время вышли из употребления почти полностью. Некоторое количество ламп производится специально для поклонников ретроусилителей, которых привлекает особое «ламповое звучание» – следствие более высокой линейности характеристик лампы в сравнении с транзисторами. Одна фирма лет 10–15 назад даже выпустила компьютерную звуковую карту с окончательным усилителем на лампе. Но, кроме подобных применений, электронные лампы более нигде не используются. Пожалуй, дольше всего ламповая техника задержалась в виде дисплеев с электровакуумным кинескопом (и до сих пор еще у многих дома работают подобные старые модели телевизоров), но и они исчезли с прилавков примерно с конца 2000-х.

Тем не менее изучение принципов работы электронных ламп очень полезно для понимания работы современных транзисторных схем усиления сигналов. Лампы имеют простое и наглядное устройство, взаимодействие токов и напряжений в них гораздо легче разобрать «на пальцах», чем скрытые от глаза процессы в полупроводниках. При этом следует учесть важнейшее отличие ламп от биполярных транзисторов (см. также раздел 12 далее): транзистор управляется током, а лампа – напряжением. Последнее гораздо проще для понимания, так как именно напряжение сигнала обычно является входной величиной усилителя. А вот полевые транзисторы куда более похожи на электронную лампу, у них входная величина – тоже напряжение, хотя могут быть и отличия в полярности и диапазоне сигналов.

11. В электронной лампе усиливаемый сигнал управляет анодным током – потоком электронов в вакууме. Электронная лампа... Все события здесь разворачиваются в стеклянном или металлическом баллоне, из которого откачан воздух. Поэтому электронная лампа входит в огромный класс так называемых электровакуумных приборов, куда можно отнести и старинный телевизионный кинескоп, и целый ускоритель элементарных частиц – синхрофазотрон. Из обычной лампочки накаливания воздух откачали потому, что иначе металл раскаленной нити будет окисляться кислородом и нить мгновенно сгорит (она действительно сгорает, и действительно мгновенно, если в лампочку попадает воздух). А в электронной лампе вакуум нужен для того, чтобы в ней можно было беспрепятственно создать поток электронов, то есть создать электрический ток. И управлять величиной этого тока, формируя «мощную копию» усиливаемого электрического сигнала. Для формирования потока электронов и управления им в лампе имеются различные металлические детали с общим названием – электроды.

Электрод, с которого все начинается, – катод – поставляет свободные электроны для будущего электронного потока в баллоне. В первых моделях электронных ламп катод мало чем отличался от «волоска» лампы накаливания – это тонкая металлическая нить, которую нагревают, пропуская по ней ток (рис. 10.6; 1). Но в последующих моделях электронных ламп катод превратился в металлическую трубочку, внутрь которой опять-таки

вставлена нить-подогреватель (рис. 10.6; 2). Подогреватель называют еще нитью накала.

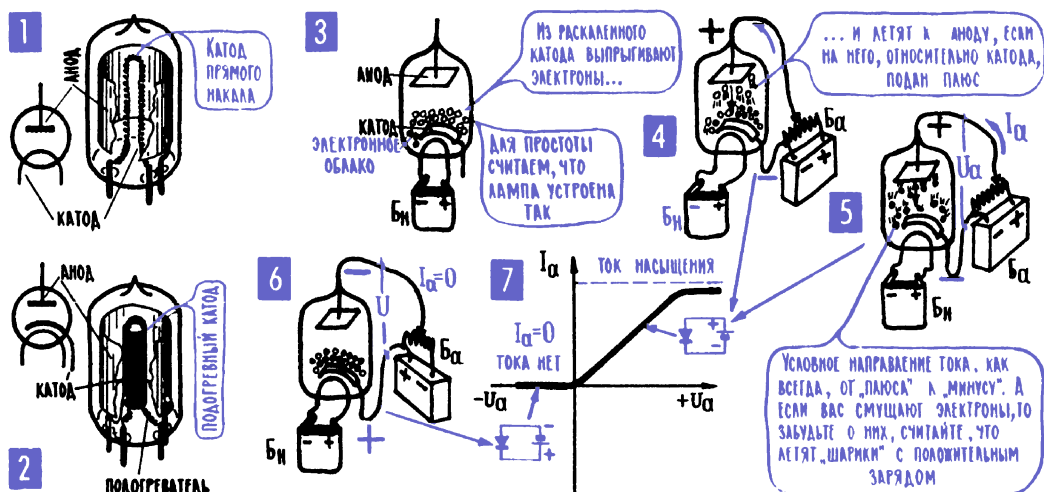


Рис. 10.6. Простейшая электронная лампа – электровакуумный диод

К этой миниатюрной электроплитке подводится небольшое напряжение; в самых распространенных типах ламп 6,3 В. Кстати, первая цифра в названии лампы примерно указывает необходимое ей напряжение накала.

Нить накала нагревает катод, и в нем, как во всяком нагретом металле, сильно активизируется хаотическое движение свободных электронов. Многие электроны до того разбегаются в металле, что по инерции выскакивают из катода, вылетают в свободное пространство. Это называется термоэлектронной эмиссией. Правда, далеко свободные электроны не улетают: у катода, который они покинули, появляется некоторый положительный заряд (суммарный заряд оставшихся в металле положительных ионов), и он не дает электронам далеко улететь, тянет их обратно к катоду. Поэтому вокруг раскаленного катода существует такое облачко из электронов, уже вылетевших, но еще не успевших упасть обратно на катод. Всю эту картину можно сравнить с фонтаном в парке: выброшенная вверх струя воды довольно быстро падает под действием своей тяжести, но над фонтаном все время стоит столб воды, уже поднявшейся и еще не успевшей упасть.

Разогрев катода – вспомогательная операция, и конструкторы ламп всеми силами старались уменьшить затраты энергии на нее. Для этого, например, катод активировали – покрывали его тончайшим одноатомным слоем вещества, которое подтягивает электроны к поверхности, помогает им покинуть катод. Благодаря этому активированные катоды работали

при температурах около 1000 °С вместо 2500 °С в чисто металлических катодах. Правда, активированный катод – сооружение довольно нежное, он, в частности, не терпит перегрева при превышении напряжения накала. Кроме того, со временем (для многих ламп через несколько тысяч часов непрерывной работы) активный слой перестает действовать, лампа, как принято говорить, теряет эмиссию. В принципе, возможны разные повреждения лампы – перегорает нить накала, накоротко замыкаются электроды внутри баллона, отгорают их выводы. Но чаще всего лампа выходит из строя постепенно, из-за потери эмиссии.

Второй электрод лампы – анод. Это обычно цилиндр или короб, в центре которого проходит катод: на упрощенных рисунках анод часто изображают в виде нависшей над катодом пластинки (рис. 10.6; 3), на схемах – в виде полоски, к которой в центре подключен электрод для вывода (рис. 10.6; 1, 2).

Давайте включим между катодом и анодом анодную батарею B_a , источник постоянного анодного напряжения. Можно подать на анод постоянное напряжение не только от батареи, но и от любого другого генератора, но, рассказывая о работе лампы, будем для простоты считать, что все постоянные напряжения, в том числе и анодное, подводятся к ней от химических источников тока. Для начала включим батарею так, чтобы «плюс» анодного напряжения был подан на анод, а «минус» – на катод. В этом случае начнется движение электронов в вакууме, в баллоне лампы от катода к аноду, и их возвращение на катод по внешней цепи, через батарею B_a (рис. 10.6; 4, 5).

Если увеличивать положительное напряжение на аноде, то растет и анодный ток, но, разумеется, до определенного предела. После того как полностью рассосется облачко вокруг катода и все вылетевшие из него электроны включатся в анодный ток, ток этот уже не сможет увеличиваться – наступит так называемое насыщение (рис. 10.6; 7).

Если повернуть батарею и подать на анод «минус», то никакого тока в лампе не будет (рис. 10.6; 6). Как видите, двухэлектродная лампа – электровакуумный диод – обладает односторонней проводимостью, как и полупроводниковый диод. Больше того, в вакуумном диоде нет никаких собственных свободных носителей зарядов (гл. 9; 5, 6), и обратного тока в лампе нет вообще.

Следующий шаг – введем в лампу еще один, третий электрод, так называемую управляющую сетку, и поставим ее на пути анодного тока. Название «сетка» идет с далеких времен, когда сетка действительно была сеткой; в обычных лампах это спираль, окружающая катод на небольшом расстоянии от него (рис. 10.7; 1). Управляющая сетка превращает диод в трехэлектродную усилительную лампу – триод. Кстати, транзистор первоначально называли полупроводниковым триодом, у него тоже три электрода, три рабочие зоны – эмиттер, база, коллектор.

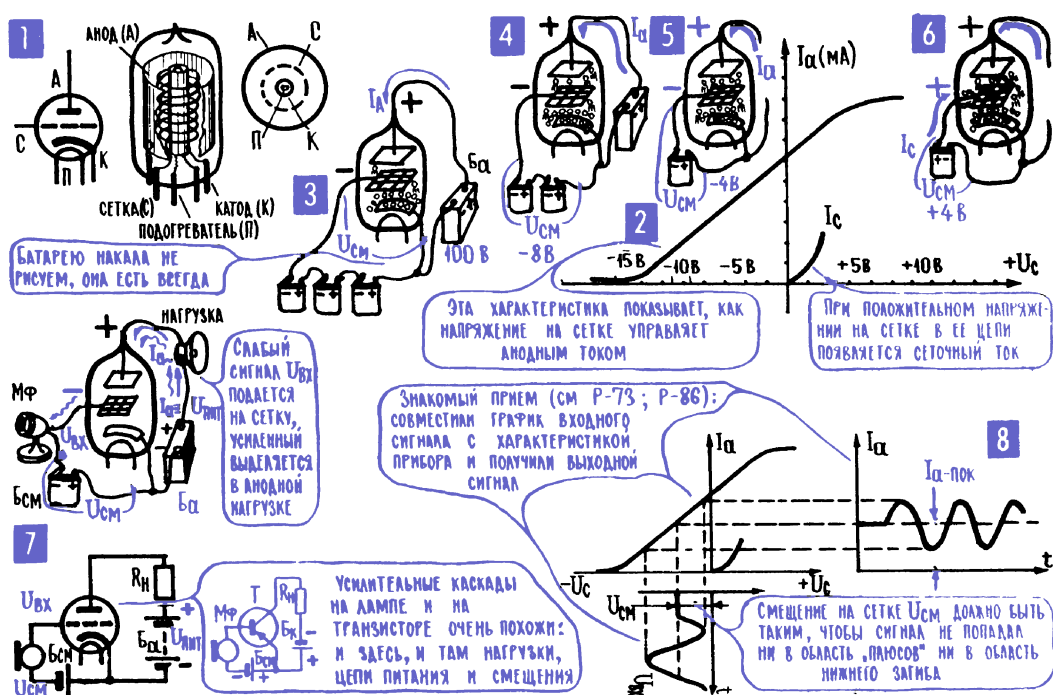


Рис. 10.7. Электровакуумный триод

Сетка расположена близко к катоду, и напряжение на ней очень сильно влияет на анодный ток – «плюс» на сетке подтягивает электроны, увеличивает число свободных электронов, вырвавшихся из облачка вблизи катода и отправившихся в далекое путешествие к аноду (рис. 10.7; 6). «Минус» на сетке, наоборот, отталкивает электроны к катоду, уменьшает анодный ток (рис. 10.7; 3, 4, 5). Одним словом, усиливаемый сигнал $U_{вх}$, действуя с командного пункта трехэлектродной лампы, с сетки, управляет анодным током I_a , а тот, проходя по нагрузке R_n , выделяет в ней мощную копию усиленного сигнала (рис. 10.7; 7). Можно рассказать об этом и другими словами: усиливаемый сигнал меняет число зарядов, которые реально могут двигаться к аноду, а значит, меняет внутреннее сопротивление лампы R_a (рис. 10.7; 8). Однако с какой стороны ни посмотришь на события в усилительной лампе, одно остается бесспорным – энергию на создание «мощной копии» дает анодная батарея.

12. На управляющую сетку обычно подается отрицательное смещение. О событиях в лампе лучше всего могут рассказать ее характеристики, в частности анодно-сеточная, она показывает, как анодный ток зависит от напряжения на сетке (рис. 10.7; 2). Обратите внимание: при положительных напряжениях на сетке, кроме анодного, появляется еще и сеточный ток I_c . Появляется он потому, что, несмотря на «прозрачность» сетки,

в нее все же попадает часть электронов. Сеточный ток – явление крайне неприятное: он отбирает электроны у анодного и тем самым искажает его, создает нелинейные искажения «мощной копии». Кроме того, сеточный ток требует дополнительной мощности от источника сигнала, нагружает его. Вот почему режим лампы обычно устанавливают так, чтобы она работала в левой части своих характеристик, то есть чтобы на сетке никогда не появлялся «плюс» и не было сеточного тока.

Этим, кстати, лампы принципиально отличаются от биполярных транзисторов, у которых без тока базы обойтись невозможно. Потому что в транзисторе материал для создания коллекторного тока – свободные заряды – дает ток в p - n -переходе эмиттер–база, и часть этого тока обязательно ответвляется в базовую цепь. В лампе же материал для создания анодного тока дает электронная эмиссия катода, и сетка может управлять анодным током не «плюсом», а «минусом», не притягивающим напряжением, а отталкивающим. Нужно один раз разобраться в этих «плюсах» и «минусах», чтобы в дальнейшем в них не путаться. Запомните: «минус» на сетке запирает лампу так же, как «минус» запирает транзистор структуры n - p - n . А вот в транзисторе p - n - p «минус», наоборот, увеличивает коллекторный ток. И дальше – в лампе на анод подается притягивающее напряжение «плюс» так же, как и на коллектор транзистора n - p - n , а в транзисторе p - n - p притягивающее напряжение на коллекторе – «минус». Все это отображено на рис. 9.8, 10.3 и 10.7.

Имея опыт с выбором рабочей точки транзистора (рис. 10.3), мы легко найдем, как избавить лампу от сеточных токов: для этого достаточно вместе с сигналом подать на сетку (относительно катода) некоторое отрицательное постоянное смещение, некоторый «минус» (рис. 10.7; 8).

13. Основные типы усилительных ламп: триод, пентод и лучевой тетрод. Триод был первой усилительной лампой, он был запатентован еще в 1906 году американцем Ли де Форестом. Но из-за двух серьезных недостатков его в дальнейшем сильно потеснили другие разновидности ламп. Первый недостаток триода связан с тем, что электроды лампы, по сути, представляют собой обкладки конденсаторов и в лампе существуют междуэлектродные емкости, никому не нужные, а поэтому названные паразитными емкостями (рис. 10.8; 1). Самая опасная из них – емкость между анодом и управляющей сеткой $C_{ас}$. Через нее усиленный сигнал попадает обратно во входную цепь (рис. 10.8; 2), а это может привести к серьезным неприятностям. Другой недостаток триода связан с самим принципом работы усилителя: когда напряжение на нагрузке растет, на аноде (как и на коллекторе транзистора) оно уменьшается (рис. 10.8; 4, и 10.4) и анод слабее тянет к себе электроны. Результат – ухудшаются усилительные способности лампы.

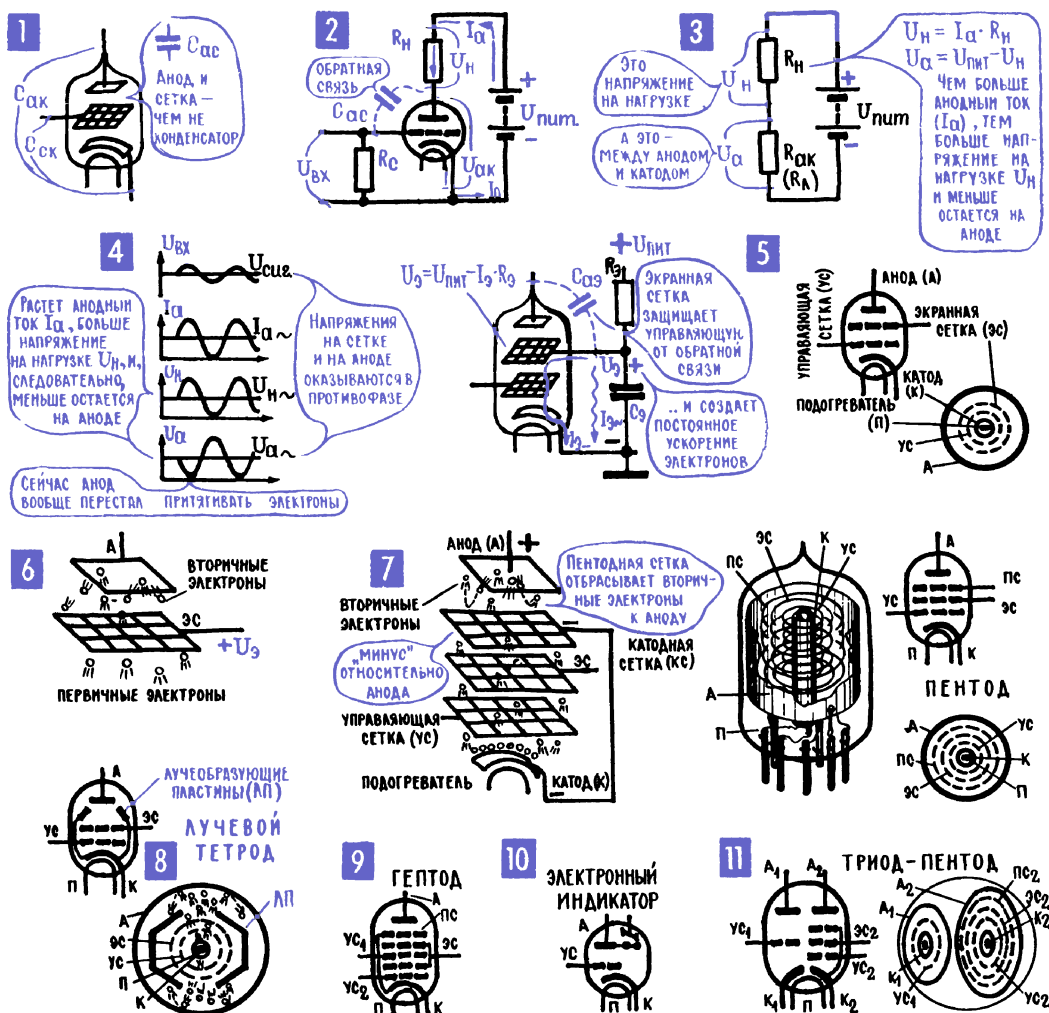


Рис. 10.8. Разновидности электронных ламп

Оба недостатка триода были ликвидированы одним ударом: между анодом и управляющей сеткой поместили еще один электрод — экранирующую (экранирующую) сетку, и таким образом получилась четырехэлектродная лампа, тетрод (рис. 10.8; 5). Экранирующую сетку через конденсатор C_s соединяют с катодом, и она отводит, замыкает накоротко переменные токи, которые могли бы попасть во входную цепь. Кроме того, на экранирующую сетку подают значительный «плюс» (U_s), иногда такой же, как и на анод, а иногда поменьше. Теперь как бы ни менялось напряжение на аноде, это почти не повлияет на анодный ток — экранирующая сетка будет тянуть электроны к аноду всегда с одинаковой силой.

К сожалению, и тетроду не пришлось стать идеальной усилительной лампой, у него самого обнаружился серьезный недостаток. В те моменты,

когда напряжение на аноде падает, «плюс» на экранной сетке начинает двигать электроны не только «туда», но и «обратно», уменьшая анодный ток. Дело в том, что электронный поток, бомбардируя анод, выбивает из него так называемые вторичные электроны. Только что выскочив на белый свет, они сразу попадают под влияние огромного притягивающего «плюса» на экранной сетке и, естественно, начинают двигаться к ней. В лампе появляется ток обратного направления – от анода к экранной сетке, что равносильно уменьшению анодного тока. Это динатронный эффект – явление крайне неприятное. Во-первых, оно создает нелинейные искажения – когда анодный ток должен расти, он уменьшается. Во-вторых, из-за динатронного эффекта перегревается сама экранная сетка, ухудшается вакуум в баллоне, а за этим следует уже целая цепочка самых разнообразных неприятностей.

С динатронным эффектом тоже научились бороться, причем двумя разными путями. Они и привели к созданию двух основных типов ламп: пентодов и лучевых тетродов. В пентоде между экранной сеткой и анодом расположена очень редкая пентодная, или, иначе, антидинатронная, сетка, которая соединена с катодом, чаще всего внутри лампы (рис. 10.8; 7). Первичные электроны, те, что летят от катода к аноду, через редкую пентодную сетку по инерции проскакивают беспрепятственно. В то же время пентодная сетка легко отталкивает обратно к аноду вторичные электроны, которые еще не успели набрать скорость. Потому, что на этой сетке «минус» относительно анода – она-то ведь соединена с катодом, а на катоде относительно анода всегда «минус», поскольку на аноде всегда «плюс» относительно катода.

Лучевой тетрод (рис. 10.8; 8) сконструирован так, что электроны идут к аноду острыми лучами. Благодаря высокой концентрации электронов эти лучи ведут себя как проводники, протянутые от катода, и, подобно пентодной сетке, они своим «минусом» отталкивают вторичные электроны обратно на анод. Диод, триод, пентод, лучевой тетрод – основные типы электронных ламп, но ими ассортимент ламп далеко не исчерпан. Есть, например, лампа гептод, в ней две управляющие сетки, с которых анодным током управляют одновременно два сигнала⁹ (рис. 10.8; 9). Или лампа – оптический индикатор настройки, в ней есть уже некоторые элементы телевизионной трубки, то есть светящийся экран и перемещение электронного потока в пространстве (рис. 10.8; 10). Наконец, выпускались комбинированные лампы, то есть две-три лампы, размещенные в одном баллоне – два триода, триод и пентод, триод и гептод, два диода и триод (рис. 10.8; 11).

⁹ По аналогии с двухсеточной лампой существуют двухзатворные полевые транзисторы, которые применяются в тех же целях: в смесителях и модуляторах различных частот.

14. В усилительный каскад входят транзистор (лампа), нагрузка, элементы питания, цепи ввода и вывода сигнала. По мере того как мы знакомимся с использованием транзисторов и электронных ламп, они обрастают разными дополнениями – сначала появилась нагрузка, затем цепи постоянного смещения на базу в транзисторе и на управляющую сетку в лампе, элементы разделения постоянного и переменного напряжений на входе и выходе усилителя. Сейчас настал момент нарисовать схему всего усилительного блока, со всеми основными и вспомогательными элементами, схему так называемого усилительного каскада.

15. Электронные схемы получаются такими, что многие элементы присоединяются к общему проводу. Но сначала несколько слов об одном графическом приеме: на схеме упрощенно показывают присоединение многих элементов к одному и тому же проводу, используя условное обозначение «соединение с металлическим корпусом, с шасси» (рис. 10.9; 1, 2). Когда-то электронные схемы, особенно ламповые, действительно собирали на металлическом шасси, и оно служило общим проводом для соединения многих элементов. И хотя теперь металлическое шасси встретишь редко, знак этот все же остался, и понимать его нужно так: «соединение с общим проводом». Такой знак очень удобен, он позволяет упростить чертеж, избавиться от многих длинных соединительных линий.

Вместо «соединить с шасси»¹⁰ («с общим проводом») довольно часто говорят «заземлить». Это выражение тоже пришло из прошлого, когда металлические шасси приемников и некоторых других приборов соединяли с электротехнической землей – заземляли. И при этом оказывались заземленными все цепи, которые «сидели» на шасси. Слово «заземлить» в смысле «соединить с общим проводом» очень удобно, и в этом легко убедиться при разборе первых же схем усилительных каскадов, когда короткое слово «заземлено» заменяет длинную фразу.

Примечание редактора. Необходимо четко понимать, что слова «заземление» и «земля» в электронике чаще всего не более чем метафора и означают именно «соединение с общим проводом данной схемы». Потому что в электротехнике существует совершенно определенное понятие земли и, соответственно, заземления – оно означает подключение к общему для всех электростанций мира нулевому потенциалу, за который принимается потенциал массы земного шара. В быту эта земля доступна в третьем проводе сетевых розеток (расположенном по их боковым сторонам), и заземление означает подключение именно к этому заземляющему проводнику (он обозначается изоляцией желтого цвета с зеленой полосой). Общий провод схемы может с этим проводом соединяться, а может и быть изолирован от него. Это далеко не безразличная операция, и непонимание природы истинного заземления может привести к серьезным неприятностям вплоть до угрозы

¹⁰ В настоящее время вместо «соединение с шасси» употребляют термин «соединение с корпусом», что обычно равносильно «соединению с общим проводом» (см. «Примечание редактора» далее).

жизни или, как минимум, работоспособности прибора. Дело еще усугубляется тем, что не во всех домах имеется истинное заземление, и третий провод в розетках (если он вообще подключен) в этом случае лишь объединяет заземления отдельных приборов между собой, не обеспечивая истинного подключения к нулевому потенциалу. По этой причине к терминам «земля» и «заземление» в электронике нужно относиться со всей критичностью и всегда их переводить в уме на «подключение к общему проводу схемы», если только речь не идет о подключении к настоящей электротехнической земле (для нее даже предусмотрен особый значок \perp , отличный от «общего провода» \perp).

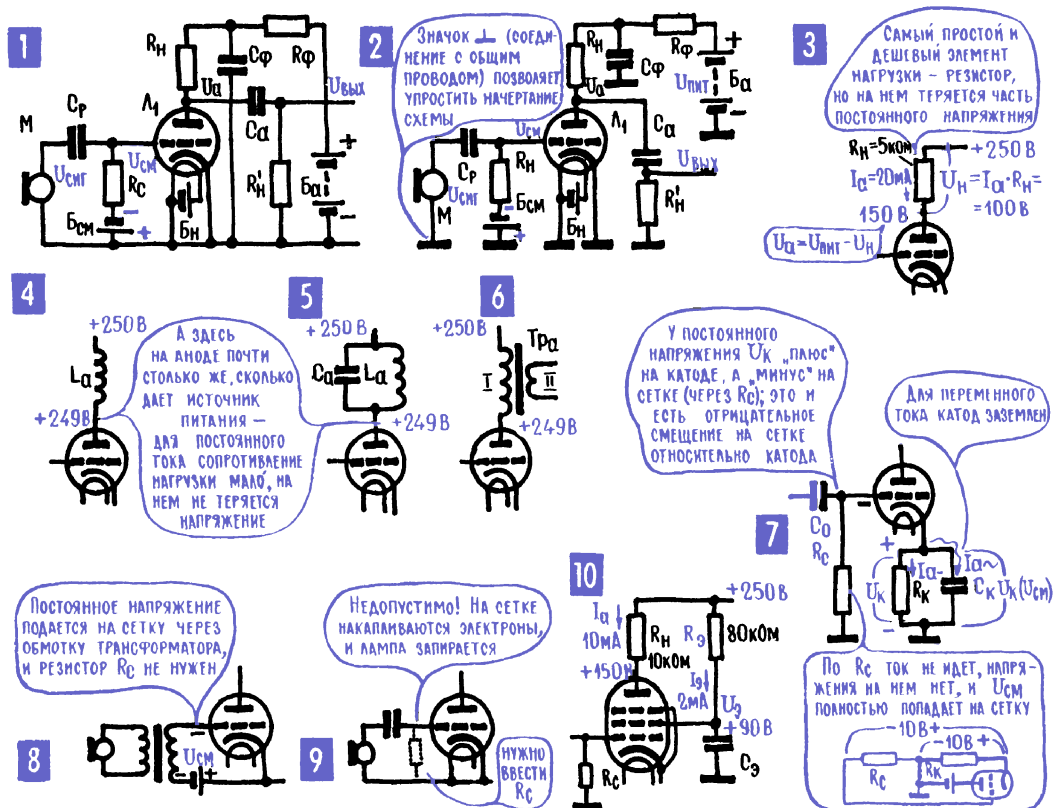


Рис. 10.9. Усилительные каскады на электронных лампах

16. Типичный усилительный каскад на триоде. На рис. 10.9; 1, 2 показана схема типичного усилительного каскада на трехэлектродной лампе. Катод лампы заземлен, то есть подключен к общему проводу, и, значит, любая заземленная точка схемы соединена с катодом через этот общий провод. Так, например, через землю, через общий провод, подключен к катоду «минус» анодной батареи и «плюс» батареи смещения. При этом на сетку относительно земли, то есть относительно катода, подается «минус», а на анод — «плюс». Чтобы переменная составляющая анодного тока не попада-

ла в анодную батарею B_a , что может привести к серьезным неприятностям, эту составляющую сразу же после нагрузки через конденсатор C_ϕ замыкают на землю, а значит, и на катод. Через землю подключен к катоду и второй провод источника сигнала – первый подсоединен прямо к сетке через C_p . Этот конденсатор нужен для того, чтобы, с одной стороны, постоянное напряжение U_{cm} не попадало к источнику сигнала, а с другой – чтобы сам этот источник не соединял сетку по постоянному току с землей.

Если бы в анодную цепь усилительного каскада был включен громкоговоритель и «мощная копия» окончательно использовалась в самом этом каскаде, превращаясь в звук, то цепочки $R'_n C_a$ вообще не было бы. Она появляется, когда усиленный электрический сигнал передают дальше, чтобы использовать его где-то в другом месте. Резистор R'_n как раз и отображает это самое «где-то». К нему через C_a подводится переменное напряжение с анода лампы, по R'_n идет часть переменной составляющей анодного тока, и именно в R'_n выделяется истинная продукция усилительного каскада.

Можно считать, что для лампы нагрузкой служат оба резистора – R_n и R'_n , и от их соотношения зависит, какая часть «мощной копии» останется в данном каскаде, а какая будет передана дальше.

На рис. 10.9; 4, 5 показано, что роль анодной нагрузки могут выполнять катушки индуктивности L_a и колебательный контур $L_a C_a$. Важное достоинство этих схем: на нагрузке не теряется постоянное напряжение, как на резисторе (рис. 10.9; 3), и в то же время катушка и контур могут представлять достаточно большое сопротивление для переменной составляющей анодного тока. То же достоинство имеет включение нагрузки в анодную цепь через трансформатор (рис. 10.9; 6).

17. В самых разных схемах встречаются одинаковые схемотехнические решения. Чтобы без страха и трепета разбираться в бесконечном многообразии электронных схем, нужно прежде всего знать некоторые типичные приемы схемотехники, типичные приемы обработки электрических сигналов. Такие, например, как ослабление токов и напряжений с помощью шунтов, гасящих сопротивлений и делителей напряжения. Или разделение постоянных и переменных составляющих сложного тока с помощью фильтров. Или еще такой схемный фокус, как создание разного рода вспомогательных напряжений на резисторах, включенных в цепь постоянного тока.

Примеры двух последних операций можно увидеть на рис. 10.9; 7. Здесь в катодную цепь лампы включен резистор R_k , зашунтированный конденсатором C_k . Емкость этого конденсатора выбирается с таким расчетом, чтобы для переменной составляющей анодного тока его емкостное сопротивление x_c (гл. 6; 14) было во много раз меньше, чем R_k . В этом случае для переменной составляющей анодного тока I_{a-} катод просто заземлен. А вот постоянная составляющая I_{a+} через конденсатор, естественно, не

пойдет, у нее есть только один путь – через R_k . И, проходя по этому резистору, постоянная составляющая анодного тока создаст на нем постоянное напряжение, «плюс» которого – вверху, на катоде, а «минус» – внизу, на земле.

Напряжение U_{cm} – не что иное, как вспомогательное отрицательное смещение на сетку: «минус» этого напряжения (относительно катода) через R_c подается на сетку и смещает влево рабочую точку на характеристике лампы, избавляет каскад от сеточных токов (рис. 10.7). Удачная полярность напряжения U_{cm} получается потому, что анодный ток I_a течет от «плюса» к «минусу», от анода к катоду.

Мы в свое время (гл. 4; 12) договорились во всех случаях пользоваться одним условным направлением тока, при этом проще водить пальцем по схеме, определять, куда идет тот или иной ток, в какой полярности действует то или иное напряжение. Причем результат не изменится от того, будем ли мы пользоваться условным направлением тока или следить, в какую сторону движутся электроны. Электроны в лампе, конечно, идут от «минуса» к «плюсу», от катода к аноду. И поэтому электронный поток проходит по резистору R_k снизу вверх. А это может означать только одно: на этом резисторе внизу – «минус», вверху – «плюс». Как видите, рассматривая условное направление тока и истинное направление движения электронов, мы получили один и тот же результат – на катоде «плюс», на сетке – «минус». Это еще одно подтверждение: рассматривая электронные схемы, можно, как это и принято, без всяких сомнений пользоваться условным направлением тока. И давайте к этому вопросу, который мы в свое время разобрали подробно (рис. 4.13), больше не возвращаться.

Резистор R_c , через который на сетку подается смещение, не нужен, если источник сигнала пропускает постоянный ток, как, например, обмотка микрофонного трансформатора. Но ни в коем случае нельзя допустить, чтобы сетка не соединялась с катодом по постоянному току. Потому что даже единичные электроны, попавшие на сетку, в этом случае будут накапливаться (им просто некуда уйти) и постепенно создадут на сетке такой большой «минус», что лампа сама по себе полностью запрется, анодный ток прекратится (рис. 10.9; 9). Резистор R_c называют резистором утечки: попавшие на сетку электроны стекают с нее через R_c .

Пример понижения питающих напряжений мы видим на рис. 10.8; 3 и 10.9; 10. Здесь на гасящем резисторе R_g ток экранирующей сетки I_g создает некоторое падение напряжения. Сопротивление R_g с учетом величины I_g подобрано с таким расчетом, чтобы на экранирующую сетку попадал меньший «плюс», чем на анод. Конденсатор C_g заземляет экранную сетку для переменного тока. Кстати, если этот конденсатор пробьется, то экранная сетка «сядет на землю», по R_g пойдет большой ток, и резистор, скорее всего, сгорит.

А после этого экранная сетка окажется «висящей в воздухе» (10.9; 9), и из-за этого лампа закроется.

18. На резисторе не может теряться напряжение, если по нему не идет ток. Схема на рис. 10.9; 7 дает повод подумать об одной типичной ошибке при оценке напряжений в той или иной точке сложной электрической цепи. Сопротивление резистора R_k обычно 0,1–1 кОм, сопротивление R_c чаще всего 0,1–1 МОм, то есть в тысячу раз больше, чем R_k . И вот эта огромная разница, бывает, наводит на сомнения: а не потеряется ли на R_c напряжение смещения $U_{см}$ по пути от катода к сетке? Ответ очень определенный: не потеряется. Напряжение, теряемое на том или ином резисторе, определяется током, который по нему идет, а по R_c практически ток не идет (точнее, идет чрезвычайно малый ток, доли микроампера – его создают случайные электроны, попадающие на сетку, несмотря на «минус» на ней). Во всяком случае, большой анодный ток I_a замыкается только по R_k и в R_c не попадает. Вывод: напряжение на самом R_c практически равно нулю, и $U_{см}$ полностью достается участку сетка–катод.

Отсюда можно вывести, может быть, не очень строго сформулированное, но практически полезное правило: оценивать напряжение в какой-нибудь точке схемы можно только относительно другой точки; при этом нужно внимательно следить за тем, какие элементы включены между этими точками и какие токи идут по каждому из них.

19. Транзисторные схемы находят все более широкое применение. То, что в самых разных электронных схемах встречаются одни и те же схемотехнические решения, подтверждает еще и рис. 10.10, на котором показаны некоторые фрагменты транзисторных усилительных каскадов. Этот рисунок возвращает нас из области ламповых усилителей к транзисторным, с которыми мы уже не расстанемся. Такая «транзисторизация» связана с важными достоинствами транзисторов. С их долговечностью, малыми габаритами, экономичностью: для создания одной и той же «мощной копии» транзисторный усилитель потребляет от источников питания в несколько раз меньше энергии, чем ламповый. Это особо важно для переносной аппаратуры – здесь экономное расходование электроэнергии позволяет резко уменьшить вес батарей. Кроме того, транзистор привлекает своей неприхотливостью в части питания – на анод лампы нужно подать десятки, а то и сотни вольт; на коллектор транзистора – всего несколько вольт; для питания лампы нужно иметь два напряжения – накальное и анодное, транзистор обходится одним источником питания. Когда в начале 1950-х появились первые транзисторы, мало кто думал, что они так хорошо смогут заменить лампы: у транзисторов в то время было очень много недостатков. Сначала они работали только на низких частотах; их параметры даже

в пределах одного типа сильно различались; не удавалось создать мощные транзисторы. Позднее все эти недостатки были преодолены.

Примечание редактора. В дальнейшем процесс повторился при переходе от транзисторов к интегральным схемам: если питание типичной ламповой схемы составляет 80–150 В (плюс обязательный мощный источник накала катода), то транзисторной – уже 9–12 В. А питание интегральной схемы может не превышать 3–5 В и даже менее, при одновременном снижении тока потребления в десятки и сотни раз. Кроме того, транзисторы и интегральные схемы имеют несравнимо меньшие габариты, и еще в транзисторной электронике пришлось отказываться от многих типовых решений, присущих ламповой электронике: таких как применение трансформаторов и дросселей (см. «Примечание редактора» в гл. 6; 24). Поэтому многие указанные далее схмотехнические решения, связанные с применением намоточных изделий (особенно такие, как на рис. 10.10; 5), уже давно не применяются на практике.

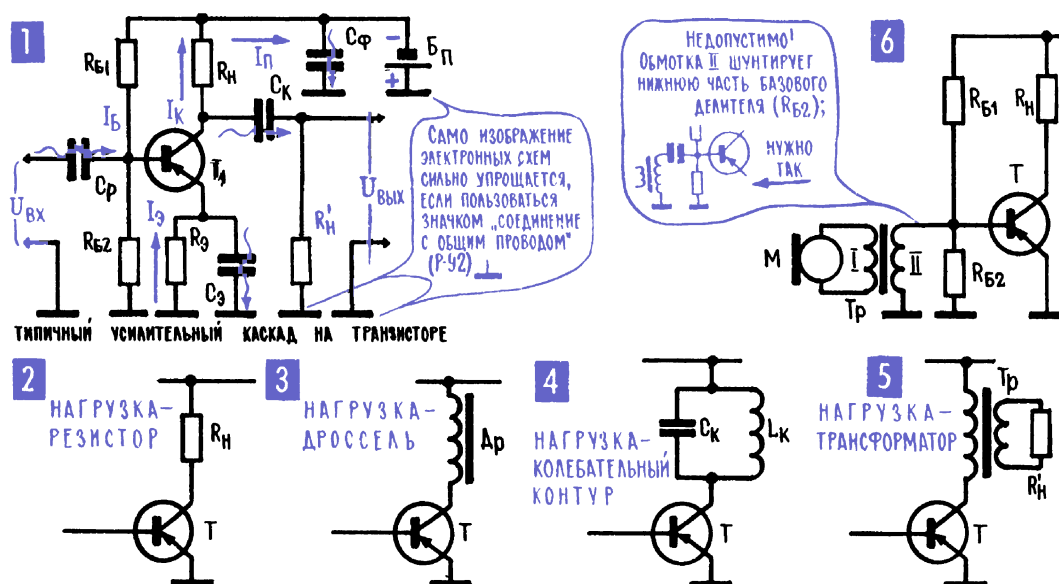


Рис. 10.10. Усилительный каскад на транзисторе

20. Типичный усилительный каскад на транзисторе. В первой из схем на рис. 10.10; 1 нам встречаются «знакомые все лица» – нагрузка R_H , делитель R_{B1} / R_{B2} , с которого подается смещение на базу (рис. 10.3), переходной конденсатор C_k , через который ответвляется на резистор R'_H часть переменной составляющей коллекторного тока. И чем меньше сопротивление R'_H , тем большая часть идет через него и меньший ток замыкается через нагрузку R_H . Кстати, цепочка $C_k R'_H$ представляет собой делитель напряжения.

И если емкость конденсатора C_k достаточно велика, если его емкостное сопротивление мало по сравнению с R'_n , то почти все переменное напряжение, которое действует на коллекторе, действует и на резисторе R'_n .

В транзисторных усилительных каскадах так же, как и в ламповых, в качестве нагрузки могут использоваться катушка (дроссель), колебательный контур, и, кроме того, нагрузка может включаться в коллекторную цепь через трансформатор (рис. 10.10; 3, 4, 5). А вот соединение базы с эмиттером через небольшое сопротивление источника сигнала, скажем через микрофонный трансформатор (рис. 10.10; 6), в транзисторном усилителе по схеме рис. 10.10; 1 уже невозможно, потому что это небольшое сопротивление войдет в делитель R_{61} / R_{62} и резко уменьшит сопротивление его нижнего участка, постоянное смещение на базе практически исчезнет, транзистор окажется запертым. Источник сигнала с малым собственным сопротивлением приходится подключать к базе через разделяющий конденсатор C_p : он легко пропускает переменное напряжение (усиливаемый сигнал) и не позволяет источнику сигнала шунтировать нижнюю часть делителя по постоянному току.

21. Автоматическая регулировка коллекторного тока стабилизирует режим транзистора. Особое место в схеме занимает резистор R_z , он нужен для стабилизации режима транзистора.

Примечание редактора. Автоматическая стабилизация режима в транзисторных усилителях необходима потому, что в простейших схемах (рис. 10.3; 4, 5) рабочая точка крайне нестабильна (см. также «Примечание редактора» в разделе 4 этой главы). Она сильно зависит от конкретного значения коэффициента усиления β (h_{21}) в данной точке, который, в свою очередь, зависит от напряжения смещения эмиттерного перехода U_{63} и от тока коллектора I_k . И напряжение U_{63} , и ток I_k меняются с изменением сигнала, то есть в указанных простейших схемах будут возникать серьезные нелинейные искажения усиленного сигнала. Но еще важнее то, что и напряжение смещения U_{63} , и ток I_k очень сильно зависят от температуры. Расчеты по т. н. модели Эберса–Молла [1] показывают, что при установленном смещении U_k ровно в половину напряжения питания U_n изменение температуры всего на 8° в ту или другую сторону приведет транзистор в состояние насыщения ($U_k \approx 0$) либо отсечки ($U_k \approx U_n$).

В самой простой из схем стабилизации (рис. 10.11; 1) смещение на базу подается не с плюса питания коллекторной цепи (рис. 10.3), а с самого коллектора. При этом если при нагревании прибора возрастает коллекторный ток, то понижается напряжение на коллекторе и автоматически становится меньше напряжение на базе. А это приводит к уменьшению коллекторного тока. Таким образом, изменение температуры в меньшей степени влияет на коллекторный ток.

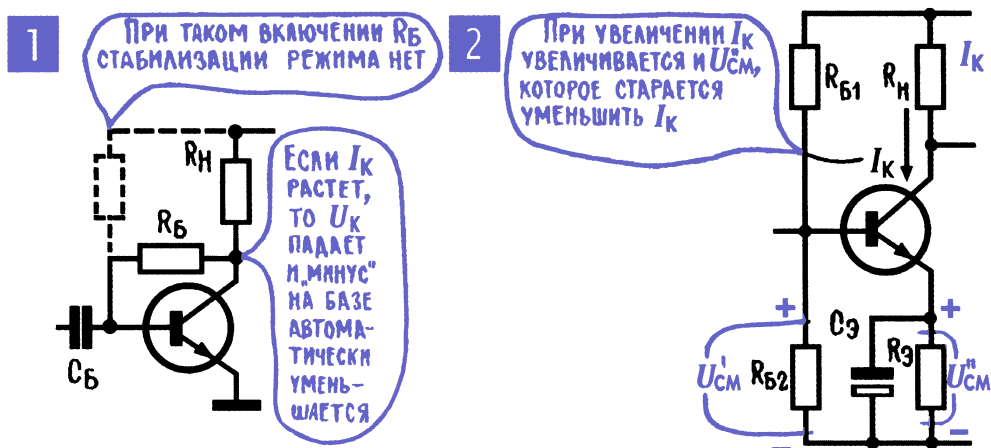


Рис. 10.11. Стабилизация в транзисторных усилительных каскадах

Такая же малая автоматика работает в схеме рис. 10.11; 2, которая встречается очень часто. Здесь смещение на базе (не забывайте, что это напряжение на эмиттерном переходе, то есть между эмиттером и базой) равно разности двух напряжений – $U'_{см}$, которое снимается с делителя R_{61} / R_{62} и $U''_{см}$, которое появляется на R_3 благодаря тому, что по этому резистору проходит эмиттерный ток. При нагревании транзистора, как обычно, увеличивается коллекторный ток. Но так как ток эмиттера (текущий через R_3) почти повторяет ток коллектора, то тут же увеличивается напряжение $U''_{см}$ на резисторе R_3 , и общее напряжение на базе уменьшается, следовательно, ток коллектора падает. Резистор R_3 шунтирован конденсатором C_3 , для того чтобы переменная составляющая коллекторного тока – то есть усиленный полезный сигнал – замыкалась кратчайшим путем, минуя совершенно излишнее для нее сопротивление R_3 .

Примечание редактора. Схема, приведенная на рис. 10.11; 1, несовершенна (потому что ее входное сопротивление мало и «посадит» маломощный источник сигнала) и употребляется редко. Вторая схема (рис. 10.11; 2), как и говорит автор, употребляется гораздо чаще. Она устроена так, что коэффициент усиления входного постоянного напряжения ($U'_{см}$) практически не зависит от данных конкретного транзистора при условии достаточно большого справочного значения коэффициента усиления по току β (не менее 50–100, что характерно для всех современных маломощных транзисторов). Усиление это примерно равно отношению сопротивления резисторов в коллекторе и эмиттере $R_H : R_3$, которое обычно выбирается около 10. Соответственно, положение рабочей точки ($U_K \approx$ половине напряжения питания) задается с помощью делителя R_{61} / R_{62} и резистора в коллекторе R_H из условия, что изменения напряжения на открытом эмиттерном переходе (0,6–0,7 В) малы, и $U'_{см}$ с допустимой погрешностью можно принять равным $U''_{см} + 0,6$ В. Усиление переменного сигнала, то есть входного переменного напряжения, при надлежащем выборе шунтирующего конденсатора в цепи эмиттера C_3 ($\chi_c \ll R_3$) может составить

несколько десятков или сотен раз (зависит от транзистора). Пример такого расчета: $R_{61} = 110 \text{ кОм}$; $R_{62} = 10 \text{ кОм}$; $R_3 = 1,0 \text{ кОм}$; $R_4 = 10 \text{ кОм}$; $C_3 = 10 \text{ мкФ}$. Легко проверить, что при таких параметрах рабочая точка транзистора (напряжение на коллекторе в состоянии покоя) не зависит от напряжения питания, если оно выше примерно 6–7 В, и всегда будет лежать примерно на половине напряжения питания (как на рис. 10.5).

22. Некоторые предварительные соображения о режиме транзисторного усилителя. Усиление, которое может дать усилитель, мощность «мощной копии» и потребляемая усилителем мощность – словом, все его возможности и потребности – во многом зависят от режима: от токов, которые протекают в каскаде, от напряжений, которые подводят к усилителю или от него получают.

Выбор режима усилителя – дело тонкое и сложное. Оно чем-то напоминает шахматную партию, где каждый ход имеет свои достоинства и недостатки, где зачастую приходится жертвовать чем-то одним ради чего-то другого.

Режим транзисторного усилительного каскада определяется элементами схемы – резисторами, конденсаторами, катушками, источниками питания. В описаниях практических схем, рекомендованных для повторения, и, конечно же, в схемах промышленной аппаратуры все элементы подобраны так, что нужный режим транзистора должен получиться сам собой. И все же в процессе налаживания схемы нет-нет да и приходится что-то менять в поисках наилучшего режима. Кроме того, для радиолюбителей готовая схема – это зачастую не более чем линия старта, за которую неотвратимо влечет желание искать, придумывать, улучшать.

Попробуем подвести предварительный итог того, что было рассказано об усилении и усилителях, изложим некоторые соображения о том, что, как и насколько влияет на режим транзистора.

Соображение № 1. Чем больше напряжение смещения на базе $U_{см}$, тем больше коллекторный ток, а значит, и мощность, потребляемая транзистором. Для экономного расходования коллекторной батареи смещение на базу следует делать поменьше (рис. 10.12; 1).

Соображение № 2. Слишком малое смещение может привести к искажениям: в какие-то моменты «минус» входного сигнала перекроет «плюс» смещения, транзистор окажется запертым, произойдет отсечка коллекторного тока (рис. 10.12; 2).

Соображение № 3. Смещение на базу устанавливают с учетом уровня входного сигнала ($U_{сиг.}$): чем меньше этот сигнал, тем меньше можно открывать транзистор, экономя при этом энергию батареи (рис. 10.12; 3).

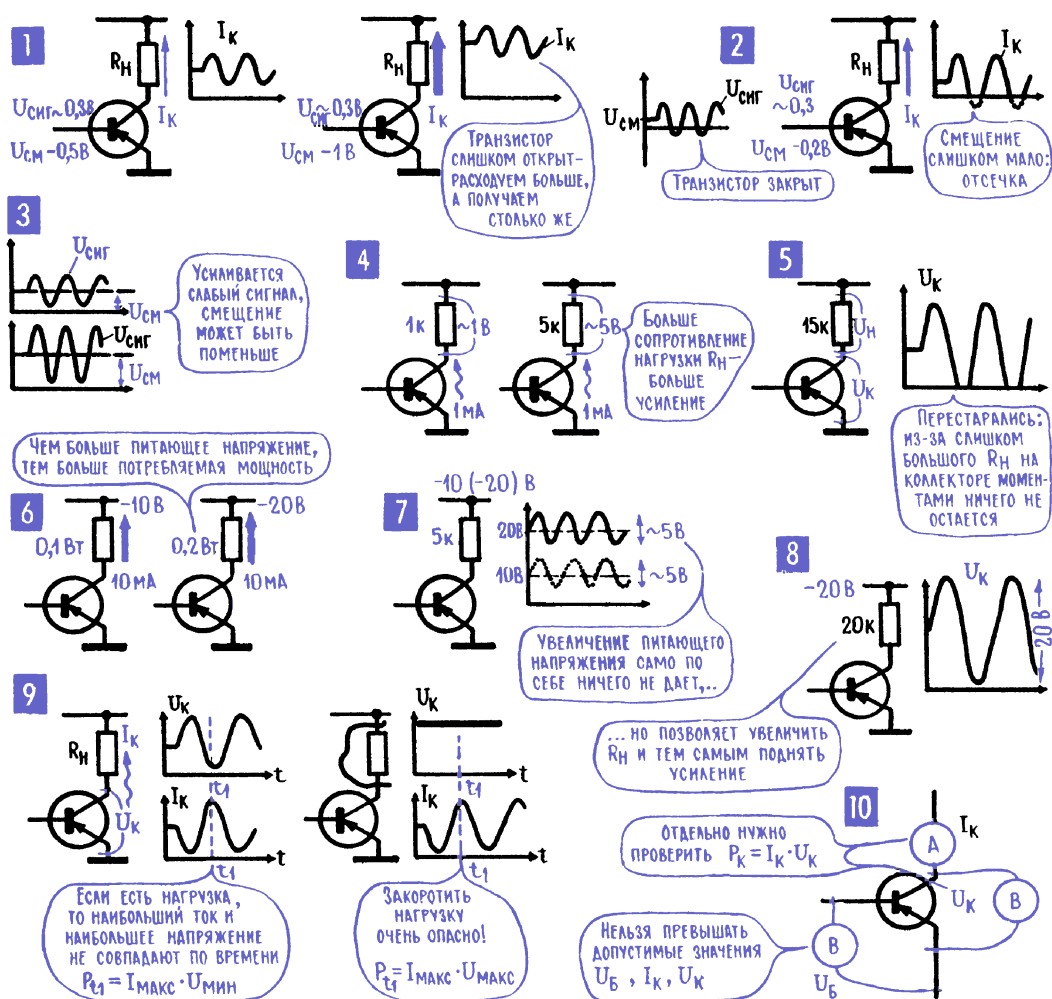


Рис. 10.12. Режимы транзистора в схеме усиления сигналов

Соображение № 4. С увеличением сопротивления нагрузки растет переменное напряжение на ней, а значит, и мощность усиленного сигнала на выходе усилителя (рис. 10.12; 4).

Соображение № 5. Но при слишком большом сопротивлении нагрузки напряжение на ней окажется настолько большим, что в какие-то моменты на коллекторе вообще ничего не останется (насыщение транзистора). И опять-таки возникнут искажения сигнала (рис. 10.12; 5).

Соображение № 6. Увеличивая напряжение питания, мы, по сути дела, увеличиваем мощность, потребляемую от батареи, а также мощность, которая расходуется на нагрев транзистора (рис. 10.12; 6).

Соображение № 7. Само по себе увеличение питающего напряжения ничего не дает: переменная составляющая коллекторного тока и переменное напряжение на нагрузке какими были, такими и останутся (рис. 10.12; 7).

Соображение № 8. Но в то же время если поднять напряжение питания, то появится возможность увеличить сопротивление нагрузки и получить большее напряжение на нагрузке, не опасаясь отсечки или насыщения¹¹ (рис. 10.12; 8; соображение № 5).

Соображение № 9. Уменьшение сопротивления нагрузки R_n и тем более ее короткое замыкание могут представлять большую опасность для транзистора, прежде всего для мощного. Вспомните: мощность, которая рассеивается на транзисторе и нагревает его, – это произведение коллекторного тока на коллекторное напряжение. При включенной нагрузке максимальному коллекторному току соответствует минимальное напряжение на коллекторе, и получаемая транзистором мощность сравнительно невелика. А вот если сопротивление нагрузки равно нулю, то напряжение на коллекторе всегда равно напряжению питания. И в момент максимального коллекторного тока в транзисторе может выделяться настолько большая мощность, что он ее просто не выдержит (рис. 10.12; 9).

Соображение № 10. Оно навеяно предыдущим, девятым, и сводится к простой истине: работая с транзистором, нужно помнить о его возможностях, о предельно допустимых токах и напряжениях. Вывести из строя транзистор можно многими разными способами – превысив любой из допустимых токов или любое из допустимых напряжений. Об этом можно сказать более оптимистично: транзистор исправно и надежно работает, если не требовать от него большего, чем он может, не превышать допустимых напряжений, токов, мощностей. У нас еще будет возможность более серьезно задуматься о работе транзисторов в усилительных каскадах, встречаясь с ними в конкретных электронных устройствах.

А пока сделаем небольшой перерыв и от усилителей перейдем к другому огромному классу электронных устройств – генераторам.

¹¹ В реальности для схем с заземленным эмиттером (рис. 10.3 и 10.12) рабочая точка выбирается на середине напряжения питания ($U_k = U_{пит}/2$); можно показать, что при этом усиление по напряжению практически не зависит от параметров транзистора и выбранного коллекторного тока покоя и определяется формулой $\approx 20 \cdot U_{пит}$.

Практикум. Исследование усилительных свойств транзистора

Для экспериментов понадобится:

- маломощный транзистор типа *n-p-n* (например, BC337 или аналогичный);
- набор резисторов 0,25 Вт от 100 Ом до 100 кОм;
- конденсаторы 47 мкФ (электролитический танталовый); 3,3 мкФ (неполярные керамические, 2 шт.);
- светодиод любого цвета;
- переключатель или тумблер;
- источник питания стабилизированный 12 В.

Разводка выводов эмиттера, базы и коллектора для обычных маломощных транзисторов в пластиковом корпусе с гибкими выводами (в том числе и упомянутого BC337) показана на рис. 10.13; 1. Однако стандартов на этот счет не существует, потому будьте осторожны: если у вас незнакомый тип транзистора, то обязательно проверьте его разводку выводов по фирменному описанию.

Эксперимент 1. Ключевой режим работы транзистора

Для начала соберем простую ключевую схему (рис. 10.13; 2). Она аналогична простейшей схеме с заземленным эмиттером (см., например, рис. 10.12), за исключением того, что здесь установлен базовый резистор R_b , который ограничивает ток через переход база–эмиттер. Этот переход представляет собой фактически обычный диод, и напряжение на нем не может превышать 0,6–0,7 В (см. «Примечание редактора» к разделу 4 этой главы). Если принудительно подать более высокое напряжение, например замкнув базу накоротко на шину питания, переход просто сгорит, и транзистор выйдет из строя. Резистор R_b и призван ограничить ток базы до безопасных величин (не более, чем примерно 1 мА) при любом подключении.

При замыкании переключателя К1 с общим проводом (как показано на рис. 10.13; 2) через базовый резистор R_b ток не течет, транзистор заперт – через цепь коллектор–эмиттер ток не проходит, светодиод не горит. Если при этом измерить напряжение на коллекторе U_k , то оно окажется равным напряжению питания $U_{пит}$.

Переключим К1 в верхнее (по схеме) положение, замкнув тем самым базовый резистор на шину питания +12 В. Транзистор откроется, светодиод загорится. Если теперь померить напряжение на коллекторе U_k , то оно окажется почти равным нулю (точнее, около 0,3–0,4 В). Можно подсчитать ток, который при этом течет в цепи коллектора I_k : он будет равен напря-

жению питания $U_{\text{пит}}$ (12 В) минус напряжение на светодиоде (около 2 В) минус напряжение на коллекторе (0,3 В, можно пренебречь), деленным на сопротивление резистора R_k (1 кОм), то есть окажется равным примерно 10 мА. Обратим внимание на то, что базовый ток I_b будет при этом равен напряжению питания $U_{\text{пит}}$ (12 В) минус напряжение перехода база–эмиттер $U_{бэ}$ (0,7 В), деленным на сопротивление резистора R_b (10 кОм), то есть чуть более 1 мА.

Отношение тока коллектора I_k к току базы I_b будет равно примерно 10. Условие стабильной работы транзистора в таком ключевом режиме (то есть либо полностью открыт, либо полностью заперт) определяется тем условием, что вычисленное нами отношение I_k/I_b не должно превышать коэффициент усиления транзистора β ($h_{21э}$). Так как для современных маломощных транзисторов коэффициент усиления обычно не менее 100 (см. табл. 10.1), то соотношение I_k/I_b спокойно можно увеличить в несколько раз, даже не глядя на характеристики транзистора. Например, можно установить в коллектор более мощную нагрузку (обмотку электромагнитного реле или маломощную лампочку накаливания). Транзистор BC337 в открытом состоянии позволяет пропускать через себя ток до 0,8 А, но при токах в сотни миллиампер, конечно, придется увеличить и величину R_b , чтобы не нарушить указанное выше соотношение.

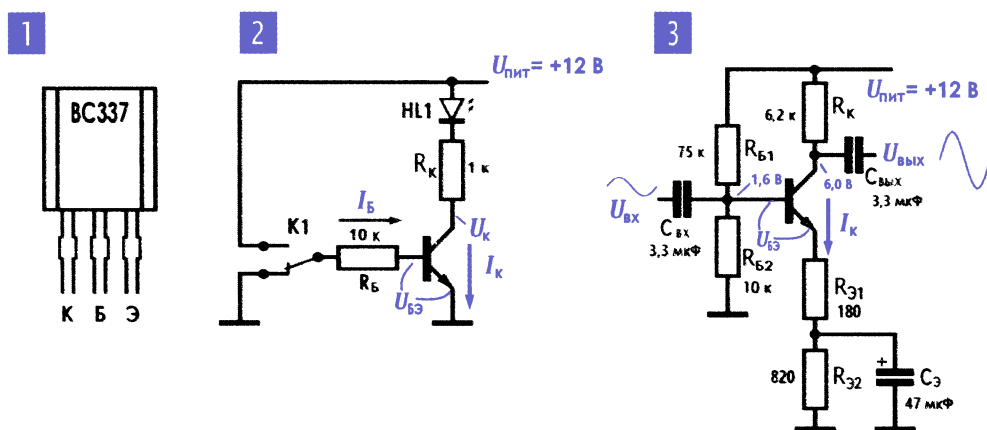


Рис. 10.13. Усилительные свойства транзистора

Будем считать, что с ключевым режимом транзистора мы разобрались. В современных схемах, сплошь основанных на цифровых принципах, режим «включено-выключено» встречается очень часто, потому умение правильно подключать транзистор в ключевом режиме отнюдь не будет лишним. Но хочется все же разобраться в том, как правильно составить схему усилителя непрерывно меняющегося, аналогового сигнала. Интуитивно ясно, что между полностью открытым и полностью запертым состоя-

ниями транзистора существует какой-то промежуточный режим, когда напряжение на коллекторе плавно меняется в зависимости от входного сигнала. Как его обеспечить?

Эксперимент 2. Транзисторный усилитель синусоидального сигнала

Как рассказано в этой главе ранее, для обеспечения режима усиления надо обеспечить подачу нужного смещения на базу транзистора. Можно попробовать сделать так, как предлагается на рис. 10.12, например подключить базу через делитель напряжения и тонко регулировать напряжение на ней, пока не добьемся U_k , примерно равного половине напряжения питания. Но на самом деле так мы не получим ничего хорошего: установка другого экземпляра транзистора с другим коэффициентом усиления заставит нас все регулировать заново (коэффициент β от экземпляра к экземпляру может меняться в разы, см. табл. 10.1). И даже такая индивидуальная настройка не поможет: стоит измениться температуре, как установленное значение U_k опять «уплывет» (см. также «Примечание редактора» к разделу 4 этой главы).

Поэтому мы не будем рассматривать промежуточные попытки добиться уверенной работы от транзисторных усилительных схем, а сразу перейдем к практическому воплощению стабильной схемы усилительного каскада, показанной на рис. 10.11; 2, несколько усложнив ее в сравнении с оригиналом. Результирующая конструкция показана на рис. 10.13; 3. Достоинство этой схемы заключается в том, что ее характеристики не зависят от выбора транзистора, лишь бы его собственный коэффициент усиления не был меньше примерно 70–80 (а этому условию удовлетворяют все современные маломощные транзисторы). Не слишком чувствительна схема и к изменению напряжения питания, хотя для обеспечения максимальной амплитуды сигнала на выходе подстройка под выбранное напряжение все-таки необходима.

Расчет схемы (рис. 10.13; 3) начнем с того факта, что усилительный каскад на маломощном кремниевом биполярном транзисторе наилучшим образом работает, если коллекторный ток покоя равен 1 мА. Необязательно соблюдать эту величину совершенно точно, но и сильно отклоняться от нее в обычных случаях не рекомендуется. Коллекторный ток для схемы с резистором в эмиттерной цепи задается напряжением на базе, которое оказывается на величину $U_{\text{бэ}} = 0,6$ В больше, чем напряжение на эмиттерном резисторе. Этот резистор в данном случае складывается из двух резисторов $R_{\text{э1}} + R_{\text{э2}}$, то есть равен 1 кОм. Таким образом, чтобы ток был равен 1 мА, напряжение на эмиттере должно быть равно 1 В, а на базе, соответственно, 1,6 В. Обеспечивает такое напряжение при питании 12 В делитель $R_{\text{б1}}$ (75 кОм) и $R_{\text{б2}}$ (10 кОм). Надо учитывать, что такой расчет приближителен –

он не учитывает тот факт, что ток, протекающий в эмиттерной цепи (через резисторы $R_{э1} + R_{э2}$), отличается от коллекторного тока на величину тока базы. Однако из-за того, что ток в базовой цепи намного меньше тока коллектора (или эмиттера), этой ошибкой можно пренебречь.

Осталось только определить сопротивление коллекторного резистора R_k . Оно определяется из условия, что наибольший неискаженный сигнал на выходе мы получим, если установим на коллекторе транзистора напряжение U_k , равное половине питания, то есть около 6 В в данном случае. Из условия, что ток коллектора равен 1 мА, получаем $R_k = 6,2$ кОм.

Собрав схему, проверьте значения напряжений на базе и коллекторе транзистора – они не должны отличаться от указанных на схеме более, чем на 0,1–0,3 В. Если напряжение питания иное, то пересчитать нужно сначала делитель $R_{б1}$ и $R_{б2}$, чтобы обеспечить 1,6 В на базе, а затем изменить резистор R_k , чтобы по-прежнему получать на коллекторе середину питания.

Каковы характеристики этой схемы? При указанных на схеме величинах сопротивлений коэффициент усиления по постоянному току равен отношению $R_k/(R_{э1} + R_{э2})$, то есть около 6. Это легко проверить, если подать постоянный сигнал от лабораторного регулируемого источника питания или просто низкоомного делителя напряжения (например, с потенциометра сопротивлением менее 1 кОм) прямо на среднюю точку делителя (то есть на базу транзистора), минуя входной конденсатор $C_{вх}$. Например, если вы подадите напряжение, отличающееся от 1,6 В на 0,3 В в большую сторону (т. е. 1,9 В), то, так как транзисторный усилитель инвертирует сигнал, получите на коллекторе напряжение, отличающееся от середины питания (6 В) на 1,8 В в меньшую сторону (т. е. U_k будет равно 4,2 В). Проверяя этот параметр, вы легко обнаружите, что максимальная амплитуда на выходе при данном напряжении питания составит около 4,5 В относительно половины питания.

По переменному току за счет шунтирования резистора $R_{э2}$ конденсатором $C_э$ большой емкости коэффициент усиления будет значительно больше, и на частотах, на которых емкостное сопротивление x_C этого конденсатора (см. гл. 6; 14) становится много меньше $R_{э2}$, будет равно отношению $R_k/R_{э1}$, то есть теоретически около 34. На самом деле коэффициент усиления по переменному току будет несколько меньше из-за вклада собственного сопротивления эмиттера, то есть около 30–31. Можете проверить эту величину, подав на вход (на конденсатор $C_{вх}$) калиброванный сигнал с генератора частоты и измеряя амплитуду выходного на выходе конденсатора $C_{вых}$. Частота, с которой начинает выполняться соотношение $x_C \ll R_{э2}$ для указанной на схеме емкости конденсатора 47 мкФ будет примерно равна 100 Гц.



ГЛАВА 11

Преобразование в генератор

1. В электронной аппаратуре широко используются различные генераторы переменного напряжения. В точном переводе слово «генератор» означает «создающий», «рождающий», а электрическими генераторами называют самые разные преобразователи, которые вырабатывают электрическую энергию, – машинный генератор, химический источник тока, преобразователи тепловой и световой энергии в электрическую. Электрические генераторы очень широко используются в электронной аппаратуре как самостоятельные схемные узлы. Это генераторы, которые преобразуют электрическую энергию в электрическую энергию, но несколько иного вида: они потребляют постоянный ток, а создают переменный, меняющийся. Для краткости все поясняющие слова просто опускают, и когда говорят «электронный генератор» или просто «генератор», то имеют в виду схему, на выходе которой действует переменное напряжение определенной частоты и формы и которая при этом получает только питание.

Примечание редактора. В настоящее время термином «генератор» называют в основном именно устройства, *генерирующие* переменный ток. Под это определение попадают и машинные генераторы электрической энергии, и схемы с питанием от постоянного тока, на выходе которых возникает переменное (или пульсирующее) напряжение. В этой главе термин «генератор» употребляется именно в последнем смысле. Устройства, непосредственно предназначенные для питания электронных приборов (как правило, постоянным током), автор в предыдущих главах также называл генераторами, но чаще их называют источниками питания. Следует отметить, что устройства для прямого преобразования энергии в электрическую (ветрогенераторы, солнечные батареи, термические элементы), за исключением электрохимических элементов (батареек и аккумуляторов), редко применяются для питания электроники без промежуточных преобразователей. Подобные преобразователи, как и преобразователи переменного тока в постоянный, называются источниками вторичного электропитания, ИВЭП.

За примерами применения генераторов далеко ходить не нужно. В радиопередатчиках генераторы создают переменный ток, который в итоге излучает радиоволны. В электронном музыкальном инструменте генераторы

заставляют звучать громкоговоритель. В телевизоре с помощью меняющихся токов включают и выключают мельчайшие элементы экрана – пиксели, заставляя их рисовать картинку. Любое компьютерное устройство обязательно содержит тактовый генератор, задающий темп работы всем многочисленным узлам схемы. Можно наверняка сказать, что после усилителя генератор – самый распространенный элемент электронной аппаратуры.

2. Источником переменного напряжения может быть колебательный контур. Нам уже встречалось несколько устройств, на выходе которых действует переменное напряжение. Первое из них – машинный генератор (гл. 5; 16). Для электронной аппаратуры, пожалуй, не подойдет этот сложный агрегат с вращающимися деталями, не говоря уже о том, что от электронных генераторов нередко требуются мегагерцы и гигагерцы, частоты, недоступные для машинного генератора. Отпадает и микрофон в роли генератора (гл. 8; 3): в нем за переменное напряжение нужно платить переменным перемещением. А где его возьмешь?

Остается пока один достойный претендент на роль электронного генератора – колебательный контур (гл. 6; 21–24).

Примечание редактора. Классические генераторы на основе колебательного контура в настоящее время почти не применяются. Одна из причин уже указывалась ранее (см. «Примечание редактора» в гл. 6; 24) – реальные катушки индуктивности, особенно малогабаритные, весьма далеки от своего идеала (чисто индуктивного сопротивления). Генераторы на колебательном контуре требуют индивидуальной настройки, их параметры зависят от температуры, нагрузки и колебаний напряжения питания – в общем, обладают всем букетом отрицательных свойств, присущих классической *аналоговой* технике. Поэтому в современных условиях их стараются заменять на более стабильные и технологичные схемы. В частности, в современных генераторах гармонических колебаний широко используются кварцевые резонаторы. Однако принцип работы кварцевого резонатора тот же, что и у колебательного контура, – его эквивалентная схема содержит емкость, индуктивность и активное (омическое) сопротивление, он имеет последовательный и параллельный резонансы, его качество точно так же оценивается добротностью (причем у «кварца» добротность несравненно выше, чем у любого колебательного контура). Поэтому подробное ознакомление с работой генератора гармонических колебаний (то есть колебаний, основанных на переходе энергии из одного вида в другой, – см. гл. 7; 4) на примере колебательного контура весьма полезно для понимания, как устроены все подобные генераторы, на каком бы принципе они не основывались, – включая, между прочим, и обычные механические маятниковые часы.

Колебательный контур – это электрическая цепь, состоящая из конденсатора C_k , катушки L_k и резистора R_k (рис. 11.1; 1). Правда, резистора как такового в контуре не бывает, и R_k отображает собственное сопротивление контура, в которое входит сопротивление катушки, потери энергии в конденсаторе, другие виды потерь и затрат. До сих пор мы встречали контур в

роли резонансного фильтра в цепи переменных токов (гл. 6; 24). А теперь извлечем его оттуда и посмотрим, что произойдет, если отделить контур от всех других электрических цепей и передать ему порцию энергии, например зарядив конденсатор (рис. 11.1; 2, 3) до напряжения U_c .

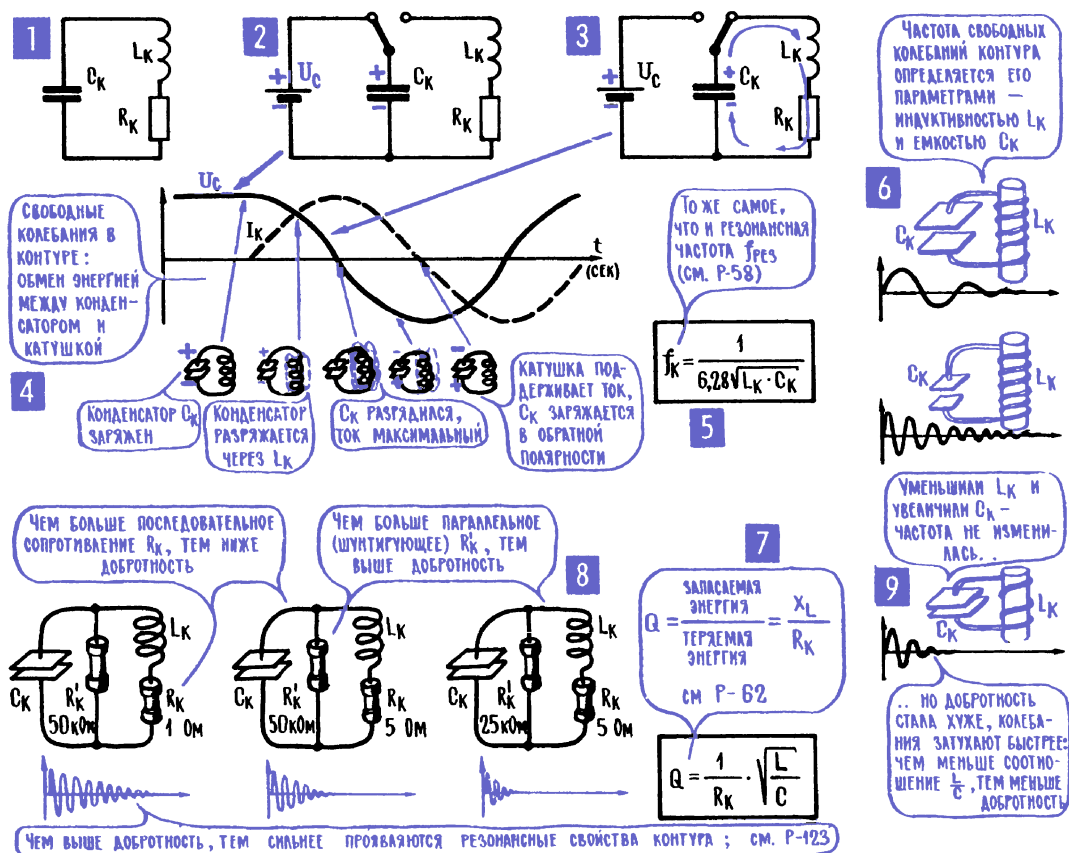


Рис. 11.1. Колебательный контур

А произойдет, скорее всего, вот что. Конденсатор сразу же начнет разряжаться через катушку L_K , в контуре пойдет ток I_K , вокруг катушки появится магнитное поле. Когда разряд конденсатора закончится, ток в цепи не прекратится, его будет поддерживать ЭДС самоиндукции, которую создаст убывающее магнитное поле катушки. Для пустого разрядившегося конденсатора это будет зарядный ток, он зарядит конденсатор, но уже, конечно, в обратной полярности. И когда катушка завершит свою деятельность, когда ее магнитное поле исчезнет и перестанет действовать ЭДС самоиндукции, ток в цепи все равно не прекратится, его будет создавать разряжающийся конденсатор. Но это уже ток обратного направления, поскольку противоположна и полярность напряжения на конденсаторе (рис. 11.1; 4).

И снова все пойдет по знакомому сценарию. Конденсатор разрядился, но ток поддерживает катушка. Магнитное поле катушки исчезает, конденсатор вновь оказался заряженным. Конденсатор разрядился, но ток поддерживает катушка. Магнитное поле катушки исчезло, а конденсатор вновь оказался заряженным. И так цикл за циклом будет заряжаться и разряжаться конденсатор, нарастать и убывать магнитное поле катушки, меняться ток в контуре, напряжение на конденсаторе и катушке. Будут происходить электромагнитные (иногда для краткости говорят просто электрические) колебания в контуре.

3. Частота свободных колебаний в контуре определяется его индуктивностью и емкостью. Эти электрические колебания в контуре относятся к огромному классу процессов, имя которому – свободные колебания (гл. 7; 4). У электрических колебаний те же главные приметы и повадки, что и, скажем, у колебаний маятника или струны, хотя, конечно, в колебания вовлечены совсем иные физические процессы. Как и в любой колебательной системе, в контуре есть два накопителя энергии – электрическое поле конденсатора и магнитное поле катушки. Накопители эти действуют не каждый сам по себе, они взаимосвязаны: когда магнитное поле убывает, то ЭДС самоиндукции заряжает конденсатор, а когда конденсатор разряжается, то в цепи идет ток, который запасает энергию в магнитном поле катушки. Именно обмен энергией между двумя ее накопителями – конденсатором и катушкой – и приводит к колебаниям, к изменению тока в контуре, напряжений на его элементах.

Частота свободных электрических колебаний в контуре зависит от его параметров – индуктивности L_k и емкости C_k , так же как частота свободных механических колебаний струны зависит от ее массы и гибкости (гл. 7; 5). Чем больше емкость конденсатора C_k и индуктивность катушки L_k , тем медленнее они накапливают и отдают энергию, тем медленнее происходит обмен энергией между этими накопителями, тем ниже частота свободных электрических колебаний (рис. 11.1; 5, 6). Причем частота переменного напряжения и переменного тока в контуре автоматически устанавливается именно такой, чтобы конденсатор и катушка получали одинаковые порции энергии. То есть частота получается такой, что емкостное сопротивление x_C и индуктивное x_L на этой частоте одинаковы. Из условия равенства сопротивлений $x_C = x_L$ легко найти точное значение частоты свободных колебаний – она получается такой же, как резонансная частота контура $f_{\text{рез}}$ (рис. 6.18; 1). Логичнее, пожалуй, сказать наоборот – резонансная частота $f_{\text{рез}}$ равна частоте свободных колебаний f_k .

Очень удобно, что частота свободных колебаний зависит от индуктивности и емкости контура. Это значит, что, изменяя L_k или C_k , можно менять частоту переменного напряжения, которую будет давать контур. Если, конечно, он пройдет на роль электронного генератора. Именно «если прой-

дет»: пока этому мешает одно прискорбное обстоятельство, характерное для всех колебательных систем, – неизбежное затухание колебаний.

4. Чем выше добротность контура, тем медленнее затухают колебания. Свободные электрические колебания затухают в контуре постепенно, энергия, первоначально полученная конденсатором, постепенно теряется на сопротивлении R_k , превращается в тепло. При этом постепенно уменьшается амплитуда переменного тока, переменные напряжения на катушке и конденсаторе.

То же самое мы уже наблюдали в колеблющейся струне, для нее была введена характеристика «добротность» Q , которая как раз и показывает, от чего зависит время жизни свободных колебаний (гл. 7; 6). Подобная характеристика – добротность Q – говорит и о том, насколько бережно относится к своим запасам энергии колебательный контур. Чем больше энергии при каждом перекачивании уходит в запас, в магнитное поле или электрическое поле и чем меньше энергии при каждом перекачивании превращается в тепло, тем больше добротность Q , тем дольше длятся свободные колебания в контуре (рис. 11.1; 7, 8).

5. Добротность контура тем выше, чем меньше потери энергии, чем больше индуктивность и меньше емкость. Добротность – исключительно важная характеристика колебательного контура. Когда контур используется в качестве резонансного фильтра, то именно от добротности зависит, насколько хорошо он будет справляться со своей задачей. Чем выше добротность, тем сильнее контур задавит токи соседних частот и тем лучше выделит, вытащит из аккорда ток своей собственной, резонансной частоты. Когда контур держит экзамен на роль генератора, то именно от добротности зависит, какую он при этом получит оценку, насколько долго будут длиться в контуре собственные колебания.

Но от чего же зависит сама добротность, которая столь сильно влияет на все основные таланты контура?

Можно сразу же сказать, что добротность зависит от потерь энергии в контуре: чем меньше потери, тем меньше R_k , тем выше добротность Q . Иногда потери отображаются не только последовательным резистором R_k , но еще и параллельным резистором R'_k , а бывает, что такой резистор R'_k в действительности подключен параллельно контуру, шунтирует контур, старается отвести, отобрать часть циркулирующего в контуре тока. И чем меньше R'_k , тем большая часть энергии в него уходит, тем ниже добротность.

Есть еще одна зависимость, не сразу, может быть, заметная, – добротность контура зависит от соотношения L_k и C_k . В процессе каждого перекачивания энергии вся она делится на две части, часть энергии поглощается активным сопротивлением R_k , а другую часть отбирает один из накопите-

лей, конденсатор или катушка. То, что достается резистору R_k , пропадает безвозвратно; то, что попадает реактивному сопротивлению L_k или C_k , остается в контуре. Поэтому и оказывается, что добротность контура – не что иное, как отношение реактивного сопротивления к активному – x_L к R_k (рис. 11.1; 7), или, что то же самое, x_C к R_k (поскольку $x_L = x_C$ на частоте f_k).

Сделав простейшие преобразования, можно получить выражение для добротности и увидеть, что она зависит от соотношения L_k и C_k (рис. 11.1; 9). Но даже без преобразований легко прийти к выводу, что добротность Q тем больше, чем больше L_k , и тем меньше, чем больше C_k . Потому что с увеличением L_k возрастает реактивное сопротивление x_L , которое отбирает энергию у ненасытного R_k , отбирает с тем, чтобы вскоре вернуть в контур. А с увеличением C_k емкостное сопротивление x_C уменьшается, конденсатор забирает себе меньше энергии. Более того, приходится еще и L_k уменьшать, чтобы при увеличении C_k сохранить неизменной.

Таблица 11.1. Некоторые значения резонансной частоты LC-контура в зависимости от значений L и C (см. рис. 11.1; 5)

L	5 Гн	1 Гн	100 мГн	3 мГн	3 мГн	300 мкГн	1000 мкГн	250 мкГн	10 мкГн
C	10 мкФ	1 мкФ	0,1 мкФ	400 пФ	45 пФ	400 пФ	120 пФ	500 пФ	25 пФ
f_k	22,5 Гц	160 Гц	1,6 кГц	140 кГц	420 кГц	460 кГц	460 кГц	460 кГц	10 МГц

Зависимость добротности Q от L_k и C_k накладывает серьезные ограничения на выбор параметров контура. Конечно же, частота свободных колебаний f_k в равной мере зависит и от L_k и C_k : одну и ту же частоту можно получить при самых разных соотношениях индуктивности и емкости, подобно тому как одну и ту же площадь прямоугольника можно получить при разных соотношениях его сторон. Если в несколько раз увеличить L_k и во столько же раз уменьшить C_k , то частота f_k не изменится. Можно как угодно менять эти параметры, лишь бы только сохранялось неизменным произведение $L_k \cdot C_k$, которое и определяет частоту f_k . Но если нужно не просто получить ту или иную частоту электрических колебаний, а получить ее при высокой добротности контура, то соотношение L_k и C_k уже далеко не безразлично – нужно стараться, чтобы индуктивность контура была побольше, а емкость поменьше (рис. 11.1; 9).

6. Усилитель с положительной обратной связью компенсирует потери энергии в контуре. Колебательный контур сам по себе не может, к сожалению, сдать экзамен на звание электронного генератора. Как ни уменьшай потери и затраты энергии в контуре, свести их к нулю не удастся, в большей степени или в меньшей, но колебания все равно будут затухать. Правда, если поместить контур в сосуд с жидким гелием, то колебания будут существовать в нем многие дни и даже месяцы – температура жидкого

гелия близка к абсолютному нулю (-273°C), и в проводниках при такой температуре наблюдается явление сверхпроводимости: электрический ток не встречает никаких препятствий, не затрачивает энергии, не выделяет тепла. Поэтому в контуре, помещенном в жидкий гелий, почти нет потерь энергии, его добротность чрезвычайно велика.

Но такой сверхзамороженный контур не может работать генератором. И не только потому, что сложная система поддержания сверхнизкой температуры неприемлема даже для таких аппаратов, как телевизор, не говоря уже о переносных приемниках. Главное в том, что генератор в электронных установках – это не экспонат, а работающий блок, он должен не просто создавать переменное напряжение, но и отдавать энергию потребителю. А всякая передача энергии равносильна появлению в контуре некоторого дополнительного сопротивления, равносильна увеличению R_k . Поэтому даже в идеальном контуре-генераторе, как только он начнет работать, начнет отдавать энергию, колебания быстро затухнут, просто иссякнет запас энергии.

И все же можно получить в контуре незатухающие колебания. О том, как это сделать, подсказывают настенные часы, маятник которых непрерывно колеблется, как будто нет ни трения в системе его подвеса, ни сопротивления воздуха. А еще качели, которые, если ты сумеешь раскачать их в такт с их собственными колебаниями, тоже не будут останавливаться до тех пор, пока не надоест качаться.

Маятник часов и качели подсказывают тактику получения незатухающих электрических колебаний в контуре: полностью ликвидировать потери и затраты энергии нельзя, но их можно скомпенсировать, если извне вводить в контур энергию, которая перекроет все виды потерь и затрат. Для этого достаточно сделать усилитель с положительной обратной связью, например такой, как на рис. 11.2; 1. В этой схеме контур $L_k C_k$ включен в цепь базы и затухающее переменное напряжение на контуре есть не что иное, как усиливаемый сигнал. А в коллекторную цепь включена нагрузка R_n и еще один, новый элемент – катушка обратной связи L_{oc} . Она связана с контурной катушкой L общим магнитным полем, и через этот трансформатор часть «мощной копии» из коллекторной цепи, то есть с выхода усилителя, подается на его вход, поступает в базовую цепь.

Нормальная прямая связь входа и выхода в усилителе – это влияние входа на выход, влияние базовой цепи на коллекторную (в лампе – сеточной на анодную). А влияние выхода на вход, передача сигнала или какой-то его части из коллекторной цепи в базовую – это обратная связь. Типичный пример обратной связи – это передача энергии из катушки L_{oc} в катушку L_k . При определенных условиях энергия, поступившая по цепи обратной связи в контур, полностью скомпенсирует все потери в нем, и электрические колебания в контуре станут незатухающими.

Но это только при определенных условиях.

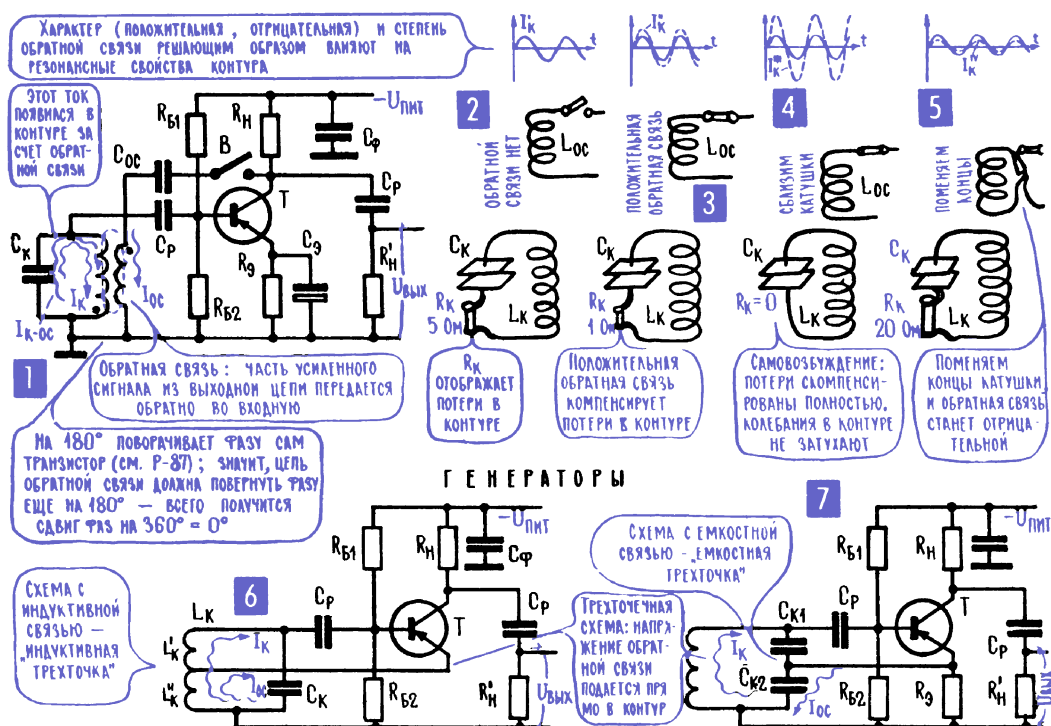


Рис. 11.2. Генерация колебаний с помощью LC-контура

7. Для самовозбуждения генератора нужно выполнить два условия – *условие фаз* и *условие связи*. Переменное напряжение, которое подается на вход усилителя, иногда называют сигналом возбуждения. Потому что именно оно пробуждает к действию дремавший до того усилитель, заставляет меняться коллекторный ток, напряжение на нагрузке и на коллекторе, создает свою мощную копию. Если во входную цепь усилителя включить колебательный контур, то возбуждающим сигналом будет переменное напряжение на этом контуре. Действовать оно будет недолго, так как колебания в контуре затухают. Но если в контуре будут созданы незатухающие колебания, то усилитель превратится в генератор, на его базе непрерывно будет действовать переменное напряжение, в коллекторной цепи появится долгоживущий, устойчивый переменный ток, на нагрузке – устойчивое переменное напряжение. Такой режим называется самовозбуждением: он появляется только благодаря тому, что усилитель – теперь уже генератор – сам себе на вход подает возбуждающее напряжение, которое поддерживает свободные колебания в контуре.

Для самовозбуждения прежде всего нужно, чтобы сигнал, поступающий на вход из коллекторной цепи, поддерживал колебания в контуре (рис. 11.2; 3, 4), а не мешал им (рис. 11.2; 5), что, в принципе, тоже возможно.

Иными словами, нужно, чтобы собственный переменный ток в контуре I_k и ток I_{oc} наведенный катушкой обратной связи, действовали бы в фазе. В схеме рис. 11.2; 1 выполнить это условие – условие фаз – очень просто, нужно лишь правильно включить катушку L_{oc} . При налаживании генератора, добиваясь самовозбуждения, просто переворачивают одну из катушек «вверх ногами». А если это неудобно, то меняют местами концы катушки L_k или концы катушки L_{oc} . При переворачивании катушки или смене ее концов фаза тока I_{oc} наведенного в L_k , поворачивается на 180° , и если токи I_k и I_{oc} ранее действовали в противофазе, они начинают работать согласованно. А это как раз и значит, что сигнал, попавший в контур по каналу связи, восполняет энергию, которую съедает R_k , и как бы уменьшает его.

Но для самовозбуждения нужно не просто уменьшить R_k , а уменьшить его до нуля, полностью скомпенсировать потери в контуре. А значит, нужно выполнить еще одно условие – условие связи, передать в контур энергию не только в нужной фазе, но еще и в нужном количестве. В генераторе на схеме рис. 11.2; 1 выполнить условие связи тоже несложно – нужно сближать катушки L_{oc} и L_k или, в крайнем случае, увеличить число витков катушки обратной связи.

8. В трехточечных схемах генераторов напряжение обратной связи снимается с части контура. Схема генератора рис. 11.2; 1 называется схемой с трансформаторной обратной связью. Есть два совершенно равноправных варианта такой схемы. В одном случае контур включается в базовую цепь (в реальных схемах транзистор обязательно подключается лишь к части контура, иначе низкое входное сопротивление транзистора сильно зашунтирует контур; рис. 11.1; 8), а катушка обратной связи – в коллекторную. А во втором варианте, наоборот, в коллекторной цепи находится контур, выполняющий здесь роль нагрузки, а катушка обратной связи включена во входную цепь. События в обеих схемах, как и вообще во всех генераторах, разворачиваются одинаково. Первый же толчок тока, например при включении питания или из-за того, что на базу попал лишний электрон, – и в контуре начинаются свободные колебания, которые благодаря обратной связи оказываются незатухающими. Схемы с трансформаторной обратной связью очень популярны и весьма удобны. Единственное, что, пожалуй, можно поставить им в упрек, так это дополнительную катушку L_{oc} .

В некоторых генераторах отдельная катушка обратной связи не нужна, в них сигнал обратной связи снимается с части колебательного контура. Это так называемые трехточечные схемы, в них транзистор подключен к контуру тремя точками – эмиттером, базой и коллектором (в ламповых генераторах – катодом, сеткой и анодом). В зависимости от того, откуда берут напряжение обратной связи – с катушки или конденсатора, – различают трехточечные схемы с индуктивной (рис. 11.2; 6) или с емкостной обратной

связью (рис. 11.2; 7). В обеих этих схемах условие фаз выполняется в том случае, если эмиттер подключен к средней части контура, а коллектор и база – к его краям. А выполнение условия связи связано с тем, какая часть контурной емкости или индуктивности подключена к участку база–эмиттер.

В трехточечной схеме с индуктивной связью с выхода транзистора на его вход подается тем большая часть энергии, чем большая часть L'_k контурной катушки L_k включена между базой и эмиттером. Это значит, что, перемещая точку подключения эмиттера вниз по схеме, мы усиливаем обратную связь. Однако при этом одновременно уменьшается коллекторная нагрузка: нагрузкой в этой схеме оказывается не весь контур, а только та часть его L''_k , которая включена между коллектором и эмиттером (верхний по схеме конец L''_k подключен к эмиттеру, нижний – к коллектору через конденсатор фильтра C_Φ). Задумываясь над тем, к чему может привести то или иное действие при налаживании схемы, иногда полезно рассмотреть крайний случай. Попробуем, в погоне за стопроцентной обратной связью, подключить эмиттер к крайней нижней точке катушки L_k , то есть передать с выхода на вход все, что только возможно, весь выходной сигнал целиком. Но при этом окажется, что обратная связь не имеет никакого смысла, потому что транзистор не дает никакого усиления и на его выходе вообще нет сигнала. Мы возвращаем на вход 100 % от «ничего». Потому что транзистор остался без нагрузки.

В емкостной трехточечной схеме напряжение обратной связи снимается с делителя, который образован конденсаторами C_{k1} и C_{k2} . Здесь обратная связь тем сильнее, чем больше емкостное сопротивление верхнего по схеме участка (конденсатор C_{k1}), а коллекторная нагрузка тем больше, чем больше емкостное сопротивление нижнего по схеме участка (конденсатор C_{k2}). Емкостное сопротивление конденсатора обратно пропорционально его емкости, а поэтому с увеличением емкости C_{k1} обратная связь ослабляется. А с увеличением емкости C_{k2} сопротивление коллекторной нагрузки становится меньше. Все осложняется еще тем, что оба конденсатора определяют общую емкость контура C_k , а значит, и частоту электрических колебаний f_k в нем. В схеме появляется еще одна деталь – резистор R_3 . Без него генератор вообще не работает – эмиттер отрезан от коллектора конденсаторами, и постоянная составляющая коллекторного тока может замкнуться только через R_3 . А посадить эмиттер на землю, как это делалось в других схемах, нельзя – окажется замкнутым накоротко конденсатор C_{k2} .

У трехточечной схемы с емкостной обратной связью есть некоторое преимущество в сравнении с другими схемами. Если изменять частоту генератора, заменяя контурные катушки, то в этой схеме достаточно производить переключение только одного провода (верхний конец катушки), в то

время как в других схемах нужно одновременно производить два переключения (например, переключать верхний конец катушки и отвод обратной связи в схеме рис. 11.2; 6).

Во всех схемах генераторов присутствует незримый элемент – резистор R'_H . Генератор работает не сам для себя, а передает результаты своей работы потребителю, который представлен резистором R'_H .

9. RC-генератор: необходимый поворот фазы постепенно осуществляют цепочки из конденсаторов и резисторов. Обратную связь в генераторах называли положительной потому, что она поддерживает изменения сигнала на входе, помогает ему. Но, в принципе, возможна еще и отрицательная обратная связь, когда сигнал, поступивший с выхода усилителя на его вход, действует против основного, главного входного сигнала, мешает ему (рис. 11.2; 5). Отрицательная обратная связь вскоре станет для нас предметом серьезных раздумий и тонких экспериментов (гл. 12; 15, 16), а пока отметим лишь одно: если с коллектора подать сигнал прямо на базу, то обратная связь получится именно отрицательной. Потому что когда «минус» на базе увеличивается, на коллекторе «минус» уменьшается, то есть коллекторное напряжение, попав на базу, будет действовать против собственного напряжения на базе¹. Или, короче, напряжение на базе и напряжение на коллекторе противофазны. А отсюда еще одна формулировка условия фаз: для получения положительной обратной связи при передаче сигнала из коллекторной цепи в базовую нужно повернуть фазу этого сигнала на 180° . Коллекторное напряжение само по себе сдвигается на 180° относительно базового, и дополнительный поворот на 180° доведет общий сдвиг фаз до 360° , то есть на целый период. А это значит, что никакого сдвига фаз не будет: «свое» напряжение на базе и та помощь, которая придет на базу по цепи обратной связи, будут действовать согласованно.

В генераторе с трансформаторной обратной связью поворот фазы на 180° получают определенным расположением и включением катушек, в трехточечных схемах – определенным подключением транзистора к контуру (эмиттер – в центре, коллектор и база – по краям). И есть еще одна возможность выполнить условие фаз: при передаче сигнала с коллектора на базу можно повернуть фазу сигнала на 180° с помощью нескольких последовательно соединенных RC-цепочек. Генератор, в котором используется такой способ поворота фазы, так и называется: RC-генератором, одна из возможных его упрощенных схем приведена на рис. 11.3; 1. По-видимому, первое, что в этой схеме бросается в глаза, – так это отсутствие колебательного контура. Но как же без контура? Где же тогда возникают первые слабые, затухающие колебания, которые потом поддерживает обратная связь, делая их незатухающими? И какие элементы в таком бесконтурном

¹ См. также рис. 10.11; 1.

генераторе определяют частоту переменного напряжения? В предыдущих схемах частота определялась индуктивностью и емкостью контура.

А здесь чем?

Начнем с конца: частоту определяют три RC-цепочки, соотношение сопротивлений и емкостей в них. Дело в том, что вся система RC-элементов поворачивает фазу на 180° , но такой поворот происходит только на одной частоте, на других частотах он больше или меньше.

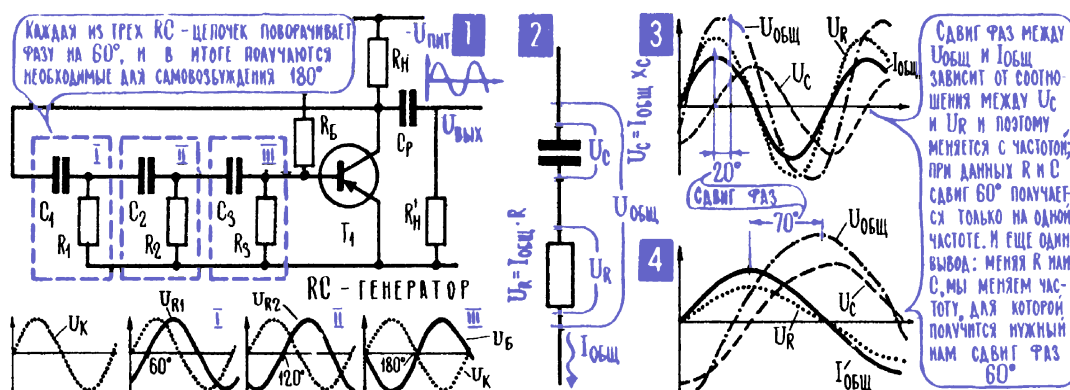


Рис. 11.3. RC-генератор

10. На входе любого транзистора действует очень небольшое напряжение шумов. На базе транзистора, не только в этой схеме, но в любой другой, всегда действуют слабые сигналы самых разных частот. Откуда? Ну, скажем, это просто так называемые шумы, некоторая неравномерность постоянного тока смещения или постоянного эмиттерного тока, часть которого ответвляется в базу. Идеального постоянного тока нет и быть не может. Если в цепи идет ток, движутся миллиарды миллиардов электронов, то из-за хаотичности тепловых процессов в металле обязательно в какой-то момент электронов пройдет на сто штук больше, а в другой момент – на сто штук меньше. В итоге самый постоянный ток хаотично и непрерывно меняется. Очень незначительно, но меняется. Поэтому-то и появляется на входе любого транзистора хаотичное переменное напряжение, как его называют, напряжение шумов. Спектр шумов очень широк, они практически содержат составляющие всех частот, от самых низких до самых высоких.

11. Частота напряжения на выходе RC-генератора определяется сопротивлением и емкостью фазовращающих цепочек. Шумовое напряжение на базе создаст свою копию в коллекторной цепи, и по цепи обратной связи, через все RC-цепочки, часть ее попадет обратно на базу. И вот здесь-то оказывается, что в основном все составляющие придут на базу с неудачными фазами, они будут ослаблять породившие их составляющие базовых

шумов. И только одна составляющая, для которой три RC-цепочки создадут поворот фазы на 180° , добравшись из коллектора в базу, будет поддерживать, усиливать породивший ее сигнал. Эта составляющая шумов базового тока станет еще сильнее и создаст в коллекторной цепи еще более сильную свою копию. А та опять-таки усилит сигнал на базе, и так пойдет: выходное напряжение данной частоты будет нарастать и нарастать, пока его не ограничит коллекторное питание.

В заключение несколько слов о том, почему RC-цепочки поворачивают фазу точно на 180° . Ток через резистор R и напряжение на нем U_R совпадают по фазе, ток через конденсатор C и напряжение U_C на нем сдвинуты по фазе на 90° (рис. 11.3; 2, 3, гл. 6; 9, 13). Во всех элементах последовательной цепи ток один и тот же – $I_{\text{общ}}$, а общее напряжение $U_{\text{общ}}$ равно сумме напряжений U_R и U_C на отдельных участках.

Ну а сдвиг фаз? Одно напряжение совпадает по фазе с током, второе опережает ток на 90° , так как же соотносятся фазы тока и общего напряжения $U_{\text{общ}}$? Чем больше x_C какой-либо RC-цепочки, тем больше напряжение U_C на конденсаторе и тем ближе к 90° сдвиг фаз между током $I_{\text{общ}}$ и общим напряжением $U_{\text{общ}}$. А чем больше R , тем более «активный характер» имеет сопротивление всей цепи, тем меньше сдвиг фаз между $I_{\text{общ}}$ и $U_{\text{общ}}$. Существует частота, на которой при данном соотношении C и R сдвиг фаз между $I_{\text{общ}}$ и $U_{\text{общ}}$ равен 60° , и три такие цепочки поворачивают фазу в сумме на 180° (рис. 11.3; 3). Если изменить R или C в фазовращающих RC-цепочках, то сразу же изменится соотношение между R и x_C . И прежнее соотношение между $I_{\text{общ}}$ и $U_{\text{общ}}$, а значит, и прежний сдвиг фаз в 60° будут уже на другой частоте. А отсюда вывод: при изменении R или C изменится частота переменного напряжения на выходе генератора. Существуют и другие схемы генераторов с фазовращающими RC-цепочками, но механизм генерирования переменного напряжения у всех у них одинаков.

Примечание редактора. Схема генератора с трехзвенной RC-цепочкой, приведенная на рис. 11.3; 1, крайне редко употребляется на практике. Во-первых, это обусловлено сложностью расчета такой схемы – в RC-цепочке каждое следующее звено будет служить нагрузкой предыдущего, а база транзистора – нагрузкой всей цепочки, что делает расчеты весьма приблизительными. Во-вторых, в этой схеме необходимо введение эмиттерного резистора (рис. 10.11; 2) для уменьшения шунтирования цепочки входным сопротивлением транзисторного каскада; при этом должен сохраняться высокий коэффициент усиления напряжения (не менее 30), следовательно, для сохранения режима по постоянному току – повышенное напряжение питания (см. гл. 10; 21, 22). То есть практические трудности нарастают на каждом этапе. Для построения надежных синусоидальных генераторов на основе транзистора (или операционного усилителя) проще и удобнее применять схему с мостом Вина–Робинсона (см. *Практикум* в конце этой главы). Подробности можно посмотреть в учебниках [2, 3].

12. В мультивибраторе два взаимосвязанных транзистора поочередно открывают друг друга, генерируют переменное напряжение прямоугольной формы. Есть бесконтурные генераторы, работающие на совершенно ином принципе². Это прежде всего мультивибратор (рис. 11.4), в котором работают два транзистора, причем каждый из них управляет работой другого – коллектор каждого транзистора через конденсатор связан с базой своего соседа.

В бурных событиях, которые происходят в мультивибраторе, немало действующих лиц (рис. 11.4; 2). Это напряжения на базах, которые в итоге определяют коллекторные токи, а значит, и напряжения на коллекторах. Это конденсаторы C_6 и C_7 , от емкости которых зависит скорость их заряда и разряда, а значит, и время существования токов, которые влияют на режимы транзисторов. Это еще и резисторы R_6 и R_7 , которые не только определяют режимы транзисторов своими обычными методами, но еще и участвуют в заряде и разряде конденсаторов и тоже влияют на скорость этих процессов (гл. 3; 15).

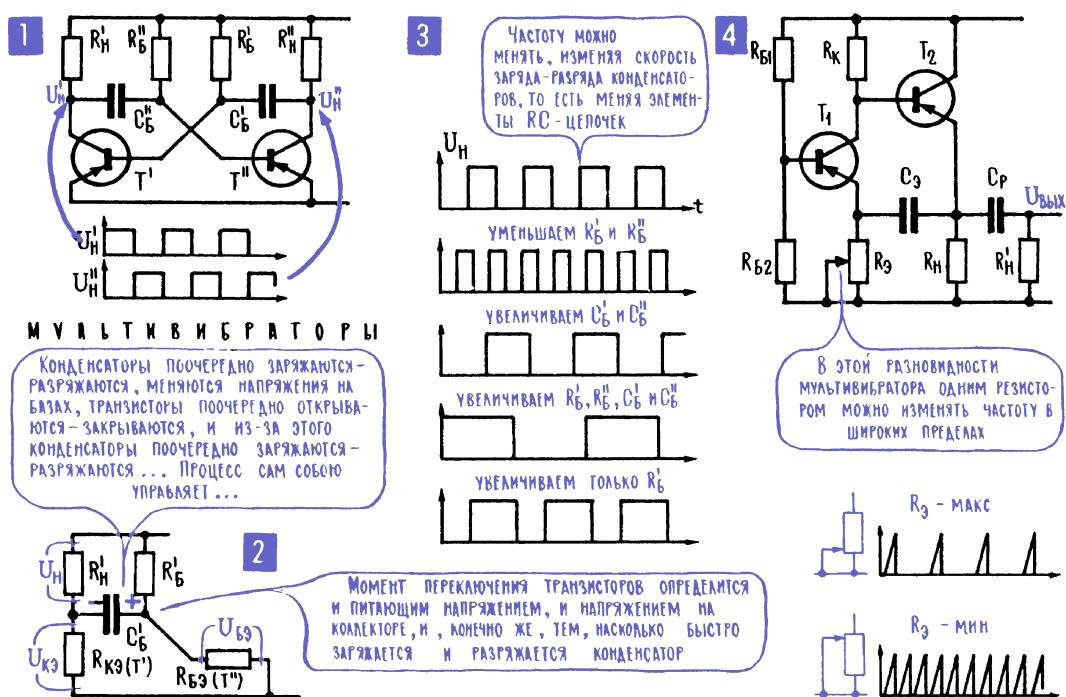


Рис. 11.4. Мультивибраторы

Если детально разобраться в том, что происходит в мультивибраторе, в какие моменты времени какие напряжения приложены к конденсаторам,

² В отличие от рассмотренных генераторов гармонических колебаний, мультивибраторы, описанные далее, являются релаксационными генераторами (см. «Примечание редактора» гл. 7; 4, а также раздел 15 в этой главе).

какой величины и какого направления текут токи, как конкретно эти токи влияют на режимы транзисторов, то окажется, что транзисторы T_1 и T_2 внимательно следят друг за другом, каждый из них мгновенно реагирует на действия соседа. Именно мгновенно: такой быстроте реакции позавидовал бы любой боксер.

Как только один из транзисторов открывается, второй тут же закрывается – это результат сложного взаимодействия токов и напряжений в схеме. Проходит некоторое время (оно-то как раз и определяется скоростью заряда и разряда конденсаторов), закрытый транзистор мгновенно открывается, и тут же ответный удар – закрывается второй транзистор. В итоге транзисторы периодически и поочередно открываются и закрываются, а значит, токи у них и напряжение на коллекторах периодически меняются от своей наибольшей величины до наименьшей. На выходах мультивибратора (у него два выхода, поскольку два транзистора) появляются меняющиеся напряжения и токи, электронный генератор действует.

13. На частоту колебаний в мультивибраторе влияют сопротивления и емкости всех его элементов. Частота переменных напряжений на выходах мультивибратора зависит от емкости конденсаторов и сопротивления резисторов, которые входят в его схему, и еще от смещения на базах, которое приходится преодолевать, чтобы запирать транзисторы. Практически изменение любого элемента схемы приводит к изменению частоты (рис. 11.4; 3) – с увеличением емкости C'_6 и C''_6 , сопротивлений $R'_н$, R'_6 и $R''_н$, R''_6 процессы заряда и разряда конденсаторов, отпирания и запираания транзисторов идут медленнее, частота мультивибратора уменьшается³. Но, конечно же, существуют определенные ограничения на выбор элементов схемы, их нельзя менять как угодно, добываясь нужной частоты. Так, например, чрезмерное уменьшение сопротивлений нагрузки $R'_н$ и $R''_н$ может настолько снизить усиление каскадов, что мультивибратор вообще перестанет работать. Срыв генерации может также произойти из-за чрезмерного уменьшения базовых резисторов R'_6 и R''_6 «минус» на базе может оказаться таким большим, что разряжающийся конденсатор не сможет его скомпенсировать, не сможет запереть транзистор.

Подбором резисторов частоту мультивибратора удастся менять в сравнительно небольших пределах, чтобы резко изменить частоту, приходится менять емкость конденсаторов. В частности, для получения очень низких частот в качестве C'_6 и C''_6 используют электролитические конденсаторы большой емкости⁴. На рис. 11.4; 4 показана одна из схем мультивибрато-

³ Так как обычно $R_н \ll R_6$, то изменение сопротивлений коллекторной нагрузки $R_н$ гораздо меньше, чем изменение сопротивлений в базах, влияет на частоту этого мультивибратора, практически полностью она определяется двумя постоянными времени $R'_6 \cdot C'_6$.

⁴ Устанавливаются положительным выводом в сторону коллектора для $n-p-n$ -транзисторов (см. рис. 11.4; 2).

ра, которая устойчиво работает при сравнительно больших изменениях одного из сопротивлений: изменяя $R_{\text{э}}$, можно менять частоту в четыре–восемь раз, что в других схемах можно сделать только за счет изменения емкости.

Примечание редактора. Классическая схема мультивибратора на транзисторах, показанная на рис. 11.4; 1, была весьма популярна в 1960-е годы из-за своей простоты и неприхотливости. Схема отлично работает с любыми маломощными транзисторами в широких пределах емкостей конденсаторов, причем длительности полупериодов здесь настраиваются совершенно независимо друг от друга. Главное условие стабильной работы – соотношение токов в базе и коллекторе не должно превышать справочного коэффициента усиления (что равносильно условию $R_{\text{б}}/R_{\text{н}} < \beta$), наименьшая длительность каждого полупериода обуславливается частотными свойствами выбранных транзисторов ($f_{\text{гр}}$), наибольшая – токами утечки базового перехода. Однако у этой схемы есть один принципиальный недостаток: на базах при каждом переключении происходит обратный выброс напряжения, по амплитуде равный напряжению питания, но имеющий противоположный знак (подробности см. в [1], раздел 6.2.3). Многие германиевые транзисторы, популярные в те годы, имели пробивное напряжение эмиттерного перехода $U_{\text{бэ,доп}}$, равное или сравнимое с максимальным значением коллекторного напряжения $U_{\text{кэ,доп}}$ (хотя тоже далеко не все). Однако для подавляющего большинства кремниевых транзисторов $U_{\text{бэ,доп}}$ равно 5 В, лишь для немногих типов повышаясь до 6 (например, старинный КТ315) или до 7 В (в основном для некоторых мощных транзисторов). Иными словами, для современных транзисторов схема по рис. 11.4; 1 применима лишь при напряжениях питания не более 5 В.

14. Блокинг-генератор: из коллекторной цепи в базовую через трансформатор попадает сигнал, который периодически открывает и закрывает транзистор. Есть еще один распространенный тип генераторов, в котором всеми событиями управляет заряд-разряд конденсатора. Это блокинг-генератор, его упрощенная схема показана на рис. 11.5. Знакомство с работой блокинг-генератора начнем с того момента, когда включено питающее напряжение и в коллекторной цепи появился ток. Нарастающий коллекторный ток сразу через трансформатор наведет напряжение U_{II} в базовой цепи. Причем напряжение такой полярности (это зависит от того, как включена обмотка II), которая способствует еще большему открыванию транзистора. Транзистор открывается лавинообразно до полного насыщения (напряжение на нагрузке максимально, на самом коллекторе около нуля), а ток положительной обратной связи заряжает конденсатор $C_{\text{б}}$ и при этом поддерживает транзистор в открытом состоянии. Но после того, как этот конденсатор полностью зарядится до напряжения на обмотке II, ток через него прекратится, и транзистор скачком закроется постоянным напряжением на конденсаторе, которое имеет отрицательную полярность относительно базы. Теперь напряжение $U_{\text{с}}$ на конденсаторе $C_{\text{б}}$ начинает по-

степенно уменьшаться, он разряжается через резистор R_6 . И вот наступает такой момент, когда конденсатор уже не может противодействовать «минусу», поступающему на базу через R_6 : транзистор мгновенно открывается, в коллекторной цепи появляется ток и... все начинается сначала – опять рывок коллекторного тока, опять заряд конденсатора, опять он закрывает транзистор, постепенный разряд конденсатора, и в какой-то момент снова открывание транзистора и очередной рывок коллекторного тока...

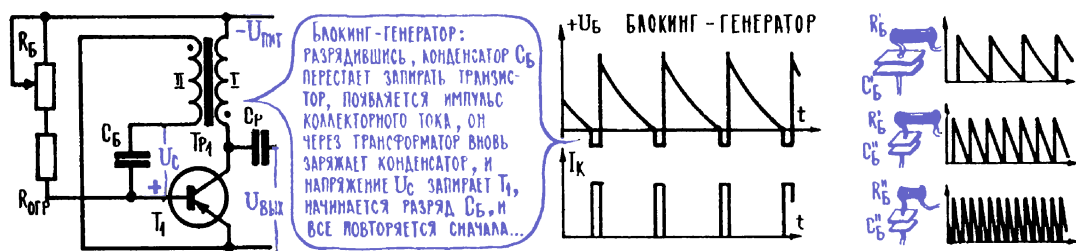


Рис. 11.5. Блокинг-генератор

Так в блокинг-генераторе транзистор, разумеется с помощью трансформатора и разрядной RC-цепочки, периодически сам себя открывает и закрывает, генерирует меняющееся напряжение. Частота этого напряжения зависит от того, сколько времени проходит от одного отпирания транзистора до следующего, а значит, главным образом зависит от постоянной времени разрядной цепи (гл. 4; 15), от сопротивления R_6 и емкости C_6 . Чем они больше, тем медленнее идет процесс разряда, тем ниже частота.

15. От генератора часто требуется определенный характер изменения выходного сигнала, определенная форма кривой, спектр. Генератор с колебательным контуром и RC-генератор с фазовращающими цепочками дают на выходе синусоидальное напряжение. Конечно, не идеальную синусоиду, но обычно все же без значительных посторонних примесей. У блокинг-генератора на выходе остроконечные импульсы, у мультивибратора – прямоугольные, спектр и тех, и других содержит большое число гармоник. Кстати, и само название «мультивибратор» переводится как генератор, который дает большое число различных колебаний, богатый спектр синусоидальных составляющих.

В электронной аппаратуре генераторы выполняют самую разную работу, и от них, бывает, требуются самые разные напряжения. Разные не только по своему уровню, по числу вольт, не только по частоте, но и по характеру изменения, по форме кривой, по спектру. Так, например, в большинстве цифровых устройств синусоидальное напряжение непригодно, там нужен генератор, на выходе которого напряжение растет не постепенно, как синусоида, а резко, скачкообразно. Блокинг-генератор

широко применялся ранее как генератор пилообразного напряжения для осуществления развертки луча в кинескопах⁵.

Форма напряжения на выходе генератора не есть нечто неприкосновенное и неизменное. Существует много разных способов менять ее и получать от генератора не тот сигнал, что он хочет дать, а тот, что нужно. Влиять на форму сигнала можно с помощью различных фильтров, RC-цепочек, ограничителей, фазовращателей, словом, с помощью самых разных инструментов и методов хирургии электрического сигнала. Для иллюстрации – ультракороткие рассказы о трех из них.

16. В умножителях частоты одну из высших гармоник выделяет настроенный на нее контур. Один способ изменения формы сигнала нам уже встречался – это превращение переменного напряжения в пульсирующее с помощью вентиля, полупроводникового диода (гл. 9; 12). Точно такую же операцию может выполнить транзистор (лампа), на который не подано начальное смещение: такой транзистор будет открываться только во время одного из двух полупериодов входного сигнала (на базе «минус»), вторую половину периода (на базе «плюс») коллекторная цепь бездействует.

Если подать на базу смещение и менять его, то будет меняться и степень «отсечки» коллекторного тока, то есть, по сути, форма выходного сигнала. Введена даже особая мера для формы сигнала – это угол отсечки θ , половина времени, в течение которого существует ток, выраженная в долях периода, в градусах (рис. 11.6). Так, например, если коллекторный ток существует только полупериода, то мы говорим, что угол отсечки равен 90° (половина от 180°). А если на базу подано нормальное смещение и коллекторный ток существует в течение всего периода, то мы говорим, что угол отсечки равен 180° (половина от 360°), то есть никакой отсечки нет.

Меняя смещение на базу, можно менять и угол отсечки коллекторного тока от 0° (транзистор всегда закрыт) до 180° (отсечки нет, форма кривой не искажается). Точный математический анализ, подтвержденный экспериментами, не хуже, чем таблица умножения, позволяет определить, какие именно составляющие и в какой пропорции будут появляться при разных углах отсечки. На рис. 11.6; 3 приведен довольно простой график, по которому можно быстро определить, сколько процентов от наибольшей величины коллекторного тока $I_{к.макс}$ составят амплитуды первой гармоники I_1 , второй гармоники I_2 , третьей гармоники I_3 и постоянной составляющей I_0 . Из этого графика, например, видно, что все гармоники исчезают, когда отсечки нет, то есть при $\theta = 180^\circ$, что вторая гармоника становится наиболее сильной при $\theta = 60^\circ$, а третья – при $\theta = 40^\circ$.

⁵ Сейчас для получения пилообразного и треугольного напряжения, необходимого для многих вещей (например, для широко-импульсных модуляторов), применяются преимущественно цифровые методы.

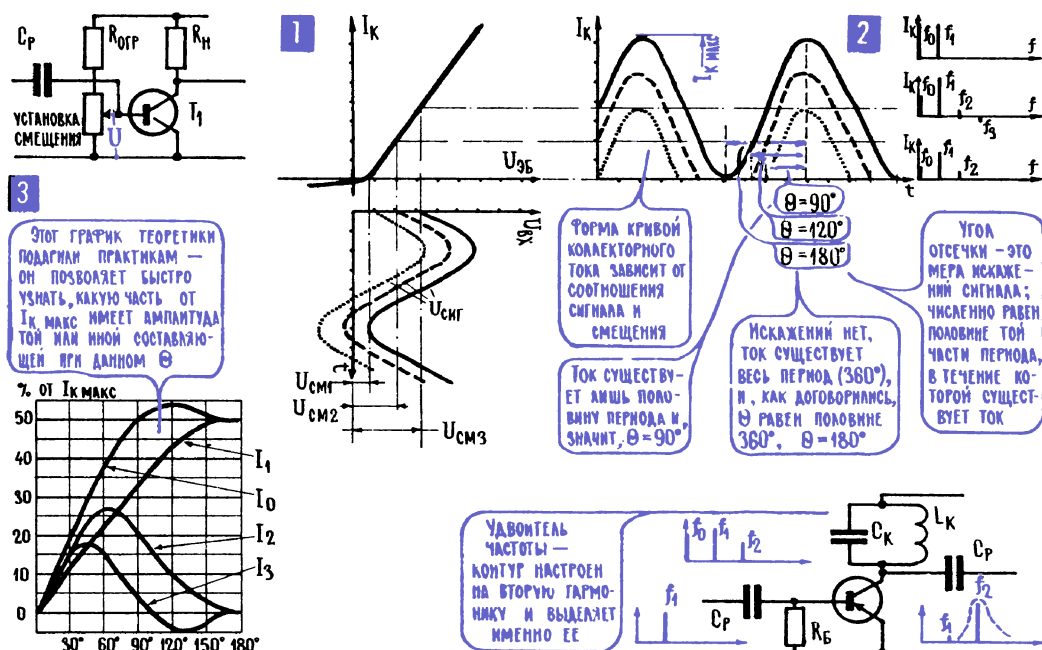


Рис. 11.6. Умножитель частоты

Любую из гармоник выходного сигнала можно выделить с помощью резонансного фильтра — колебательного контура, настроенного на соответствующую частоту (рис. 11.6; 4). Эта операция называется умножением частоты и производится довольно часто. Во многих радиопередатчиках, например, несколько раз осуществляют удвоение частоты, выделение второй гармоники из сигнала, который перед этим обязательно искажают, усиливают его с отсечкой ($\theta = 60^\circ$).

Рассказ об умножении частоты можно завершить экспериментом. С понижающего трансформатора подайте на громкоговоритель 5–8 В сетевого напряжения, имеющего, как известно, частоту 50 Гц. Затем включите между трансформатором и громкоговорителем полупроводниковый диод. В первом случае вы услышите очень низкий чистый тон⁶, во втором звук будет хриплым. Потому что диод изменит форму сигнала, создаст отсечку $\theta = 90^\circ$ (ток существует только полупериода), и наше ухо услышит все составляющие искаженного сигнала.

17. Триггер срабатывает через такт и делит частоту генератора на два. Можно смело сказать, что триггер — один из самых распространенных схемных узлов современной электроники. Во всяком случае, это главное действующее лицо в любых компьютерных устройствах (компьютерная память и регистры микропроцессоров — те самые, с помощью которых производятся все операции, — представляют собой триггеры). Типичная

⁶ Чуть выше ноты соль контроктавы фортепиано.

схема транзисторного триггера – на рис. 11.7; 1, внешне по начертанию и расположению элементов он похож на мультивибратор. Как и у мультивибратора, в триггере два транзистора. Они так же связаны друг с другом – с коллектора одного сигнал подается на базу другого. Но только в мультивибраторе коллектор транзистора связан с базой своего соседа через конденсатор, а в триггере связь прямая, через резистор. Поэтому каждый транзистор триггера влияет на работу второго транзистора постоянно, долговременно, а не кратковременно, как в мультивибраторе, где все связано с зарядом и разрядом конденсатора, с процессом, который рано или поздно заканчивается. В отличие от мультивибратора, в триггере есть вход, куда подаются импульсные сигналы.

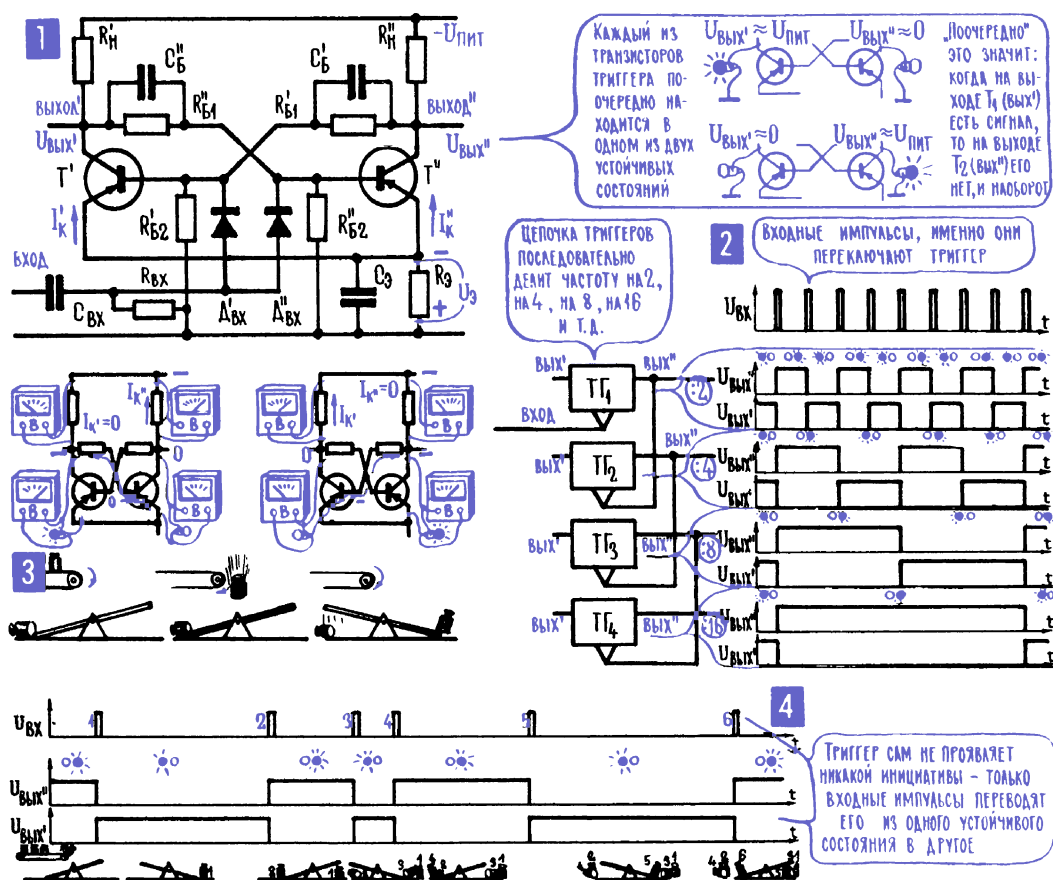


Рис. 11.7. Счетный триггер на транзисторах

Начнем с начала, с того момента, когда на триггер было подано питание. И предположим, что в этот момент оба транзистора оказались слегка открытыми и в обоих шел одинаковый коллекторный ток. Мы уже знаем, что постоянный ток – понятие относительное (гл. 11; 10) и в какой-то момент

в одном из транзисторов ток случайно окажется чуть-чуть меньше, чем во втором, пусть на доли микроампера, но меньше.

Для определенности предположим, что уменьшился ток I'_k в транзисторе T_1 . При этом сразу же несколько поднялось напряжение на его коллекторе (чем меньше коллекторный ток, тем меньше напряжение на нагрузке и больше остается на коллекторе), которое прямо через резистор R'_6 «плюсом» подается на базу транзистора T_2 . Раз на базе T_2 увеличился «минус», то увеличился коллекторный ток I''_k , и на коллекторе этого транзистора «плюс» стал меньше. С коллектора T_2 «минус» через R''_6 подается на базу T_1 , и из-за уменьшения этого «плюса» ток в транзисторе T_1 еще больше уменьшится. Процесс этот будет лавинообразно нарастать, и через некоторое время один из транзисторов окажется полностью закрытым, а второй – полностью открытым. В нашем примере закроется T_1 , он покатится в это закрытое состояние из-за случайного незначительного уменьшения коллекторного тока. С таким же успехом мог закрыться и другой транзистор, если бы у него раньше началось такое незначительное уменьшение тока.

Но важно совсем не то, какой транзистор закроется раньше. Важно то, что состояние, когда один из транзисторов закрыт, а второй открыт, – это естественное, устойчивое состояние триггера, он будет находиться в таком состоянии бесконечно долго. Потому что оба транзистора всеми своими силами стараются сохранить устойчивое состояние, в котором случайно оказался триггер – первый, закрытый транзистор всем своим коллекторным «плюсом» открывает второй, открытый транзистор, а тот, в свою очередь, ничтожно малым «плюсом» на коллекторе не может противодействовать внешнему напряжению $U_{\text{зап}}$ (о нем чуть позже), которое запирает первый транзистор.

Но вот на вход триггера приходит сигнал, приходит прямоугольный импульс такой полярности, что он стремится открыть оба транзистора. И тут все приходит в движение. Правда, на открытый транзистор входной сигнал не действует – он и так открыт. Но зато дремавший и уставший от бездеятельности (необходимо немедленно освежить в памяти гл. 1; 8) закрытый транзистор немедленно открывается. И лавинообразно меняет все токи и напряжения в триггере, закрывает своего конкурента, а сам остается открытым до следующего сигнала на входе.

Так одинаковые входные сигналы поочередно переводят триггер из одного устойчивого состояния в другое, и при этом меняются напряжения на коллекторах транзисторов. Причем меняются они через такт – нечетные импульсы открывают один из транзисторов, четные – второй (рис. 11.7; 2). И если снимать напряжение с одного из транзисторов триггера, безразлично с какого, то число импульсов этого напряжения будет в два раза меньше, чем число импульсов на входе. То есть триггер в два раза уменьшает частоту поступающего на его вход сигнала. А если соединить последовательно несколько триггеров, то можно разделить частоту на 2, на 4,

на 8, на 16, одним словом, в $2n$ раз, где n – любое положительное целое число. А это уже не просто деление частоты, это возможность выполнения арифметических операций и определенной очередности включения электрических цепей, благодаря чему триггеры как раз и используются в вычислительных машинах.

Примечание редактора. Автором описана схема т. н. асинхронного счетного триггера (С-триггера), который служит главным элементом двоичных счетчиков (см. *Практикум* в главе 16). Существует много других типов триггеров, как проще приведенного (RS-триггер), так и сложнее и по устройству, и по функциональности (различные динамические и синхронные триггеры). Триггер – один из основных элементов компьютерных схем (в частности, устройств памяти); излишне говорить, что в настоящее время все его разновидности реализуют в интегральном исполнении, и чаще всего вы их можете встретить в составе больших интегральных схем различного назначения. Однако триггеры продолжают выпускаться и в виде отдельных микросхем, благодаря чему можно изучать их свойства. Познакомиться с различными типами триггеров и их применением можно в учебнике [4], гл. 8.

Несколько пояснений к схеме рис. 11.7; 1. Резисторы R'_6 и R''_6 шунтированы конденсаторами, для того чтобы процесс переброски из одного устойчивого состояния в другое происходил быстрее и надежнее. Диоды $D'_{вх}$ и $D''_{вх}$ ослабляют взаимное влияние входных цепей транзисторов T_1 и T_2 , а главное, оберегают их от цепей питания. Цепочка R_3C_3 – участок, по которому проходит ток открытого транзистора и создает на нем постоянное напряжение U_3 . Это необходимое для работы триггера запирающее смещение: через R'_6 и R''_6 оно «минусом» подается на базы транзисторов, и только «плюс», поступающий с коллектора одного из них, отпирает второй транзистор. И еще одно примечание: триггер можно перебрасывать из одного состояния в другое как «плюсом», который на мгновение откроет закрытый транзистор, так и (несколько изменив схему) «минусом», который резко закроет открытый транзистор.

18. В нелинейном элементе два сигнала, кроме гармоник, рождают еще и составляющие с суммарной и разностной частотой. С нелинейным процессом мы впервые столкнулись, когда наблюдали за тем, как электрический сигнал с помощью громкоговорителя создает звуковые волны (гл. 8; 11). На характеристике громкоговорителя были отмечены участки с прямой пропорциональной зависимостью «звук–ток», линейные участки. А участки, где нарушалась прямая зависимость между током и звуковым давлением, где начинался загиб характеристики громкоговорителя, были названы нелинейными (гл. 8; 9). Теперь, кроме громкоговорителя, мы знаем массу других элементов, имеющих нелинейные характеристики, – так называемых нелинейных элементов. Это диод, вольт-амперная характеристика которого не только загнута в начале, а вообще изломана

в точке, где меняется полярность напряжения. Это и транзистор (лампа), характеристику которого тоже никак не назовешь прямолинейной.

Теперь мы можем также найти немало других примеров той неприятности, с которой впервые столкнулись в громкоговорителе, – нелинейных искажений сигнала. Из-за работы на нелинейных участках вольт-амперных характеристик диода и транзистора в них искажается форма электрического сигнала, в спектре появляются новые составляющие. Это, конечно, плохо, если сигнал нужно усилить без искажений. Но иногда нелинейные искажения создают специально, чтобы изменить спектр сигнала, как, например, в удвоителе частоты – без нелинейного элемента в нем просто невозможно было бы получить вторую гармонику, которую затем выделил контур (рис. 11.6; 4).

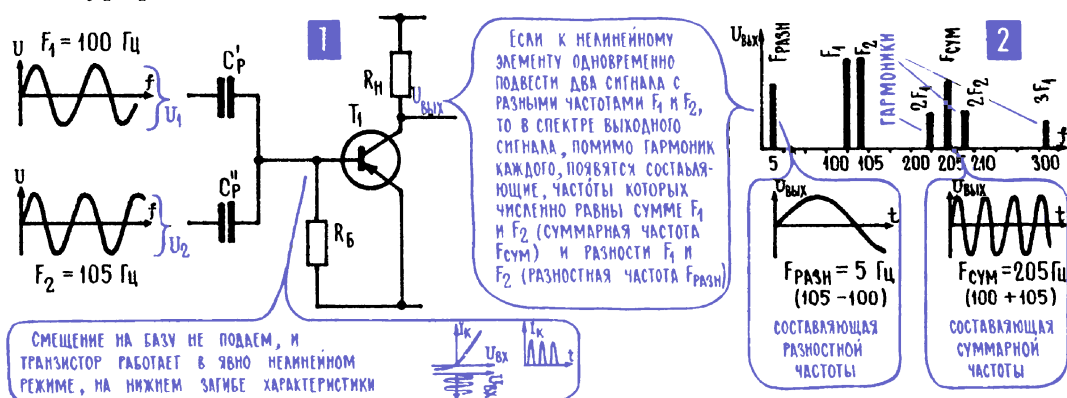


Рис. 11.8. Смеситель частот

Очень интересное преобразование сигнала происходит, когда на нелинейный элемент, например на полупроводниковый диод или на транзистор (лампу), работающий на нелинейном участке характеристики, подают сразу два сигнала (рис. 11.8; 1). В этом случае, как обычно, появятся гармоники каждого из сигналов, синусоидальные составляющие, частоты которых в 2, 3, 4, 5, словом, в целое число раз, больше частоты самого сигнала (рис. 11.6; 2).

Но если внимательно исследовать спектр сигнала, то в нем неожиданно обнаружатся какие-то странные составляющие; их частоты никак нельзя будет отнести ни к гармоникам первого сигнала, ни к гармоникам второго.

Вот конкретный пример. На вход транзистора подали два переменных напряжения: одно с частотой 100 Гц, второе с частотой 105 Гц. Изучая сигналы на выходе транзистора, обнаружили в нем составляющие с частотами 100 Гц, 200 Гц, 300 Гц (гармоники первого сигнала) и составляющие с частотами 105 Гц, 210 Гц, 315 Гц (гармоники второго сигнала). И еще оказались в спектре две такие составляющие – одна с частотой 205 Гц и вторая с

частотой 5 Гц. Их, как видите, нельзя отнести к гармоникам, это совершенно особые составляющие – у первой частота равна арифметической сумме частот первого и второго сигналов ($205 = 100 + 105$), у второй – их разности ($5 = 105 - 100$).

Появление странных составляющих (их для краткости называют суммарной и разностной) связано с самой природой нелинейных искажений. Правда, слово «искажения» здесь можно применять не всегда, часто правильнее говорить о нелинейных преобразованиях. Потому что получение составляющих с суммарной и особенно с разностной частотой – один из важных процессов обработки сигнала в электронной аппаратуре, прежде всего в области радиосвязи.

В заключение – эксперимент. Ударьте слегка по одной клавише рояля, затем по второй и, наконец, по обеим вместе. Вы обнаружите, что при одновременном ударе по двум клавишам слышны такие тона, которых не давала в отдельности ни одна из клавиш. Это в нашем ухе, которое тоже является нелинейным элементом, возникают колебания суммарной и разностной частот, они-то и придают созвучию особую окраску.

Данный эксперимент завершает наше знакомство с генераторами и различными приспособлениями, позволяющими активно воздействовать на спектр сигнала. Одновременно наш музыкальный эксперимент перебрасывает мост в следующий раздел повествования, посвященный в основном воспроизведению звука.

Практикум. Простые генераторы на микросхемах

Для экспериментов понадобятся:

- микросхемы: логические CD40106, CD4001, CD4011, CD4049; таймер 555 (NE555, LMC555, TLC555, KP1006ВН1); операционный усилитель сдвоенный LM747 (ОРА2237, 140УД20);
- набор резисторов 0,25 Вт от 100 Ом до 1 МОм;
- набор керамических конденсаторов от 10 нФ до 2,2 мкФ.

Выводы для подключения питания большинства микросхем на схемах не показаны, так как они расположены одинаково – это крайние выводы корпуса в каждом ряду. Причем вывод 4 (у 8-выводного), 7 (у 14-выводного) или 8 (у 16-выводного корпуса) подключается к общему проводу, а вывод 8, 14 или 16, – соответственно, к выводу плюса питания. Исключение представляет микросхема CD4049, у которой «плюс» питания подключается к выводу 1 (вывод 16 остается свободным).

Эксперимент 1. Генераторы прямоугольных импульсов

Существует огромное количество схем мультивибраторов – релаксационных генераторов прямоугольных колебаний. Мы здесь попробуем воспроизвести только несколько часто употребляемых конструкций, основанных на логических элементах из т. н. серии 4000. Общие черты КМОП-микросхем этой серии, впервые получившей распространение еще в 1970-е годы, – малое потребление и широкий диапазон питания: все подобные микросхемы могут работать при напряжениях питания от 3 до 18 В. Из-за этих свойств серия 4000 широко применяется по сей день, ее отечественные аналоги – серии К561 и К1561.

Самый простой генератор прямоугольных импульсов получается на основе элемента, называемого инвертирующим триггером Шмита (о нем см. главу 15; 8). Секрет этого элемента заключается в том, что у него пороги срабатывания различаются в зависимости от того, возрастает входное напряжение или снижается. При питании 5 В при возрастании входного напряжения выход триггера переключается с высокого уровня (5 В) на низкий (0 В), когда входное напряжение превысит порог около 2,9 В («верхний порог»); однако если оно тут же опять немного снизится, то триггер не сработает. Для обратного переключения необходимо, чтобы входное напряжение снизилось до уровня около 1,9 В («нижний порог»): только при достижении этого значения выход триггера опять переключится с низкого уровня на высокий.

Как и все микросхемы серии 4000, микросхема CD40106, содержащая 6 инвертирующих триггеров Шмита, работает при питании от 3 до 18 В; естественно, при более высоком напряжении питания величина разницы порогов (называемая «гистерезисом») увеличивается по абсолютной величине, достигая при 10–15 В величины 20–25 % от напряжения питания.

Такой гистерезис по уровню входного сигнала обеспечивает основное назначение триггера Шмитта: формирование «чистых» прямоугольных импульсов из входного сигнала произвольной формы. В числе различных применений этого элемента есть и схема генератора (рис. 11.9; 1). Из рассмотрения процесса переключения понятно, как работает эта схема: при включении питания на выходе тут же появляется высокий уровень, конденсатор C_1 постепенно заряжается через резистор R_1 до «верхнего» порога, после чего выход триггера переключается в низкий уровень, и конденсатор разряжается до величины «нижнего» порога. Период колебаний можно подсчитать по приближенной формуле $T \approx 0,8 \cdot R_1 \cdot C_1$, но конкретные значения частоты у разных экземпляров микросхемы CD40106 могут сильно отличаться от расчетного значения из-за разброса значений порогов срабатывания.

Рекомендуемые значения сопротивления R_1 – от нескольких десятков килоом до единиц мегаом, емкости конденсатора – от 100 пикофард до единиц микрофард; соответственно, частота может быть установлена на уровне от долей герца до сотен кГц. Если вдруг понадобится использовать электролитические полярные конденсаторы (что во времязадающих схемах делать вообще-то не рекомендуется), то положительный вывод должен быть размещен по схеме «вверху» (то есть «минус» подключается к общему проводу).

Недостатком этой схемы является конструктивная избыточность: в 14-выводном корпусе расположено целых шесть триггеров Шмита. Если их не предполагается использовать в других целях, то можно усилить выход генератора, подключив к нему все остальные пять элементов параллельно: объединенные входы подключаются к выходу генератора, а выходом всей схемы будут объединенные выходы этих элементов.

Одна из самых удобных схем, также популярная из-за минимального количества задействованных компонентов, показана на рис. 11.9; 2. Два элемента микросхемы CD4049, обозначенных треугольником со значком инверсии на выходе, представляют собой просто усилители логического сигнала с инверсией. То есть такая микросхема переворачивает входной сигнал: если на входе низкий уровень, то на выходе будет высокий, и наоборот.

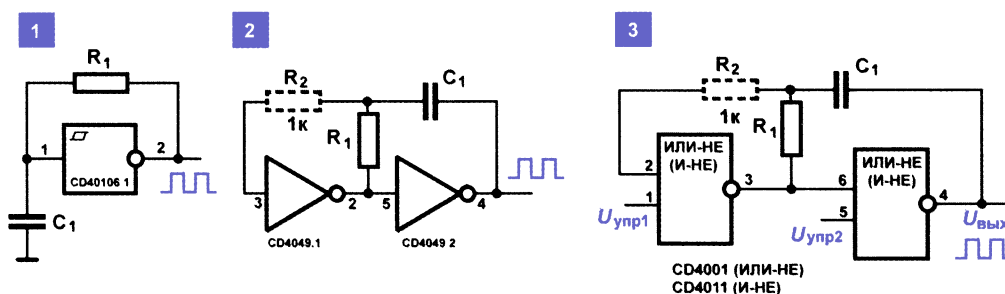


Рис. 11.9. Генераторы на логических микросхемах

При включении питания сначала на входе первого элемента (выв. 3) будет низкий уровень, на его выходе (выв. 2) и входе второго элемента (выв. 5) – высокий, на выходе схемы (выв. 4) – низкий. Конденсатор C_1 заряжается от высокого уровня через резистор R_1 . Напряжение на конденсаторе через резистор R_2 (или просто напрямую – резистор обозначен пунктиром, так как может и отсутствовать, см. далее) подается на вход первого элемента. Когда оно достигнет порога переключения первого элемента, вся схема скачком меняет состояние: на выходе первого элемента – входе второго становится низкий уровень, на выходе всей схемы – высокий, а напряжение на заряженном конденсаторе C_1 добавляется к этому высокому уровню, обеспечивая на входе первого элемента напряжения даже выше напряжения

питания. Конденсатор C_1 теперь через резистор R_1 начинает разряжаться, пока напряжение на нем снова не достигнет порога переключения первого элемента, и далее процесс повторяется. Период переключения определяется приближенной формулой $T \approx 2 \cdot R_1 \cdot C_1$. Схема устойчиво работает при величине резистора R_1 от нескольких килоом до 10 мегом, что составляет достаточный диапазон для того, чтобы избежать искушения при малых частотах использовать электролитические конденсаторы, работающие в таких схемах нестабильно.

Резистор R_2 в работе схемы почти не участвует и нужен только для того, чтобы оградить защитные диоды микросхемы от перегрузки током разряда конденсатора C_1 (как мы говорили, при переключении напряжение на входе может выходить за пределы напряжения питания). Величина его может изменяться от сотен ом до нескольких килом, при условии что он много меньше R_1 . Его можно и вообще исключить из схемы, отчего он показан пунктиром. При больших выдержках времени или при низких частотах (т. е. при больших значениях емкости конденсатора) и напряжении питания выше 7–9 В такой резистор лучше поставить, а в остальных случаях можно без него обойтись.

На рис. 11.9; 3 показаны два управляемых варианта этой схемы, разница между которыми заключается в используемых элементах («И-НЕ», микросхема CD4011, или «ИЛИ-НЕ», микросхема CD4001). Если просто объединить между собой входы у обоих элементов, то в сравнении со схемой рис. 11.9; 2 ничего не изменится – она будет работать точно так же. Нередко возникает потребность остановить генерацию на время и при этом обеспечить определенный логический уровень на выходе генератора. Эти задачи как раз и решаются с помощью дополнительных входов. Высокий уровень на входе «И-НЕ» и низкий на входе «ИЛИ-НЕ» являются разрешающими уровнями, следовательно, при этих уровнях на управляющих входах наша схема будет функционировать, как если бы входы элемента были объединены. При запрещающих же уровнях на входе уровень на выходе будет устанавливаться так, как если бы никаких RC-цепочек не существовало: на выходе схемы с использованием «И-НЕ» (CD4011) установится высокий уровень, на выходе схемы с использованием «ИЛИ-НЕ» (CD4001) – низкий уровень. Это позволяет тонко манипулировать уровнями в логических схемах, не привлекая дополнительных элементов.

Пример того, как можно использовать управляющие входы, приведен на рис. 11.10; 1. Это схема генератора прерывистых звуковых колебаний. Схема выдает сигнал около 500 Гц с периодом повторения около 0,5 с, если на управляющий вход (выв. 1) подать сигнал высокого уровня. Если нужна непрерывная работа, то управляющий вход объединяют со вторым входом того же элемента (выв. 2). В качестве источника звука здесь использован пьезоэлектрический звукоизлучатель (ЗИ), с ним схема может работать при напряжении питания от 5 до 12 В.

Однако если вам нужен более громкий звук, то к выходу можно подключить ключевой транзисторный усилитель (рис. 10.13; 2), управляющий обычным динамиком с сопротивлением 8–32 Ом. Если при этом динамик включать в качестве нагрузки прямо в коллектор транзистора (использовать разделительные конденсаторы в логических схемах неудобно), то важно обеспечить, чтобы в паузах через него не пошел постоянный ток, которого пьезоизлучатели не боятся. Здесь это обеспечивается тем, что при низком (запрещающем) сигнале на управляющем входе (выв. 9 микросхемы), а также в промежутках между звукоимпульсами 500 Гц на выходе (выв. 11) будет низкий уровень, который закроет усилительный транзистор.

Эксперимент 2. Лабораторный генератор синусоидальных колебаний на операционном усилителе

Схема, приведенная на рис. 11.10; 2, представляет собой генератор синусоидальных колебаний по схеме Вина–Робинсона. Конструкция, образованная конденсаторами C_1 , C_2 и резисторами R_1 – R_4 , носит название моста Вина. В ней важно, чтобы сопротивление верхних резисторов ($R_1 + R_2$) было равно сопротивлению нижних ($R_3 + R_4$), и емкости конденсаторов C_1 и C_2 также были равны – иначе расчет такой схемы представляет совершенно головоломную задачу. Поэтому переменный резистор, предназначенный для того, чтобы частоту можно было плавно регулировать, здесь установлен сдвоенный (R_2 и R_3) – при вращении движка составляющие его резисторы меняются одновременно. При указанных на схеме величинах сопротивлений и емкости минимальная частота получится около 30 Гц, а максимальная – около 1,5 кГц (о расчете частоты см. далее). Если же менять частоту не требуется, то вместо всей этой конструкции можно установить два постоянных резистора, сопротивления которых равны между собой и составляют $R_1 + R_2$ или $R_3 + R_4$.

Для того чтобы получить настоящее переменное напряжение, схему необходимо питать от двух разнополярных источников питания, симметричных относительно общего провода: $U_{\text{пит}+}$ и $U_{\text{пит}-}$. Оба напряжения питания могут составлять от 5 до 15 В по абсолютной величине, но обязательно должны быть равны друг другу, например +5 В и –5 В, или +12 В и –12 В, в противном случае у выходного переменного напряжения появится вредная постоянная составляющая. Максимальная амплитуда переменного напряжения для выбранного типа операционного усилителя $\mu A747$ будет примерно на 1 В меньше напряжения питания. Выходное напряжение может регулироваться от нуля до максимальной амплитуды с помощью переменного резистора R_7 .

Операционный усилитель (ОУ) $\mu A747$ представляет собой два идентичных ОУ в одном корпусе. Можно заменить его на любой сдвоенный ОУ

общего применения, только следите за диапазоном питания: многие современные типы ОУ не допускают питания выше +5 или ± 5 В. Второй операционный усилитель здесь просто повторяет сигнал, поступающий с потенциометра R_7 , и нужен только для согласования выходного сопротивления генератора (с учетом регулятора R_7) и сопротивления нагрузки (см. гл. 12; 6) – если ее подключать прямо к выходу генератора (выв. 12), то влияние нагрузки может ослабить сигнал или исказить его форму.

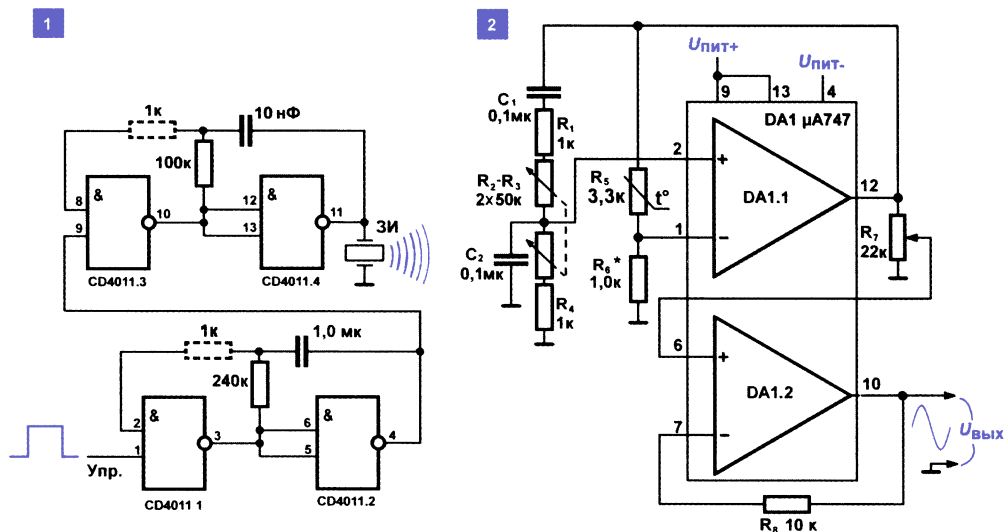


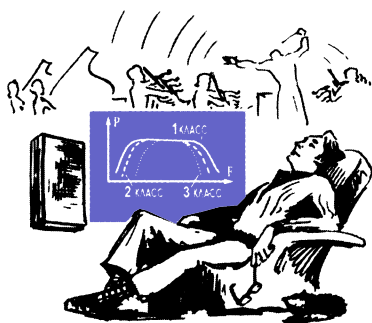
Рис. 11.10. Управляемый генератор и лабораторный генератор синусоидальных колебаний

В схеме есть одна необычная особенность. Для того чтобы генератор выдавал именно синусоидальные колебания, коэффициент усиления ОУ должен быть в этой схеме равен ровно 3 – если он меньше, то генератор просто не запустится, если больше – верхушки синусоид начнут обрезаться, и в пределе выходные колебания станут прямоугольными. Разумеется, подбором компонентов установить коэффициент усиления с нужной точностью невозможно. Поэтому применяют хитрый метод – в обратную связь ставят элемент, сопротивление которого зависит от среднего значения напряжения на нем. В нашем случае используется термистор (термозависимый резистор), у которого зависимость сопротивления от выделяющейся мощности имеет отрицательный наклон (R_5). В результате при увеличении амплитуды напряжения на выходе генератора сопротивление R_5 падает, и нужный коэффициент устанавливается автоматически. Термистор может быть любого типа, но не слишком большой по размерам, чтобы он разогревался малыми токами (например, бусиновый отечественный СТ1-19, СТ3-19 или импортный каплевидный B57861-S близкого номинала). Мож-

но использовать также миниатюрную лампочку накаливания (вроде СМ28-0.05) – только наклон зависимости у нее положительный, потому ее следует ставить вместо резистора R_6 , а R_5 тогда оставить постоянным.

Наладка будет заключаться в подборе сопротивления резистора R_6 под конкретный экземпляр термистора. Его нужно подобрать так, чтобы выходной сигнал на экране осциллографа был чисто синусоидальным, без искажений.

Частота на выходе будет определяться формулой $f = 1/(2\pi RC)$, где $R = R_1 + R_2 (= R_3 + R_4)$, а $C = C_1 = C_2$. Обратите внимание, что никакой особой подгонки по равенству номиналов резисторов и конденсаторов не требуется, схема будет работать при любых (в разумных пределах) соотношениях номиналов, и равенство здесь выбрано только из соображений удобства расчета. Чтобы расширить диапазон частот, придется поставить сдвоенный переключатель на несколько положений и изменять им емкости конденсаторов. Удобно, например, подобрать сопротивления сдвоенного переменного резистора $R_2 = R_3$ так, чтобы диапазон частот составлял 30–330 Гц, тогда, меняя с помощью переключателя емкости конденсаторов в десять раз (0,1 мкФ, 0,01 мкФ, 1 нФ), вы будете иметь перекрывающиеся диапазоны 30–330, 300–3300 и 3000–33 000 Гц.



ГЛАВА 12

Воспроизводится музыка

Примечание редактора. В этой главе автор рассказывает о принципах усиления звука в классических аналоговых усилителях. Следует отметить, что существенная доля звуковых усилителей в современных устройствах работает на принципиально иной основе – это так называемые усилители класса D. Метод усиления в классе D основан на т. н. ШИМ-модуляции достаточно высокой (десятки-сотни кГц) несущей частоты прямоугольной формы, из которой затем звуковые частоты выделяются с помощью простых пассивных фильтров (см. гл. 6; 17). Условное обозначение класса удачно совпало со словом digital – цифровой, так как в основном метод стал применяться для усиления звука в цифровой форме, хотя и был предложен гораздо раньше возникновения самой цифровой техники, еще в 1951 году. Так как все современные устройства для записи и хранения звука хранят его в цифровом виде, в таком же виде звук передается по кабелям и радиоканалам, то усиливать его в виде импульсов гораздо удобнее и дешевле, чем подвергать дорогостоящему высокоточному цифроаналоговому преобразованию малый сигнал, а затем усиливать его традиционными способами. Подробнее об основах работы усилителей различных классов и их разновидностей можно прочесть в статье Википедии «Классификация электронных усилителей».

Однако это не значит, что традиционные аналоговые усилители сошли со сцены и больше не применяются. У класса D есть несколько неоспоримых преимуществ – высочайший КПД, недостижимый традиционными способами (90 % и более), и относительная простота схемотехнических решений; но, конечно, есть и недостатки. Самый главный из них в том, что достигнуть достаточно высокого качества звучания здесь ничуть не проще, чем в традиционных схемах, а в некоторых отношениях даже сложнее. Поэтому цена качественных усилителей класса D оказывается не меньшей, чем у обычных. Большинство качественных звуковых усилителей мощности по-прежнему строятся по классическим схемам (несложно найти в продаже даже вполне современные модели на основе электронных ламп!), в основе которых лежат описываемые автором классы A, B и AB.

Надо еще учесть, что в этой главе автор намеренно упрощает картину звукового тракта, описывая лишь оконечные звуковые усилители (усилители мощности НЧ). Кроме них, и в старых звуковоспроизводящих устройствах (виниловых проигрывателях, магнитофонах), и в новых (CD-проигрывателях, mp3-плеерах и т. п.) имеются предварительные усилители, которые доводят уровень сигнала до необходимых кондиций для подачи на вход усилителя НЧ (не путать с каскадами предварительного усиления в самих усилителях НЧ!). Подобные предварительные усилители часто входят также в состав микрофонов; для каждого источника звука они, естественно, имеют свою специфику.

1. Электроника помогла сделать доступными для миллионов людей бесценные сокровища музыки. Нет числа тем благам, которые принесла человеку радиоэлектроника. Она открыла нам новые возможности понимания мира, покорения природы. Компьютеры, цветное телевидение, промышленные роботы, интернет, мобильная связь, регистрация электрических сигналов сердца и мозга...

Есть в этом гигантском списке скромная строка, за которой стоит, быть может, больше человеческой радости, чем за любой другой, – электроника сделала для нас более доступным продукт особого рода – музыку. Стремление к музыке, ощущение гармонии и ритмов заложено в самой человеческой природе. С ними так или иначе связаны многие прекрасные человеческие качества, связано непонятное пока Нечто, которое делает человека Человеком.

Убежденно и страстно сказал об этом великий Шекспир:

Тот, у кого нет музыки в душе,
Кого не тронут сладкие созвучья,
Способен на грабеж, измену, хитрость.
Темны, как ночь, души его движенья,
И чувства все угрюмы, как Эреб...
Не верь такому.

Музыка – величайшее духовное богатство цивилизации. И справедливо-му распределению этого богатства, приобщению многих миллионов людей к сокровищам музыки помогает электроника. Это она приносит в наш дом тревожные бетховенские аккорды, сложную гармонию голосов народных песен, неповторимость хриплого армстронговского баса, прозрачные мелодии Моцарта, глубокие раздумья Сергея Прокофьева. Электроника приносит в наш дом Музыку. Если, конечно, звуковоспроизводящие аппараты – автомобильные приемники и музыкальные центры, карманные плееры и домашние кинотеатры – воспроизводят музыку так, что она остается музыкой.

2. Важнейшие характеристики усилителя НЧ – номинальная мощность, коэффициент нелинейных искажений, диапазон частот, входное и выходное сопротивления, уровень шумов, потребляемая мощность. Ламповые и транзисторные усилители, которые работают в звуковоспроизводящих установках, называют усилителями низкой (звуковой) частоты, или, сокращенно, усилителями НЧ. Частоты электрических сигналов, которые должен усиливать такой усилитель, – это частоты звуков, скажем, от 15–20 Гц до 15–20 кГц. В сравнении с тем, что достается другим усилителям, это действительно низкие частоты, в FM-приемнике или в телевизоре, например, приходится усиливать сигналы, частота которых

измеряется десятками и сотнями мегагерц, а в сотовой связи – гигагерцами.

Усилитель НЧ – важнейший элемент звуковоспроизводящего комплекса (рис. 12.1; 1), от него в огромной степени зависят и громкость звука, и качество звучания. Что касается громкости, то здесь, пожалуй, усилитель – даже главное действующее лицо. Потому что именно с него электрический сигнал поступает на громкоговоритель, и от мощности этого сигнала зависит, насколько громким будет звук. Если, конечно, все дело не испортит сам громкоговоритель, если он сможет превратить в неискаженный звук столько электрических ватт, сколько ему даст усилитель. Что же касается искажений сигнала, то здесь усилитель НЧ входит в звуковоспроизводящий комплекс на равных со всеми другими его элементами. Потому что искажения, грубо говоря, суммируются, и каждый из участков тракта «звук – ток – звук» вносит свою лепту в суммарные искажения звука, в то, что мы в конце концов слышим. Именно поэтому всеми силами стараются уменьшить искажения на всех участках звуковоспроизводящего тракта – в микрофонах, устройствах звукозаписи, в громкоговорителях. И конечно же, в усилителях НЧ (рис. 8.7; 6, 7).

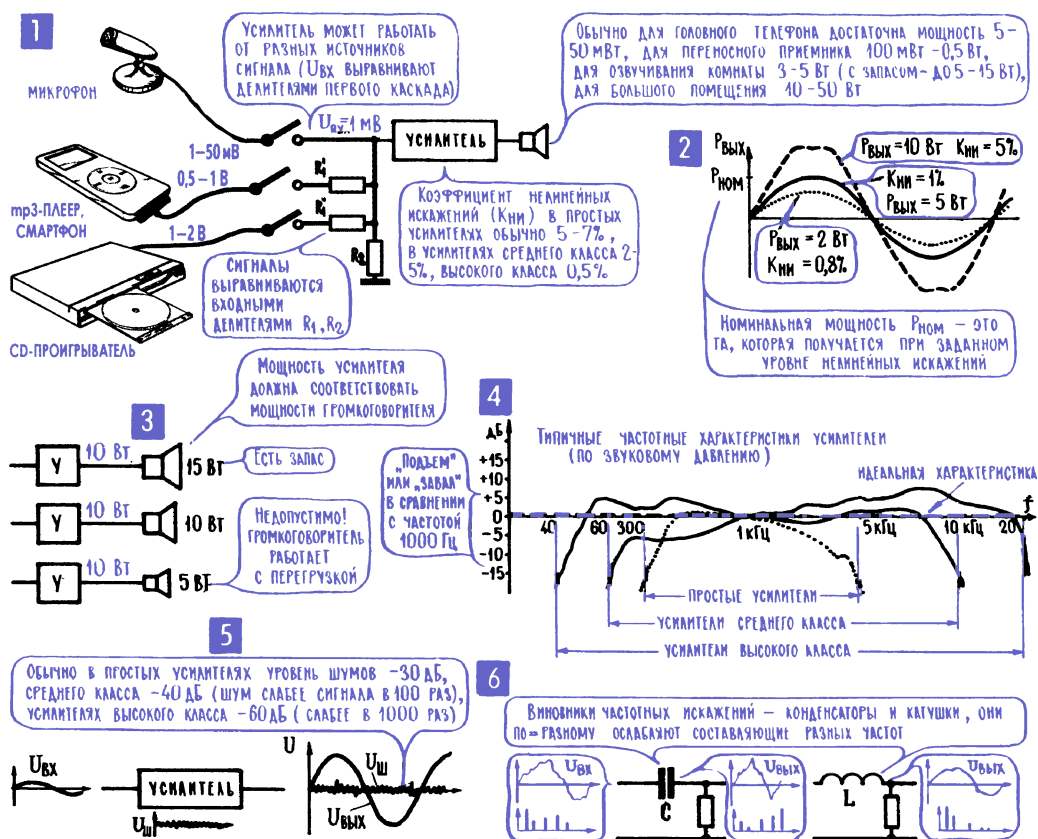


Рис. 12.1. Усилитель НЧ

Одна из самых важных характеристик усилителя – его номинальная мощность $P_{\text{ном}}$ (рис. 12.1; 2). Это та наибольшая мощность электрического сигнала на выходе усилителя (то есть на входе громкоговорителя), при которой нелинейные искажения в самом усилителе еще не превышают объявленной для него величины. Отсюда следует, что вторая важная характеристика усилителя – это коэффициент нелинейных искажений $K_{\text{ни}}$, который соответствует номинальной мощности $P_{\text{ном}}$. В принципе, усилитель может развить и большую мощность, чем $P_{\text{ном}}$, но при этом коэффициент нелинейных искажений $K_{\text{ни}}$ будет больше, чем указано (рис. 12.1; 2). И наоборот, коэффициент нелинейных искажений может оказаться меньше объявленной величины, но уже при мощности меньшей, чем $P_{\text{ном}}$.

Вопрос о том, какую мощность должен давать усилитель, не так-то прост, по этому поводу можно услышать самые разные мнения, по-разному обоснованные. Но опыт подсказывает такие, например, цифры. Карманный приемник мы слышим на небольшом расстоянии (а если вокруг тихо, то и на большом) при мощности усилителя около 100 мВт¹, а настольные приемники с выходной мощностью около 0,5 Вт звучат уже вполне громко. Для сравнительно небольшого помещения обычно хватает мощности 1–3 Вт. Столько же должны давать звуковоспроизводящие установки в автомобиле, чтобы перекрыть шум двигателя и дороги. Для домашних условий вполне хватит мощности 5–8 Вт, а если усилитель дает 10–15 Вт, то можно считать, что есть уже запас выходной мощности. Для большого помещения, такого как школьный зал, нужны мощности побольше, скажем 20 или даже 50 Вт². Одно можно сказать уверенно – усилитель не должен давать громкоговорителю больше, чем тот способен без искажений превратить в звук (рис. 12.1; 3). То есть номинальная мощность усилителя и громкоговорителя должна быть одинаковой. Лучше даже, чтобы у громкоговорителя или колонок был некоторый запас, чтобы их номинальная мощность была несколько больше, чем мощность усилителя.

Коэффициент нелинейных искажений $K_{\text{ни}}$ усилителя определяется точно так же, как $K_{\text{ни}}$ громкоговорителя (гл. 8; 12), – это соотношение мощности новых составляющих, в частности гармоник, и мощности основного сигнала. Разница лишь в том, что для громкоговорителя $K_{\text{ни}}$ определяется по новым составляющим звукового сигнала, а для усилителя – по новым составляющим электрического сигнала. Они, в частности, появляются, если сигнал выходит за пределы линейного участка вольт-амперной характеристики какого-либо из транзисторов.

¹ Для карманной аппаратуры с наушниками нормальная мощность может быть еще меньше, и при нормальном уровне звукового давления в 90 дБ часто не превышает 30–50 мВт.

² Приводимые автором цифры вполне соответствуют действительности. Мощности в 50–80 Вт и более, характерные для современных домашних музыкальных центров и автомобильной акустики, предназначены не для того, чтобы оглушать соседей: просто, как и говорит автор, чем больше запас по мощности, тем выше качество звука. Во времена издания книги был принят запас по мощности в 1,5–2 раза, сейчас он обычно 8–10-кратный.

Снизить нелинейные искажения в усилителе не всегда просто, за это приходится платить схемными сложностями и ограничениями. В усилителях среднего класса $K_{\text{ни}}$ снижают до 2–5 %, в высококачественных усилителях – до 1–2 и даже до десятых долей процента. На первый взгляд это может показаться излишеством: наше ухо замечает нелинейные искажения при $K_{\text{ни}}$ более 5–7 %. Но ведь нужно учитывать, что к искажениям в усилителе обязательно добавится еще и несколько процентов искажений в громкоговорителе, а кроме того, микрофон, магнитофон или устройство грамзаписи тоже «не дремлет», они, к сожалению, тоже кое-что вносят в суммарные нелинейные искажения звуковоспроизводящего тракта (рис. 8.7).

Усилитель может вносить также и частотные искажения, не в одинаковой мере усиливать сигналы разных частот (рис. 12.1; 4). Даже не вдаваясь в подробности, можно увидеть виновников частотных искажений в усилителях НЧ – это реактивные элементы, главным образом конденсаторы, которые оказывают разное сопротивление переменным токам разных частот. Здесь, наверное, уместно напомнить, что вся электротехника переменного тока, с которой нас познакомила глава шестая, действительна лишь для синусоидальных токов и напряжений. В частности, только для них по простым формулам подсчитываются индуктивное и емкостное сопротивления x_L и x_C . Реальный же звуковой сигнал – это сигнал сложной формы, его приходится представлять целой суммой синусоидальных составляющих, спектром (гл. 7; 13). И если какой-либо конденсатор в усилителе НЧ, как ему и следует, пропускает высокочастотные синусоидальные составляющие сложного сигнала лучше, чем низкочастотные, то этот конденсатор нарушает пропорцию между составляющими спектра, искажает форму сигнала. Так же, как и громкоговоритель с плохой частотной характеристикой (рис. 12.1; 6).

О том, как ведет себя усилитель НЧ на разных частотах, говорит его частотная характеристика – зависимость напряжения на выходе усилителя от частоты, при условии что на всех частотах на вход усилителя подается одинаковое напряжение. Если усилитель не вносит частотных искажений, то его частотная характеристика – прямая линия. Для тех частот, которые усиливаются лучше, частотная характеристика несколько приподнята; для тех, что хуже, – опущена, завалена. Подъем либо завал частотной характеристики принято указывать в децибелах, от которых, если нужно, легко перейти к вольтам, амперам или ваттам (гл. 6; 20). Рабочий частотный диапазон усилителя определяют наибольшая $F_{\text{макс}}$ и наименьшая $F_{\text{мин}}$ частоты, для которых усиление отличается от усиления на средней частоте 1000 Гц на заданную величину, обычно на 3 дБ. При этом выходное напряжение на граничных частотах отличается от среднего примерно на 30 %, а выходная мощность – в два раза.

Создать усилитель с равномерной частотной характеристикой, особенно в области самых низших частот, не так-то просто. Поэтому в простых

и недорогих усилителях мирятся с диапазоном воспроизводимых частот примерно от 150 Гц до 6–8 кГц, в усилителях среднего класса – от 60–80 Гц до 10–12 кГц, в усилителях высшего класса – от 20–40 Гц до 16–20 кГц. Однако же расширение диапазона воспроизводимых частот в усилителе имеет смысл только в том случае, если весь этот диапазон может воспроизвести громкоговоритель и если сам воспроизводимый сигнал имеет широкий диапазон составляющих. Так, например, для воспроизведения речи вполне хватает диапазона от 100 до 5000 Гц³. На старых пластинках тоже больше 5–6 кГц и меньше 80–100 Гц не записывали. А вот звуки оркестра при передаче с частотной модуляцией на УКВ (по-современному, в FM-диапазоне) или качественные цифровые записи в формате DVD-Audio могут иметь весь спектр звуковых частот.

Весьма важная характеристика усилителя – уровень его собственных шумов (рис. 12.1; 5). Часто к шумам относят всю «грязь», все виды непрошенных сигналов, которые тем или иным путем попадают на вход усилителя и шумят, гудят, шипят, ноют (особенно когда не слышно сигнала), хотя и не очень громко, но очень однообразно и противно. Основные причины этого вида помех – собственные шумы первого транзистора, которые затем усиливаются (шумят все транзисторы, но наиболее опасен первый, его шумовое напряжение усиливается всеми последующими каскадами), а также наводки сетевого напряжения, слабые сигналы с частотой 50 Гц. Они наводятся во входных цепях усилителя, подобно тому, как это происходит в приемных антеннах радиоустройств, например электромагнитными полями сетевой проводки. Чтобы оценить уровень шумов (фона), его сравнивают с номинальной мощностью усилителя, и результат указывают в децибелах. Так, например, если напряжение шумов на выходе в сто раз меньше, чем напряжение самого сигнала при номинальной мощности $P_{\text{ном}}$, то говорят, что уровень шумов –40 дБ. В усилителях высшего класса удается снизить уровень шумов до –60 дБ или в крайнем случае до –50 дБ, хотя борьба с шумами и наводками – дело не всегда простое и легкое⁴.

Максимальная мощность усилителя и уровень шумов вместе определяют еще одну характеристику звуковоспроизводящей установки – ее динамический диапазон: отношение самого громкого звука к самому тихому. Музыка, звучащая в концертном зале, может иметь динамический диапазон 60–70 дБ – от едва слышного пиано-пианиссимо до гроыхающего форте-фортиссимо большого симфонического оркестра. Динамический диапазон голоса примерно 30–35 дБ от шепота до крика. При радиопере-

³ В реальности даже меньше: обычный телефон или диктофон имеет частотный диапазон примерно от 300 до 3500 Гц.

⁴ В настоящее время одним из главных источников шумов и наводок из-за электромагнитных помех в домашних условиях является бытовая техника. Для подобных технических средств даже введен специальный стандарт по электромагнитной совместимости, при несоответствии ему такую технику просто не пускают на рынок.

даче и записи звука на пластинку динамический диапазон искусственно сжимают, обычно до 35–40 дБ.

Характеристика усилителя «потребляемая мощность» – это произведение напряжения источника питания на ток, который от него потребляется. Конечно, желательно, чтобы потребляемая мощность была как можно меньше, особенно в аппаратуре, которая питается от батарей.

Необходимость таких характеристик, как входное сопротивление усилителя и его выходное сопротивление, связана с тем, что усилитель необходимо согласовать с источником сигнала и с нагрузкой, так же как необходимо согласовывать между собой отдельные усилительные каскады в многокаскадном усилителе.

3. В усилителе НЧ, как правило, несколько каскадов – каскады предварительного усиления и выходной каскад, усилитель мощности. Усилительные способности транзистора ограничены, он обычно может повысить мощность сигнала в десять, в сто, в лучшем случае в тысячу раз⁵. А бывает, что нужно увеличить ее в сотни, тысяч, миллионы и даже миллиарды раз. Вот почему электронные усилители, как правило, оказываются многокаскадными. Если один каскад усиливает мощность сигнала в сто раз, передает сигнал на второй каскад и тот усиливает мощность еще в сто раз, затем такое же усиление дает третий каскад, то в итоге получается, что сигнал усилился в миллион раз ($100 \cdot 100 \cdot 100 = 1\,000\,000$). Последний каскад усилителя НЧ, тот, что работает прямо на громкоговоритель, называют оконечным, выходным каскадом, или усилителем мощности. А все остальные – это каскады предварительного усиления, первый (входной), второй, третий, иногда еще четвертый, пятый и даже шестой – все зависит от того, сколько милливатт или микроватт дает источник сигнала, какую мощность потребует входная цепь последнего каскада и какое усиление дает каждый предварительный каскад.

4. Только от соотношения сопротивлений генератора и нагрузки зависит эффективность передачи тока, напряжения, мощности. Прежде чем говорить о межкаскадных связях в усилителях, о связи выходного каскада с громкоговорителем и входного каскада с источником сигнала, вернемся к самой простой электрической цепи, в которую входит один генератор постоянного тока с внутренним сопротивлением R_r и одна нагрузка с сопротивлением R_n (гл. 3; 4, рис. 4.9 и 12.2; 1). Ток I_n в этой цепи, напряжение U_n на нагрузке и

⁵ Интересно, что пришедшие на смену дискретным транзисторам интегральные операционные усилители (УИТ, см. раздел 11 далее), на которых сейчас обычно выполняются предварительные каскады усилителей НЧ, позволяют без искажений усилить сигнал примерно в такой же степени, не более того. Это лишняя иллюстрация к причинам, по которым звуковые усилители остаются, вероятно, самой консервативной областью электронной техники – прогресс здесь может повышать удобства проектирования, снабжать устройства привлекательными с точки зрения маркетинга свойствами (вроде шестиканального звучания), снижать стоимость производства, но серьезное увеличение качества воспроизведения стоит таких же усилий, как и полвека назад.

мощность P_H , которую она получит от генератора, зависят не только от его электродвижущей силы E_r , но еще и от соотношения между R_r и R_H . Типичный график рис. 12.2; 2 показывает, как меняются I_H , U_H и P_H при изменении нагрузки R_H . Все эти изменения легко объяснимы.

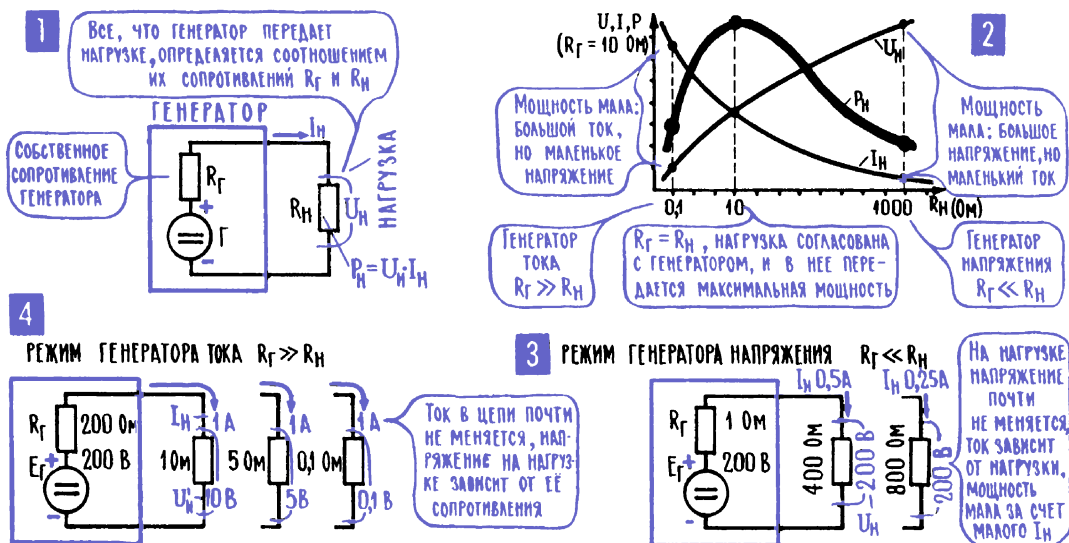


Рис. 12.2. Взаимодействие генератора и нагрузки

С увеличением R_H ток в цепи уменьшается, потому что растет общее сопротивление цепи $R_{\text{общ}} = R_r + R_H$. С увеличением R_H напряжение U_H растет, потому что R_r и R_H образуют делитель напряжения, делят между собой ЭДС генератора. И чем больше сопротивление участка R_H этого делителя, тем большая часть ЭДС ему достается. Ну а мощность P_H – это произведение тока на напряжение. Сначала с увеличением R_H мощность возрастает, потому что ток уменьшается в меньшей степени, чем растет напряжение U_H . А затем, после некоторой оптимальной (самой выгодной) величины $R_{H \text{ опт}}$, мощность начинает падать, поскольку ток I_H уменьшается быстрее, чем увеличивается напряжение U_H .

Объяснимо также и то, что при разных соотношениях R_r и R_H сопротивление нагрузки R_H по-разному влияет на ток и на напряжение U_H . Когда R_H мало по сравнению с R_r , то удельный вес нагрузки в общем сопротивлении цепи невелик и увеличение R_H не очень-то сильно влияет на ток I_H . А при большом R_H в основном оно определяет общее сопротивление, а следовательно, и ток в цепи.

Теперь о напряжении U_H . Увеличивая R_H , мы сразу по двум каналам влияем на это напряжение. Во-первых, U_H возрастает за счет увеличения I_H , так как $U_H = I_H \cdot R_H$. Во-вторых, U_H уменьшается за счет уменьшения I_H , и опять-таки потому, что $U_H = I_H \cdot R_H$. При малых R_H ток, как было отмечено несколькими строчками выше, меняется мало, и поэтому напряжение U_H

довольно резко растет. А вот при больших R_n , из-за его сильного влияния на ток, напряжение уже увеличивается незначительно.

Вся это арифметика очень простая. И убедительная. Точно так же можно пояснить, почему в пустом ведре каждая капля на виду, а в полном и лишний стакан не очень-то заметен. Или почему один свободный день в конце каникул имеет совсем иную ценность, чем в начале.

5. «Генератор тока» и «генератор напряжения»⁶ – два разных режима передачи энергии от генератора к нагрузке. Из всех возможных соотношений между сопротивлением генератора и нагрузки можно выделить два типичных случая.

Случай первый: сопротивление генератора R_r во много раз меньше, чем сопротивление нагрузки R_n . Такой генератор называют генератором напряжения, отмечая этим, что почти вся ЭДС приложена к нагрузке и что при изменении нагрузки напряжение на ней почти не меняется (рис. 12.2; 3). Для иллюстрации – числовой пример.

Предположим, что $E_r = 200$ В, $R_r = 1$ Ом и $R_n = 200$ Ом. На внутреннем сопротивлении генератора остается около 1 В, нагрузке достается примерно 199 В. Увеличим R_n до 400 Ом, на нагрузке, несмотря на это, останется примерно такое же напряжение, какое было, – около 199,5 В; на внутреннем сопротивлении генератора остается около 0,5 В. Если уменьшить R_n до 100 Ом, то на нем все равно будет около 198 В, на R_r потеряется около 2 В.

Во втором типичном случае сопротивление генератора R_r во много раз больше, чем сопротивление нагрузки R_n . Это режим генератора тока, он назван так потому, что ток в цепи почти не меняется при изменении нагрузки (рис. 12.2; 4).

Числовой пример: ЭДС генератора $E_r = 200$ В, $R_r = 200$ Ом. $R_n = 1$ Ом; легко подсчитать, что ток в цепи – около 1 А и что он примерно таким и останется, если увеличить или уменьшить R_n в несколько раз.

Оба этих режима имеют свои достоинства и недостатки, оба находят применение, однако генератор напряжения встречается несравнимо чаще. В режиме генератора напряжения работает электрическая сеть (внутреннее сопротивление измеряется десятками и сотыми долями ома), автомобильный аккумулятор (внутреннее сопротивление – тысячные доли ома), батарейка карманного фонарика (внутреннее сопротивление – около ома, у старой батарейки несколько ом).

6. Режим оптимального согласования: сопротивление нагрузки равно внутреннему сопротивлению генератора, в нагрузку передается максимальная мощность. В усилителях НЧ, особенно в выходных каскадах, работающих на громкоговоритель, иногда используется режим

⁶ В электротехнике приняты термины «источник тока» и «источник напряжения».

оптимального (наилучшего) согласования, оптимальной нагрузки. Его главная примета – сопротивление нагрузки R_n равно сопротивлению генератора R_r . В этом случае генератор отдает в нагрузку наибольшую мощность, какую вообще может ей отдать (рис. 12.2; 2). Но чаще согласование осуществляют, исходя из допустимых параметров токов и напряжений.

Примечание редактора. Из графика на рис. 12.2; 2 можно сделать ошибочный вывод, что оптимальный режим передачи мощности от источника к нагрузке при равенстве их сопротивлений всегда лучше любого другого. В действительности это верно лишь для определенных случаев схем с высоким выходным сопротивлением (см. далее этот раздел и разделы 7, 8), а также для схем, работающих на радиочастотах (по причинам, не имеющим отношения к данному случаю). Не зря автор делает оговорки, что режим *«иногда используется»*, что *«чаще согласование осуществляют, исходя из допустимых параметров токов и напряжений»*. Для оптимальной передачи мощности куда выгоднее максимально снижать сопротивление источника (генератора), то есть подгонять схему как можно ближе к режиму источника напряжения («генератора напряжения»), так как в источнике напряжения $R_r = 0$ и на нем ничего не теряется вовсе, вся мощность выделяется в нагрузке. Именно так поступают и в случае источников питания (см. последний абзац предыдущего раздела) и в случае усилителей мощности НЧ, обычно снабженных выходным эмиттерным повторителем (см. раздел 12 и далее в этой главе).

Проблема согласования генератора с нагрузкой, источника энергии с ее потребителем, имеет весьма общий, если хотите – даже философский, смысл. Это можно подтвердить примерами из самых разных областей. Можно, например, вспомнить, что мощность, которую развивает автомобильный двигатель, используется тем лучше, чем больший груз везет машина. Но перегружать автомобиль бессмысленно, генератор должен работать на свою оптимальную нагрузку. Можно вспомнить и о том, что польза, которую приносит человек-работник, зависит не только от его сил, способностей и энергии, но еще и от работы. Слишком легкое дело и делать неинтересно, и проявить себя на нем не всегда удается. Но вряд ли можно принести пользу, взвалив на себя работу не по плечу, взявшись за дело, в котором ничего не понимаешь и делать его не умеешь. Человек должен работать на свою оптимальную нагрузку, должен быть наилучшим образом согласован со своей работой.

Легко произнести слова «Добьемся согласования!», но не всегда легко его добиться. В частности, серьезные трудности появляются в усилителях, где на каждом шагу приходится состыковывать низкоомную (обладающую малым сопротивлением) нагрузку с высокоомным генератором. Так, например, громкоговоритель (нагрузка) с сопротивлением звуковой катушки в несколько ом нужно согласовать с транзистором (генератор), выходное сопротивление которого измеряется килоомами или десятками

килоомов. Те же несколько килоомов имеет входное сопротивление каждого последующего каскада (нагрузка), и его нужно согласовать с коллекторной цепью предыдущего каскада (генератор), которое, как отмечалось, составляет десятки или сотни килоомов.

Пытаясь побыстрее добраться до места назначения, шофер иногда, скажем на ровном пустом шоссе, просто увеличивает скорость. А иногда, например на забитых машинами улицах города, наоборот, едет помедленнее, поаккуратнее, главным образом старается не попасть в затор. Вот так и для достижения одной и той же цели – получения наибольшей выходной мощности транзисторного усилителя – иногда обращают внимание на одни особенности режима, иногда – на другие. На жаргоне ученых и инженеров об этом говорят, например, так: «Подумайте о мощности в терминах согласования сопротивлений». Или так: «Подумайте о мощности в терминах использования транзисторов по току».

Кстати, эти два примера, два жаргонных выражения, относятся к двум типичным стратегиям согласования транзисторов с громкоговорителем.

Начнем со второго случая. Предположим, что в выходном каскаде работают мощные транзисторы, коллекторный ток в них может достигать 2 А, и, значит, амплитуда его переменной составляющей – 1 А (здесь и дальше все цифры условные). А на коллектор (в отсутствие сигнала) попадает напряжение 10 В, и, значит, амплитуда переменной составляющей напряжения на нагрузке не может быть больше 10 В, иначе в какие-то моменты напряжения на коллекторе вообще не будет. И еще одно предположение: сопротивление нагрузки равно 20 Ом. Закон Ома напоминает: $U_n = I_n \cdot R_n$; $I_n = U_n / R_n$, то есть чтобы на сопротивлении 20 Ом напряжение было 10 В, нужен ток 0,5 А. Что отсюда следует? А то, что мы не сможем полностью использовать транзистор по току: на вход его придется подать сигнал послабее, чтобы переменная составляющая коллекторного тока не превышала 0,5 А ($0,5 \text{ А} \cdot 20 \text{ Ом} = 10 \text{ В}$), в то время как она могла бы быть 1 А. И в итоге транзистор отдаст в четыре раза меньшую мощность ($P = I^2 \cdot R$), чем мог бы.

Есть ли из этого какой-нибудь выход? Есть, и даже два. Во-первых, можно (если можно!) в два раза поднять питающее напряжение (до 20 В), при этом «потолок» переменного напряжения на нагрузке тоже возрастет вдвое и можно будет спокойно увеличить ток. А вот другой выход: можно в два раза уменьшить сопротивление нагрузки, до 10 Ом, «потолок» переменного напряжения на ней получится при вдвое большем токе, то есть при нашем предельном токе 1 А ($1 \text{ А} \cdot 10 \text{ Ом} = 10 \text{ В}$).

Этим вторым методом пользуются весьма часто: обычно в выходном каскаде стоят транзисторы с запасом мощности, и от них получают нужное число ватт, подбирая сопротивление нагрузки, например группируя тем или иным способом громкоговорители (рис. 8.9). К таким же выводам

мы пришли бы, если бы рассматривали все это в «терминах согласования сопротивлений», просто оценка напряжений и токов в транзисторе оказалась в данном случае проще и удобнее.

В некоторых случаях, чтобы не усложнять схему, приходится мириться с плохим согласованием. Из-за этого, например, при передаче сигнала из каскада в каскад нередко теряется часть той мощной копии, которую создал усилитель. В других же случаях, когда с потерями не хотят или не могут мириться, разными схемными ухищрениями меняют входные и выходные сопротивления усилительных каскадов. Или пользуются таким эффективным средством согласования, как трансформатор.

Примечание редактора. Согласование с помощью трансформатора на практике абсолютно необходимо лишь для схем на электронных лампах – там напряжение велико, а токи малы, потому при прямом подключении запросто можно сжечь либо низкоомный динамик, либо выходной усилительный каскад. В транзисторных схемах проще поставить лишний согласующий каскад усиления (см. далее), чем возиться с трансформаторами – хотя в первых транзисторных конструкциях 1950–1960-х годов разработчики применяли согласующие трансформаторы еще довольно часто.

7. При трансформаторном включении нагрузки в цепи генератора действует вносимое сопротивление, которое может быть больше или меньше, чем сопротивление самой нагрузки. Вспомните, как работает трансформатор (гл. 6; 25): переменное напряжение U_1 , подведенное к первичной обмотке I, создает в ней переменный ток I_1 ; он наводит переменное напряжение U_2 и создает ток I_2 во вторичной обмотке II (рис. 12.3). Но на этом дело еще не кончается: ток I_1 сам создает переменное магнитное поле и наводит ток I'_1 в первичной обмотке. Если, вернувшись к старому нашему методу мысленных экспериментов, снять с трансформатора вторичную обмотку, а первичную подключить к генератору, то ток в этой одинокой первичной обмотке будет сравнительно небольшим, он определится лишь в основном индуктивным сопротивлением x_L . А если вернуть на место вторичную обмотку и подключить к ней нагрузку, ток в первичной обмотке резко увеличится. Это как раз и начнет работать ток I_1 – он начнет наводить ток I'_1 в первичной обмотке. Тот факт, что к первичной обмотке трансформатора подведено напряжение U_1 и в ней течет ток I_1 , означает, что в этой обмотке имеется какое-то сопротивление, устанавливающее связь между током и напряжением ($R = U / I$; гл. 4; 3). А поскольку сам ток I'_1 как бы вносится в первичную обмотку из вторичной обмотки, то и сопротивление $R = U \cdot I_1$ называют вносимым сопротивлением $R_{\text{вн}}$.

От чего же оно зависит, это вносимое сопротивление $R_{\text{вн}}$, которого вроде как бы нет, но которое все-таки существует как некий коэффициент, отображающий связь между током и напряжением?

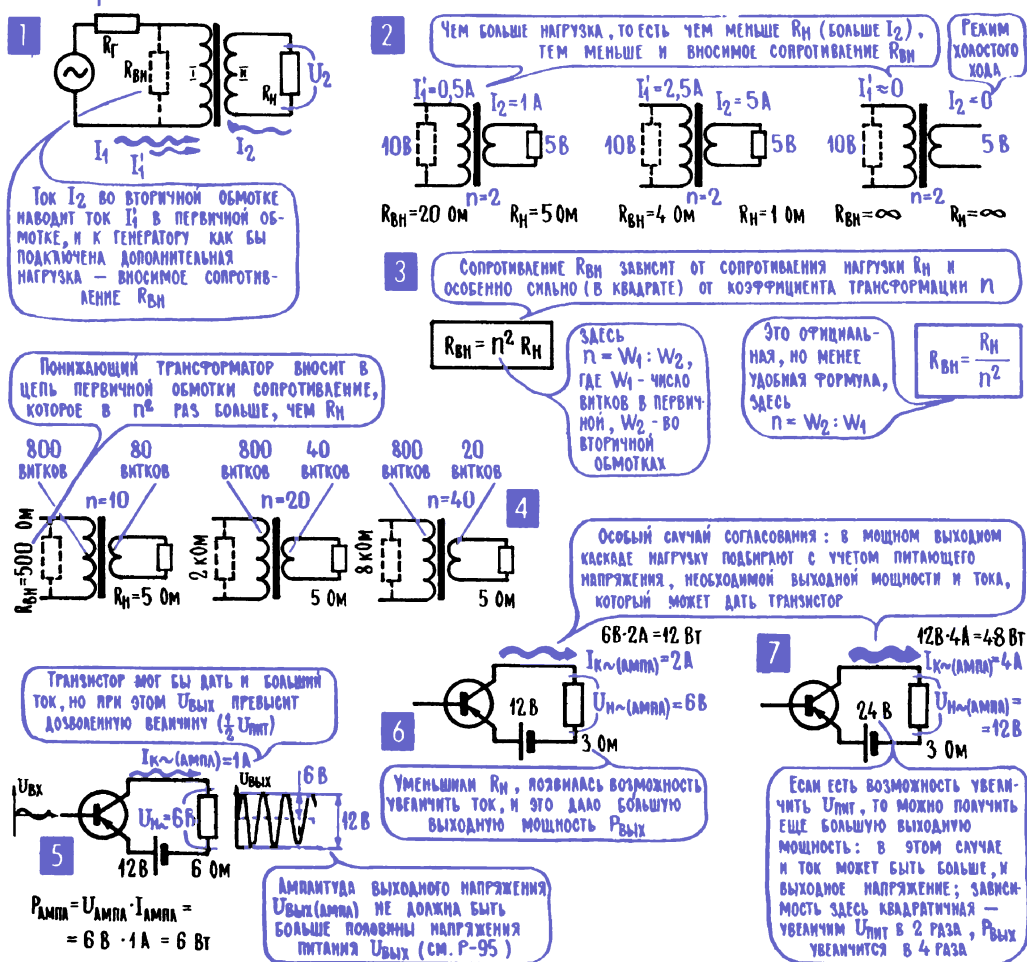


Рис. 12.3. Согласование с помощью трансформаторов

Попробуем увеличить нагрузку, предварительно пояснив, что именно нужно понимать под этими словами. Выражение «нагрузка увеличилась» имеет смысл «больше нагружен генератор», или, точнее, «больше ток, потребляемый от генератора». А значит, выражение «нагрузка увеличилась» означает «меньше стало сопротивление R_H ».

Итак, мы уменьшаем R_H , увеличиваем тем самым ток I_2 во вторичной обмотке. И тут же увеличится наведенный в первичную обмотку ток I_1' . А это значит, что сопротивление $R_{вн}$ зависит от сопротивления нагрузки R_H (рис. 12.3; 2, 3) — чем меньше R_H , тем меньше и вносимое сопротивление $R_{вн}$. В предельном случае, когда R_H бесконечно велико (цепь вторичной обмотки не замкнута, холостой ход), $R_{вн}$ тоже бесконечно велико, то есть, проще говоря, его нет.

Но величина вносимого сопротивления зависит не только от R_H , она еще зависит от коэффициента трансформации n , от соотношения числа вит-

ков в первичной и вторичной обмотках (рис. 12.3; 4, 5, 6). Причем зависит очень сильно – коэффициент трансформации дважды влияет на величину $R_{\text{вн}}$. Первый раз, когда из первичной обмотки во вторичную наводится ток I_1 , и второй раз, когда обратно из вторичной обмотки в первичную наводится ток I_1' . Поэтому $R_{\text{вн}}$ зависит от квадрата коэффициента трансформации n : увеличьте его в два раза, и вносимое сопротивление возрастет в четыре, увеличьте n в 5 раз, и $R_{\text{вн}}$ возрастет в 25 раз (рис. 12.3; 4).

И еще, повышающий трансформатор как бы понижает сопротивление нагрузки при пересчете его в первичную цепь, а понижающий трансформатор, наоборот, увеличивает $R_{\text{вн}}$ по сравнению с $R_{\text{н}}$. Это настолько важный вывод, что изложим его еще раз несколько иными словами: если на пути от генератора к нагрузке напряжение понижается, то есть если нагрузка включена через понижающий трансформатор, то $R_{\text{вн}}$ будет больше, чем $R_{\text{н}}$. А если трансформатор повышающий, то $R_{\text{вн}}$ меньше, чем $R_{\text{н}}$. И наконец, если коэффициент трансформации равен единице, то $R_{\text{вн}}$ будет таким же, как и $R_{\text{н}}$.

Как видите, трансформатор открывает большие возможности для согласования генератора с нагрузкой – достаточно подобрать коэффициент трансформации, и в цепь генератора фактически будет включено такое вносимое сопротивление, какое требуется для оптимального согласования. А теперь настал момент рассказать о том, как добиваются согласования, не приспособлявая то, что есть, к тому, что есть, а активно изменяя неизменяемые, казалось бы, характеристики – входное и выходное сопротивления транзистора.

8. У схем с общим эмиттером (ОЭ), с общей базой (ОБ) и общим коллектором (ОК) сильно различаются входные и выходные сопротивления и основные усилительные характеристики. Рассказ этот можно было бы озаглавить « $2 + 2 = 3$ ». Такое странное равенство должно привлечь внимание к задаче, которую приходится решать при включении транзистора или лампы в усилительный каскад. Дело в том, что у транзистора всего три вывода – эмиттер, база, коллектор (у лампы, соответственно, катод, сетка, анод), а подключить к нему нужно четыре провода: два от источника сигнала, например от микрофона, и два от нагрузки, например от громкоговорителя (рис. 12.4; 1).

Подключить четыре провода к трем ($2 + 2 = 3$) можно только так: один из выводов транзистора должен быть общим и для входной цепи, и для выходной, то есть и для источника сигнала, и для нагрузки. В принципе, общим может быть любой из выводов, а значит, возможны три разные схемы – с общим эмиттером (ОЭ), с общей базой (ОБ) и с общим коллектором (ОК). В ламповых усилителях это, соответственно, схемы с общим катодом, общей сеткой и общим анодом. На рис. 12.4; 1, 2, 3, 4 вы видите схемы ОЭ, ОБ и ОК в предельно упрощенном виде.

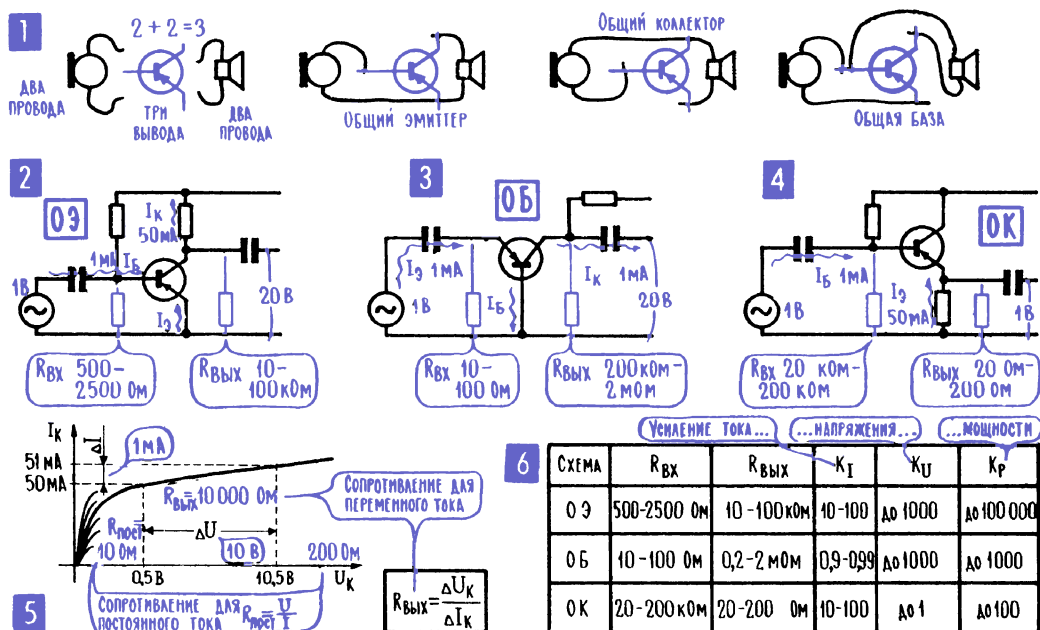


Рис. 12.4. Три возможные схемы включения транзистора: с общим эмиттером, общей базой и общим коллектором

Из всех трех схем нам знакома одна – схема ОЭ (рис. 10.10). Известно, что она усиливает ток в β раз, а также усиливает напряжение, так как напряжение на нагрузке может быть больше, чем напряжение на входе транзистора, на участке эмиттер–база. Для маломощных транзисторов усиление мощности в схеме ОЭ составляет несколько тысяч. Схема ОЭ усиливает мощность во много раз больше, чем две другие, и это одна из причин ее популярности.

Теперь о входном сопротивлении $R_{ВХ}$ и выходном $R_{ВЫХ}$. И входная цепь транзистора, и особенно выходная оказывают разное сопротивление постоянному и переменному току. Лучше всего это видно на примере коллекторной цепи открытого транзистора (рис. 12.4; 5). В реальном случае при напряжении на коллекторе 0,5 В через транзистор идет постоянный ток до 50 мА, для постоянного тока сопротивление коллекторной цепи 10 Ом. Но если мы попробуем менять напряжение и следить за изменением тока, то получим иную цифру – коллекторный ток очень мало меняется при изменении напряжения на коллекторе. Если напряжение U_K увеличить от 0,5 В до 10,5 В, то есть на 10 В, ток увеличится всего на 1 мА. Так менялся бы ток, если бы в цепи было включено сопротивление 10 кОм, и именно такое сопротивление оказывает транзистор меняющемуся коллекторному току, его переменной составляющей. А поскольку продукция транзистора, которую он должен передать дальше, не постоянный ток, а переменный, то можно считать, что эта последняя величина и есть выход-

ное сопротивление транзистора. Именно его нужно согласовывать с последующим каскадом.

Аналогично определяют и входное сопротивление транзистора по изменению входного (базового) тока и входного напряжения. В схеме ОЭ входное сопротивление составляет примерно 500–2500 Ом. Оно, кстати, тем больше, чем выше коэффициент усиления по току у данного транзистора⁷, потому что с увеличением β меньшая часть общего эмиттерного тока ответвляется в базу, а чем меньше ток при том же напряжении, тем, значит, больше сопротивление цепи.

Совсем иные цифры получаются в схемах ОБ и ОК.

В схеме ОБ (общая база) по входной цепи проходит уже не маленький базовый ток, а весь эмиттерный ток целиком. Из этого сразу два следствия, зачастую очень неприятных. Во-первых, коллекторный ток не может быть больше эмиттерного (гл. 9; 18), а значит, схема ОБ не дает усиления по току. Второе неприятное следствие касается входного сопротивления. Из-за того, что по входной цепи проходит большой эмиттерный ток, входное сопротивление транзистора оказывается очень маленьким ($R = U / I$, чем больше ток, тем, значит, меньше сопротивление). Оно практически в β раз меньше, чем в схеме ОЭ, и составляет несколько десятков ом⁸. А выходное сопротивление, наоборот, во много раз больше, чем в схеме ОЭ, оно достигает сотен килоом и даже нескольких мегаом. Это связано с тем, что коллекторное напряжение U_k в схеме ОБ почти совсем не влияет на коллекторный ток I_k . В схеме ОЭ малая часть коллекторного напряжения доставлялась эмиттерному переходу и с этого командного пункта как-то влияла на ток I_k . В схеме ОБ цепь питания коллектора совершенно изолирована от эмиттерного перехода.

Схема ОК (общий коллектор) тоже отличается от схемы ОЭ, но, если можно так сказать, в другую сторону. Схема ОК так же, как и ОЭ, усиливает ток в β раз, но она совсем не усиливает напряжения, потому что нагрузка здесь включена в цепь эмиттера и коллекторный ток создает на ней напряжение U_n , которое действует против напряжения на базе (гл. 10; 21). И напряжение на нагрузке в принципе не может быть больше, чем напряжение сигнала: в этом случае транзистор просто оказался бы закрытым. Практически в схеме ОК выходное напряжение равно входному⁹, и эту схему называют эмиттерным повторителем – она не усиливает напряжение сигнала, а лишь повторяет его. При этом эмиттерная нагрузка может быть очень небольшой, выходное сопротивление усилителя измеряется кило-

⁷ Входное сопротивление в схеме с заземленным эмиттером определяется приближенной формулой $R_{вх} = \beta \cdot (25 / I_k)$, где I_k измеряется в миллиамперах (см. [3]).

⁸ В соответствии с формулой $25 / I_k$, где I_k измеряется в миллиамперах.

⁹ В схеме ОК выходное напряжение $U_{вых}$ всегда меньше входного $U_{вх}$ на величину напряжения база-эмиттер $U_{0э} \approx 0,7$ В.

омами, сотнями ом и даже десятками ом¹⁰. В то же время входное сопротивление очень большое – десятки, сотни килоом и даже мегаомы¹¹. И все из-за того же мешающего действия напряжения на нагрузке: из-за него напряжение на базе очень слабо влияет на входной ток, а это равносильно тому, что входная цепь имеет очень большое сопротивление.

Примечание редактора. Схема с общей базой (ОБ) традиционно рассматривается в учебниках, но на практике применяется редко: в основном в высокочастотных схемах, так как позволяет «выжать» максимум из частотных свойств транзистора. При этом в реальных схемах вы почти никогда не встретите непосредственного соединения базы с общим проводом – как правило, «закорачивание» ее на «землю» осуществляется через конденсатор достаточной емкости (см. следующий раздел). Схема ОК (эмиттерный повторитель), наоборот, встречается очень часто, так как позволяет согласовать источник с высоким выходным сопротивлением с достаточно мощной нагрузкой (см. пример применения этой схемы в оконечном каскаде усилителей НЧ, рис. 12.10; 3 и раздел 14). Кроме того, надо специально подчеркнуть, что схемы ОК и ОБ не инвертируют входной сигнал, то есть выходной сигнал совпадает по фазе с входным (в пределах частотных ограничений для данного транзистора, см. раздел 18 этой главы); тогда как у наиболее распространенной схемы ОЭ фаза выходного сигнала на коллекторе противоположна фазе входного.

На рис. 12.4; 6 – сводная таблица основных характеристик схем ОЭ, ОБ и ОК: из этой таблицы можно сделать некоторые выводы об особенностях этих схем.

Так, например, видно, что схемы с общей базой и с общим коллектором дают сравнительно небольшое усиление по мощности. Первая – потому что не усиливает ток, вторая – потому что не усиливает напряжение. Они применяются в основном в тех случаях, когда нужны их повышенные или пониженные входные или выходные сопротивления. В частности, низкое выходное сопротивление схемы ОК позволяет согласовывать с ней громкоговоритель без всякого трансформатора, и эта схема находит применение в выходных каскадах высококачественных бестрансформаторных усилителей НЧ. Кроме того, она используется в тех входных каскадах, где нужно согласовать усилитель с большим выходным сопротивлением источника (например, пьезоэлектрического микрофона или звукоснимателя).

9. Участки схемы, заземленные по переменному току, не всегда заземлены по постоянному, и наоборот. Есть одна мелочь, которую обязательно нужно иметь в виду, рассматривая практические схемы, – одна и та же схема может быть просто начерчена по-разному: по-разному могут быть

¹⁰ Выходное сопротивление $R_{\text{вых}}$ для схемы ОК приблизительно равно R_e / β , где R_e – общее сопротивление источника сигнала (с учетом параллельно включенного сопротивления базового резистора R_b).

¹¹ Входное сопротивление $R_{\text{вх}}$ для схемы ОК приблизительно равно $R_{\text{н}} \cdot \beta$ (где $R_{\text{н}}$ – сопротивление нагрузки с учетом параллельно включенного эмиттерного резистора R_s).

расположены детали, соединительные провода, точки их соединения или пересечения (рис. 12.5). Из-за этого знакомая схема может показаться незнакомой, привычная – непонятной. Нужно уметь отвлечься от способа начертания схемы, увидеть главные ее особенности, определяющие прохождение токов, передачу напряжений, разделение переменных и постоянных составляющих. Как только от упрощенных схем мы начнем переходить к реальным, практическим, то сразу же обнаружим, что участок, заземленный (соединенный с общим проводом; гл. 10; 15) для переменного тока, не всегда можно заземлить по постоянному. А бывает и наоборот: участок, который нужно заземлить по постоянному току, нельзя соединить с общим проводом для переменного тока. В схеме появляются цепи раздельного заземления различных ее участков. Это, по сути, фильтры, которые по одному пути пропускают постоянную составляющую коллекторного или базового тока, а по другому пути проводят их переменные составляющие. Очень часто именно эти фильтры вместе с фильтрами питания и фильтрами, которые подводят усиленный сигнал ко входу и отводят усиленный сигнал с выхода, создают ощущение сложности и запутанности схемы, хотя никакой сложности нет. Нужно лишь спокойно проследить за прохождением токов и появлением напряжений на тех или иных участках схемы, и она предстанет простой и понятной.

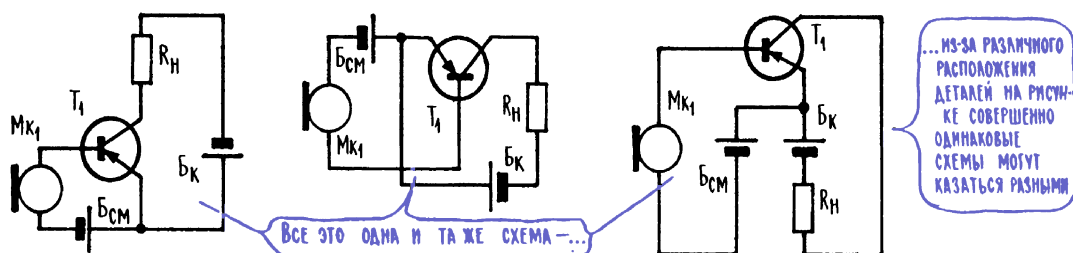


Рис. 12.5. Разное начертание одной и той же схемы

Для иллюстрации на рис. 12.6 приведена схема многокаскадного усилителя НЧ. В целом она не имеет практического смысла, это не более чем учебная схема. В ней собраны разные усилительные каскады и схемы межкаскадной связи, причем схемы каждого каскада и любой пары соседних каскадов вполне реальны, многие из них можно встретить в практических схемах усилителей.

Первый каскад учебного усилителя рис. 12.6 – это привычный уже усилитель по схеме ОЭ. По постоянному току его эмиттер «поднят», имеет некоторое напряжение относительно общего провода. По переменному току эмиттер заземлен через C_e и таким образом соединен с одним из проводов источника сигнала. В третьем каскаде по переменному току через C_f заземлен коллектор – каскад собран по схеме ОК. По постоянному току коллектор заземлить нельзя – на него подается «плюс» питающего напряжения,

а заземлен «минус» батареи B_k . Второй каскад тоже собран по схеме ОК, но здесь коллектор заземлен не через конденсатор, как в предыдущем каскаде, а непосредственно, причем заземлен и по переменному, и по постоянному току. Потому что в этом каскаде работает транзистор противоположной проводимости и на коллектор подается «минус», заземленный в данной схеме питания. Кстати, заземлять именно «минус» питания совсем не обязательно, можно заземлить и «плюс», все зависит от того, каких транзисторов в схеме больше и по каким схемам они в основном включены.

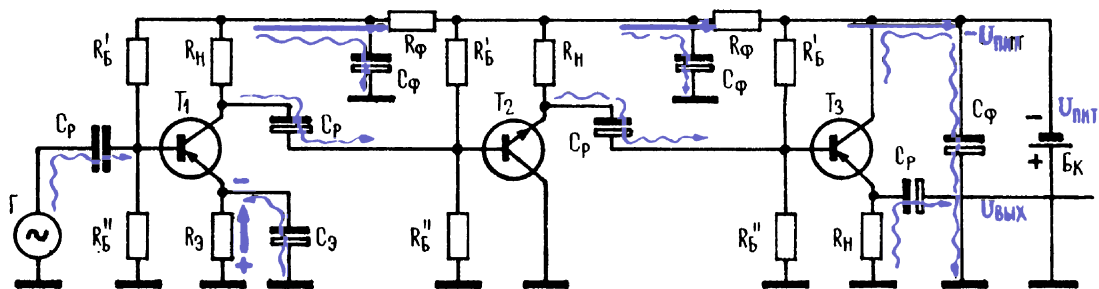


Рис. 12.6. Многокаскадный усилитель НЧ

10. Чтобы устранить паразитные связи между каскадами, в цепь питания включают фильтры и шунтируют батарею конденсатором. Внутреннее сопротивление источника питания невелико, у гальванических источников (батареек), например, это доли ома, в худшем случае несколько ом. И казалось бы, можно считать, что для переменного тока «минус» батареи просто заземлен и что вместе с ним по переменному току заземлены все точки схемы, соединенные с этим «минусом». Однако же пренебречь собственным сопротивлением источника, считать «минус» заземленным по переменному току можно только в самых простых маломощных усилителях. Потому что внутреннее сопротивление источника есть элемент никому не нужных связей между каскадами, и в многокаскадном усилителе такая паразитная связь сплошь и рядом приводит к самовозбуждению, к превращению усилителя в генератор.

Механизм появления паразитной связи по питанию очень прост. Переменная составляющая какого-либо коллекторного тока проходит по внутреннему сопротивлению источника и создает на нем переменное напряжение, которое неизбежно попадает на коллектор, а через резистор смещения – и на базы других транзисторов (рис. 12.7; 1). Способ борьбы с этой неприятностью тоже несложен – источник питания шунтируют конденсатором C_ϕ (рис. 12.7; 2), через который все переменные составляющие замыкаются беспрепятственно. Кроме того, в цепи включают развязывающие фильтры, задача которых – замкнуть переменную составляющую коллекторного тока на месте, вблизи транзистора, не пустить ее в общие

цепи питания¹². Бывает, что через один развязывающий фильтр питается один каскад, бывает, что несколько, а иногда питание на транзистор попадает через несколько фильтров.

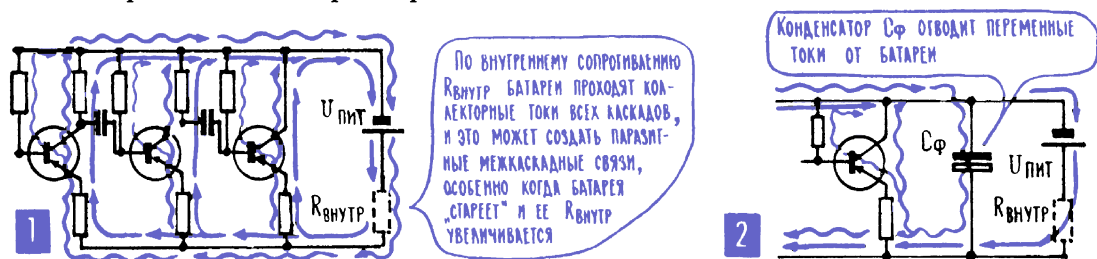


Рис. 12.7. Паразитные связи между каскадами через источник питания

11. Составной транзистор – простейший двухкаскадный усилитель, в котором входная цепь второго транзистора сама служит нагрузкой первого. Емкость разделительного, или, иначе, переходного, конденсатора C_P , через который сигнал передается из коллекторной цепи на базу следующего каскада, выбирается с учетом усиливаемой частоты: чем более низкие частоты нужно усиливать, тем больше должна быть эта емкость. Потому что с уменьшением частоты растет емкостное сопротивление конденсатора (гл. 6; 14), и чтобы сопротивление это не оказалось слишком большим, чтобы переходной конденсатор не забрал себе заметную часть усиленного сигнала, приходится увеличивать его емкость, уменьшая тем самым емкостное сопротивление. В транзисторных высокочастотных усилителях емкость переходного конденсатора обычно составляет 10–50 тысяч пикофард, в низкочастотных усилителях – 10–50 микрофард. Здесь многое еще зависит от нагрузки и особенно от входного сопротивления следующего каскада, потому что это сопротивление вместе с емкостным сопротивлением переходного конденсатора образует делитель напряжения. В самом общем виде можно так изложить соображения по выбору переходного конденсатора: его емкостное сопротивление на самой низкой из усиливаемых частот должно быть значительно меньше, чем входное сопротивление транзистора, на вход которого этот конденсатор передает усиленный сигнал.

Есть особый класс усилителей, который рассчитан на усиление очень медленно меняющихся сигналов. Настолько медленно, что большие отрезки времени, целые часы, а то и сутки сигнал вообще остается постоянным. Эти усилители так и называют – усилителями постоянного тока, или, сокращенно, УПТ. В качестве примера УПТ можно назвать усилитель, за-

¹² Цепи питания, как и источник питания, имеют свое сопротивление, на котором может выделяться переменная составляющая, потому что фильтрующие конденсаторы принято устанавливать вблизи потенциального источника помех остальным каскадам – в данном случае вблизи коллекторных цепей транзисторов.

дача которого – поднять уровень сигнала, поступающего с фотоэлемента в автомате включения уличного освещения. Уровень сигнала на входе такого УПТ может измениться на какие-то проценты в течение целого часа, говорить о частоте сигнала здесь вообще трудно, настолько она мала. И если бы пришлось подбирать переходные конденсаторы для такого УПТ, то их емкость, наверное, должна была бы измеряться миллионами, а то и миллиардами микрофард. Конденсаторов с такими емкостями не существует, и многокаскадные усилители постоянного тока собирают вообще без переходных конденсаторов, соединяя коллекторную нагрузку с входом следующего каскада непосредственно, просто проводником. Здесь появляются свои трудности, в частности постоянное напряжение с коллектора попадает на базу следующего транзистора, и нужно сделать так, чтобы оно не нарушило режим этого второго транзистора по постоянному току¹³. Но это задачи решенные, и УПТ довольно часто можно встретить, особенно в устройствах автоматики.

Разновидность усилителей постоянного тока – это так называемые составные транзисторы, где нет уже не только переходных конденсаторов, но и самой коллекторной нагрузки первого каскада – роль этой нагрузки выполняет входное сопротивление следующего каскада (рис. 12.8). Составной транзистор можно рассматривать как один усилительный прибор, характеристики которого определяются всеми вошедшими в него отдельными транзисторами и их взаимным соединением. В частности, общий коэффициент усиления β равен произведению этих коэффициентов всех транзисторов.

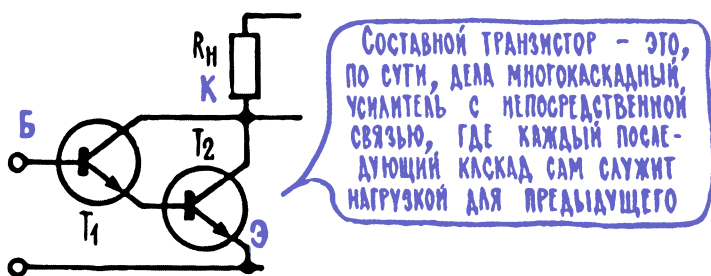


Рис. 12.8. Составной транзистор

Одно достоинство составного транзистора сразу же бросается в глаза – в нем нет «лишних деталей», нет конденсаторов, резисторов. А вот другое достоинство: составной транзистор из-за того, что в нем нет переходных конденсаторов, усиливает самые низкие частоты, что, кстати, относится ко всем УПТ. Но, конечно, эти достоинства не достаются бесплатно: из-за взаимной связи транзисторов по постоянному току составной транзистор

¹³ В схемах с реальными УПТ (в интегральном исполнении они называются операционными усилителями) всегда используется отрицательная обратная связь, которая стабилизирует параметры (см. далее раздел 16).

очень чувствителен к изменениям питающих напряжений и температуры. А кроме того, из-за трудностей согласования входных и выходных сопротивлений внутри самого составного транзистора не удастся выжать из усилительных приборов все, что они могли бы отдать в обычных схемах. Составные транзисторы часто можно встретить в полупроводниковых интегральных схемах, где особо ценится возможность экономить конденсаторы или резисторы.

Примечание редактора. Схема составного транзистора обычно применяется в мощных каскадах усиления и носит название схемы Дарлингтона. Подобные объединенные транзисторы выпускаются также в виде готового модуля. Не нужно забывать, что при применении обычных дискретных транзисторов в схеме Дарлингтона ухудшаются все параметры, кроме коэффициента усиления β : удваивается напряжение база–эмиттер, растет напряжение насыщения коллектор–эмиттер (а значит, растут и потери), снижается максимальная рабочая частота. Утверждение автора, что для составных транзисторов нет нужды в резисторах, ошибочно: по крайней мере необходим резистор между базой T_2 и «землей», в противном случае токи утечки T_1 будут неизбежно открывать T_2 (см. [1], гл. 2) даже в запертом состоянии T_1 . В готовых модулях Дарлингтона такой резистор обычно уже установлен.

12. Двухтактный усилитель: транзисторы поочередно посылают к нагрузке токи разного направления, которые в самой нагрузке суммируются. Если не хватает мощности одного транзистора, то в принципе можно (на практике стараются этого не делать) соединить два транзистора параллельно. А можно сложить выходные сигналы двух транзисторов иным способом – создать так называемый двухтактный усилитель. Двухтактные усилительные схемы называют еще «пушпульными», от англ. push-pull, что в переводе на русский значит «Тяни толкай». Так, кстати, звали одного из ближайших помощников доктора Айболита – лошадь, у которой было две головы – одна спереди, другая сзади. Это удивительное животное называется Пуш-ми-Пул-ми в сказке Гью Лофтинга «Доктор Дулитл», которую в свое время пересказал нам Корней Иванович Чуковский. Головы Тяни толкая поочередно спят и кушают, и животное всегда следит, чтобы к нему не подкрался охотник. Именно поэтому, уверяет автор, Тяни толкая до сих пор нет ни в одном зоопарке.

Электронный Тяни толкай, двухтактный усилитель, никак не отнесешь к редким явлениям. Двухтактные каскады очень широко используются в усилительной технике, и прежде всего в мощных каскадах усилителей НЧ. Сначала несколько слов о том, «как это делается», а затем что дает.

Простейшая двухтактная схема на транзисторах одинаковой проводимости показана на рис. 12.9; 1. На базы транзисторов T_1 и T_2 усиливаемые сигналы подаются в противофазе. В данном случае эта задача решена с помощью входного трансформатора Tr_1 с двумя вторичными обмотка-

ми Π_A и Π_B , но существуют и иные способы получения двух противофазных сигналов (гл. 12; 14).

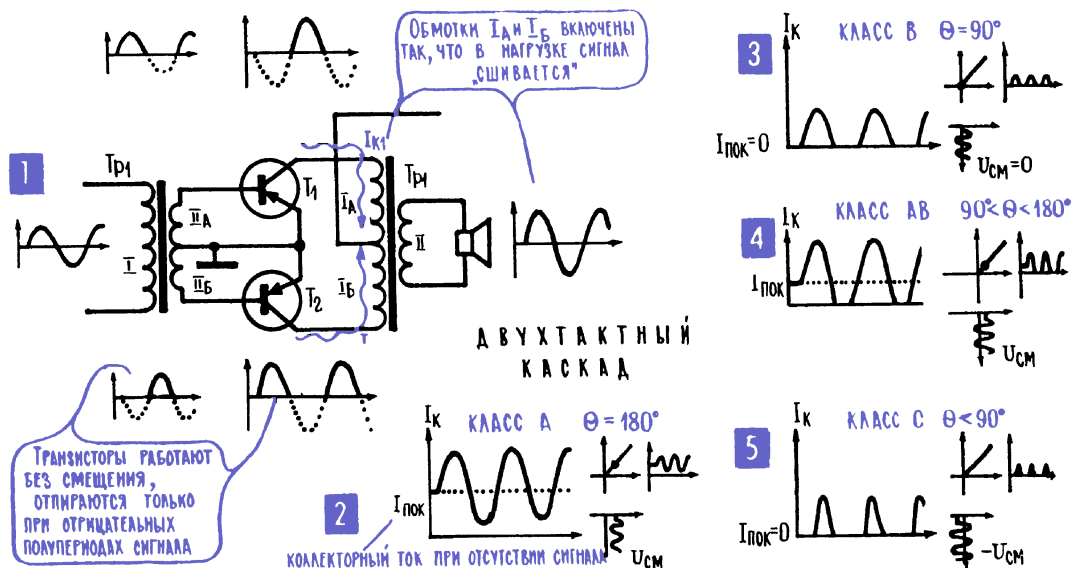


Рис. 12.9. Двухтактный усилительный каскад

То, что напряжения $U_{\text{вх1}}$ и $U_{\text{вх2}}$ именно противофазны относительно средней точки, связано только с определенным включением обмоток Π_A и Π_B . Не забудьте: поменять местами концы обмотки – это значит повернуть фазу на 180° (гл. 11; 7). Противофазными напряжения $U_{\text{вх1}}$ и $U_{\text{вх2}}$ получают в том случае, если обмотки I , Π_A и Π_B намотаны в одну сторону и начало одной из них соединено с концом другой. То есть если сделан отвод от средней точки всей вторичной обмотки (см. далее рис. 12.10; 1).

Поскольку напряжения на базах T_1 и T_2 действуют в противофазе, то и сами коллекторные токи этих транзисторов тоже меняются в противофазе: когда один нарастает, второй уменьшается. Эти токи проходят каждый по своей секции I_A и I_B к первичной обмотке выходного трансформатора $\text{Tr}_{\text{вых}}$. И каждый из коллекторных токов наводит часть тока I_n во вторичной обмотке этого трансформатора, к которой подключена нагрузка. Теперь главное – секции выходного трансформатора I_A и I_B соединены таким образом, что токи I_{n1} и I_{n2} , которые создаются в нагрузке каждым из транзисторов, суммируются. И общая мощность сигнала в нагрузке – это суммарная мощность, результат согласованных действий обоих транзисторов.

13. Двухтактные схемы могут работать с отсечкой коллекторного тока в экономичных классах усиления В и АВ. Для чего нужны все эти фокусы с фазами? Что дает в итоге создание двух противофазных сигналов

на входе усилителя и складывание противофазных токов в нагрузке? Окупается ли сложности, связанные с созданием двухтактного каскада?

Начнем с мелочей. Постоянные составляющие коллекторных токов создают в выходном трансформаторе постоянные магнитные поля противоположного направления, и, как это уже не раз бывало с враждующими полями, они просто-напросто уничтожают друг друга. В итоге выходной трансформатор работает без постоянного подмагничивания, его стальной сердечник может быть меньше и без воздушного зазора¹⁴.

Действуют друг против друга и магнитные поля, созданные токами четных гармоник, если они появляются в выходном сигнале из-за нелинейных искажений. Таким образом, двухтактная схема в значительной мере снижает нелинейные искажения. И наконец, еще одно достоинство, очень часто оно оказывается решающим: двухтактная схема позволяет работать в режимах усиления, которые мы до сих пор считали неприемлемыми, – в режимах с отсечкой коллекторного тока, при которых искажается форма сигнала, появляются страшные нелинейные искажения (гл. 11; 16).

Говорят, что если пессимисту и оптимисту дать по половине стакана сока, то первый занеет: «Вот... Полстакана уже нет...», а второй обрадуется: «Ура!.. Еще есть полстакана!» Если бы попросить пессимиста рассказать о событиях в двухтактном каскаде, который работает с отсечкой $\theta = 90^\circ$ (рис. 11.6 и 12.9; 1, 3), то оценка событий, по-видимому, была бы такой: «В транзисторах происходит что-то ужасное... Они работают через такт, безумно искажают сигнал, срезают чуть ли не целый полупериод». Иначе, наверное, оценил бы события оптимист: «Транзисторы работают прекрасно... Они поочередно дают отличный неискаженный сигнал, каждый из них без искажений воспроизводит целый полупериод...»

Именно такие неискаженные полупериоды используются в двухтактных каскадах, работающих с отсечкой. Каждый транзистор в течение своего «неискаженного полупериода» создает ток в нагрузке, а оба транзистора, работая через такт, создают целый, неискаженный сигнал, он как бы сшивается из двух половинок. При этом мощность выходного сигнала оказывается вдвое больше, чем мог бы дать один транзистор. А мощность, потребляемая от источника питания таким двухтактным каскадом, примерно в полтора раза меньше, чем потребовалось бы на создание такой же выходной мощности с помощью одноконтурного выходного каскада, работающего без отсечки. Это, согласитесь, огромное достоинство, особенно для переносной батарейной аппаратуры.

При работе без отсечки – такой режим называется классом усиления А – в коллекторной цепи протекает ток покоя $I_{\text{пок}}$ даже в том случае, когда на

¹⁴ Подмагничивание постоянным током уменьшает зону линейной работы сердечника катушки, вводя ее в состояние, близкое к насыщению сердечника. Зазор уменьшает магнитную проницаемость сердечника, но отодвигает режим от состояния насыщения. Зазор необходим только в трансформаторах, работающих с постоянным подмагничиванием (как, например, в ламповых или транзисторных каскадах усиления в режиме А или АВ, см. далее).

входе вообще нет сигнала. А самая большая амплитуда переменной составляющей коллекторного тока не может быть больше, чем ток покоя $I_{\text{пок}}$ (рис. 12.9; 2). Поэтому класс А, то есть усиление без отсечки, в принципе не может дать большую выходную мощность, чем половина мощности, потребляемой от коллекторной батареи. То есть, иными словами, коэффициент полезного действия (КПД) усилителя не может быть больше, чем 50 %. И это, заметьте, при самой большой амплитуде переменной составляющей коллекторного тока, которая соответствует самым громким звукам. А при меньших переменных составляющих КПД еще меньше: ток покоя от коллекторной батареи потребляется такой же, а выходной сигнал имеет значительно меньшую мощность. Средний КПД усилителя НЧ в классе А составляет примерно 20–30 %.

Совсем другое дело при усилении в классе В (угол отсечки $\theta = 90^\circ$, то есть каждое плечо двухтактного усилителя работает ровно половину периода) и в классе усиления АВ (угол отсечки θ больше 90° , каждый транзистор работает больше, чем полпериода). Во-первых, в этих режимах потребляемый ток составляет примерно 60 % от амплитуды переменной составляющей. И кроме того, потребляемый ток меняется в зависимости от уровня сигнала. В классе В: если сигнала нет, то ток от батареи вообще не потребляется; при небольших сигналах и потребляемый ток мал (рис. 12.9; 3). В классе АВ: некоторый начальный ток $I_{\text{пок}}$ потребляется и при отсутствии сигнала (рис. 12.9; 4), но так же, как в классе В, этот потребляемый ток увеличивается лишь по мере того, как усиливается сигнал. Кстати, в названии классов усиления В и АВ подразумевается латинская буква В; иногда в нашей литературе пишут «классы усиления Б и АБ».

Реальный звук – речь или музыка – бывает то громким, то тихим, в какие-то моменты вообще наступает пауза. Усилители класса А, не считаясь с этим, потребляют и потребляют энергию батарей, не снижая своих аппетитов. А усилители классов АВ и особенно В берут энергию только для дела, и берут ее очень экономно, по-хозяйски: чем меньше полезная работа, чем меньше мощность усиливаемого сигнала, тем меньше и потребляемая энергия. И в итоге это дает огромный экономический эффект: при воспроизведении реальной речи или реальной музыки с паузами, с изменением громкости класс В оказывается в среднем чуть ли не в четыре раза экономичнее, чем класс А. Если же, повернув регулятор громкости, вы несколько убавите уровень сигнала, удовлетворившись сравнительно тихим звучанием, то разница эта вообще окажется огромной – класс А, как всегда, почти не сбавит своих аппетитов, и окажется, что класс В потребляет энергии в десять, а то и в двадцать раз меньше. Уже одна эта экономичность, не говоря о других достоинствах, вполне оправдывает применение двухтактных схем.

Примечание редактора. Теоретический КПД для усилителя класса В составляет $\pi/4 = 0,785 = 78,5\%$ при максимально возможной амплитуде выходного сигнала.

ла, равной напряжению питания, и линейно снижается с уменьшением амплитуды. Практически он существенно меньше, в основном за счет недопущения нелинейных искажений при максимальных амплитудах. Однако хотя в отсутствие сигнала КПД и для класса А, и для класса В теоретически равен нулю, есть одно существенное различие – сама мощность, потребляемая от источника питания, при этом для класса В также равна нулю. Иными словами, чем тише звук, тем в классе В общая потребляемая мощность меньше.

Попутно отметим, что на базу усилителя, работающего в классе А, подается довольно большой «плюс», который и устанавливает ток покоя. При работе в классе В вообще никакого смещения на базу не подается. Именно поэтому транзистор T_1 полупериода закрыт, его отпирает только положительный полупериод, только «плюс» на базе, а отрицательный полупериод, «минус», напрочь закрывает транзистор. Недостаток чистого класса В в том, что при слабых сигналах, при малых отпирающих напряжениях транзистор работает на нелинейном участке входной характеристики, на участке начального загиба, ступеньки (см. рис. 9.5). Чтобы уменьшить нелинейные искажения слабых сигналов, отказываются от чистого класса В, подают на базу небольшое начальное смещение и работают с углом отсечки чуть больше, чем 90° , то есть в классе АВ. При этом, естественно, в коллекторной цепи существует небольшой ток покоя.

14. Остроумные схемные решения позволяют создавать разнообразные двухтактные схемы, в том числе бестрансформаторные. Двухтактная схема с входным и выходным трансформаторами имеет ряд достоинств, в их числе относительная простота, надежность, возможность применить простые схемы температурной стабилизации, небольшое число транзисторов. Трансформаторные схемы можно встретить и в очень мощных усилителях, и в самых маломощных, в частности в усилителях НЧ многих карманных и переносных приемников. От трансформаторной схемы отказываются чаще всего из-за значительных искажений в ней¹⁵.

Еще в ламповую эпоху, а особенно с появлением транзисторов разной проводимости, было найдено много остроумных схемных решений, позволивших строить бестрансформаторные усилители НЧ. В числе схемных находок, например, бестрансформаторный фазоинвертор (в переводе «поворачиватель фазы»), то есть схема, с помощью которой получают два противофазных выходных напряжения, показанный на рис. 12.10; 2. Этот каскад – гибрид схемы ОЭ (нагрузка в цепи коллектора) и схемы ОК (нагрузка в эмиттере). На вход, как обычно, поступает один сигнал $U_{вх}$, а на выходах появляются два сигнала $U_{вых1}$ и $U_{вых2}$ с противоположными фазами. Противоположные фазы у этих напряжений получаются потому, что одно из них снимается с коллекторной нагрузки, а второе – с эмиттер-

¹⁵ В настоящее время, как уже говорилось, от трансформаторной схемы в усилителях отказались полностью в связи с высокой стоимостью и большими габаритами трансформаторов.

ной. И в тот момент, когда под действием $U_{вх}$ коллекторный ток растет, напряжение на коллекторе уменьшается (см. рис. 10.4), а напряжение на эмиттере возрастает. Это как раз и означает, что $U_{вых1}$ и $U_{вых2}$ противофазны¹⁶.

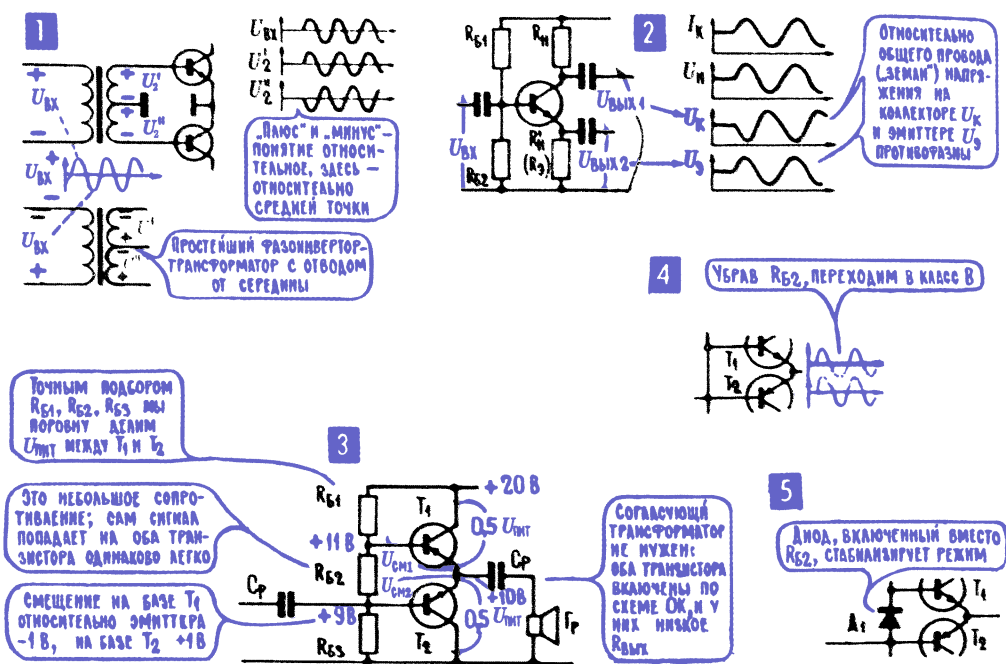


Рис. 12.10. Получение противофазного напряжения и различные варианты двухтактного каскада

Включение транзисторов по схеме ОК, которая, как известно, отличается низким выходным сопротивлением (рис. 12.4), позволяет в выходных каскадах отказаться от согласующего трансформатора и включать громкоговоритель прямо в эмиттерную цепь транзистора в качестве нагрузки. Используя транзисторы разной проводимости, можно собрать двухтактный выходной каскад без привычного фазоинвертора, например по схеме рис. 12.10; 3, которая работает в классе В (без смещения), если нет резистора R_{62} (рис. 12.10; 4), или в классе АВ, если есть R_{62} . Здесь нагрузка (громкоговоритель) включена в эмиттерные цепи обоих транзисторов, и они поочередно создают в этой нагрузке ток, складывают, сшивают из двух половинок выходной сигнал. По постоянному току оба транзистора соединены последовательно, причем напряжение общей коллекторной батареи делится между этими транзисторами поровну.

¹⁶ По этой причине схему на рис. 12.10; 2 точнее называть «фазорасщепителем».

Начальное смещение $U_{см}$ создается на резисторе R_{62} . Оно «плюсом» подается на базу $n-p-n$ -транзистора T_1 и «минусом» на базу $p-n-p$ -транзистора T_2 (относительно их эмиттеров). Нужно сказать, что это слабое место бестрансформаторных каскадов с последовательным питанием. Приходится принимать особые меры, чтобы при изменении температуры сохранялась симметрия «половинок» двухтактного каскада. Одна из таких мер – включение диода D_1 вместо резистора R_{62} (12.10; 5). Падение напряжения на открытом диоде при изменении тока через диод меняется так же, как напряжение на эмиттерном переходе транзистора, и если использовать это напряжение в качестве смещения, то диод окажется элементом, стабилизирующим режим транзисторов. Одного диода хватает, чтобы усилитель заработал в классе АВ, в основном миновав начальный загиб характеристики. Можно и побольше открыть транзисторы, включив два-три диода последовательно.

Примечание редактора. Строго говоря, простое удаление резистора R_{62} из схемы рис. 12.10; 3 (как на схеме 12.10; 4) вводит двухтактный каскад не в режим В (в котором половинки синусоид обрезаны строго по оси абсцисс), а в режим с более глубокой отсечкой синусоиды, что приводит к существенным нелинейным искажениям сигнала. Чтобы избежать этого, между базами двухтактного каскада и устанавливают смещение, приоткрывая транзисторы, то есть вводя каскад в режим АВ. Смещение вводят с помощью либо резистора, либо диодов (обычно двух или даже трех). Для надежного преодоления начального нелинейного участка характеристики транзисторов минимальное количество диодов равно двум; третий включают для надежного смещения; при этом, однако, растет ток покоя и снижается КПД усилителя. Для лучшей температурной стабилизации диоды плотно прижимают к радиаторам выходных транзисторов с целью выравнивания температур всех $p-n$ -переходов.

Заметим также, что есть и другие, более «продвинутые» способы подачи смещения. Впрочем, иногда от двухтактного каскада требуется симметричное усиление импульсного (прямоугольного) сигнала амплитудой от минуса до плюса питания; в этом случае небольшая нелинейность в середине никак не сказывается на результате и смещение можно не вводить.

Как всякий эмиттерный повторитель, такой двухтактный каскад не усиливает напряжение, он усиливает мощность, и перед входным блоком всегда включают два-три каскада предварительного усиления. Вот одно из главных достоинств подобных схем: в них нет такого опасного источника частотных искажений, как выходной трансформатор, и бестрансформаторные каскады могут работать с очень небольшими искажениями. Особенно если они охвачены глубокой отрицательной обратной связью.

15. Отрицательная обратная связь по переменному току позволяет уменьшать нелинейные искажения. Во всех популярных книжках о кибернетике можно встретить имя английского мальчика Гемфри Поттера, который, как полагают, первым догадался применить в машине обратную связь. Было это лет двести назад, Гемфри работал на одной из шахт южной Англии, занимая удивительную должность: на большом насосе для откачивания воды он работал открывателем кранов. Насос приводился в движение паром, и мальчик целый день делал одно и то же: поворачивал рукоятку крана, направляя пар то в одну часть парового цилиндра, то в другую, заставляя таким образом поршень двигаться то в одну сторону, то в другую. В какой-то момент мальчик сообразил, что поршень может сам управлять своей работой. Гемфри довольно простым способом соединил кран с поршнем так, что поршень, двигаясь сам, стал поворачивать рукоятку крана, сам стал сообщать крану, в каком положении он, поршень, находится и куда нужно пустить пар. Это была обратная связь, обратное влияние следствия на причину, влияние движущегося поршня на давление пара, который приводил поршень в движение.

Хотя Гемфри Поттер и вошел в историю техники, справедливости ради нужно отметить, что обратная связь применялась еще до того, как мальчик связал веревочкой края парового насоса с поршнем. Причем задолго до того. Достаточно вспомнить, что обратные связи на каждом шагу встречаются в живых организмах, которые миллиарды лет обитают на нашей планете. Сотни, тысячи систем с обратной связью работают в каждом из нас. Сердце гонит кровь через легкие, где она получает кислород, а управляет работой сердца, в числе других факторов, уровень насыщения крови кислородом. Это и есть обратная связь – следствие (насыщение кислородом) влияет на причину (скорость кровотока). Еще пример: химический состав крови, в частности содержание углекислого газа в ней, влияет и на частоту дыхания (причина), а значит, в итоге на процессы газового обмена крови с воздухом (следствие) в легких.

Очень широко используются обратные связи в технике, в частности в электронике. Один из примеров нам уже знаком – это генератор с самовозбуждением. Небольшая часть энергии, переданная по цепи обратной связи с выхода транзистора на его вход, дает указания, как нужно «открывать кран», то есть как нужно менять напряжение на базе (причина), чтобы поддержать изменения коллекторного тока (следствие). Используется обратная связь и в усилителях низкой частоты, но, в отличие от генераторов, уже не положительная обратная связь (рис. 11.2; 3, 4), а отрицательная (рис. 11.2; 5). Это значит, что сигнал обратной связи U_{oc} не помогает, а мешает поступающему с предыдущего каскада сигналу $U_{сиг}$, действует с ним в противофазе, уменьшает общее напряжение $U_{вх}$ на входе усилителя (рис. 12.11; 1).

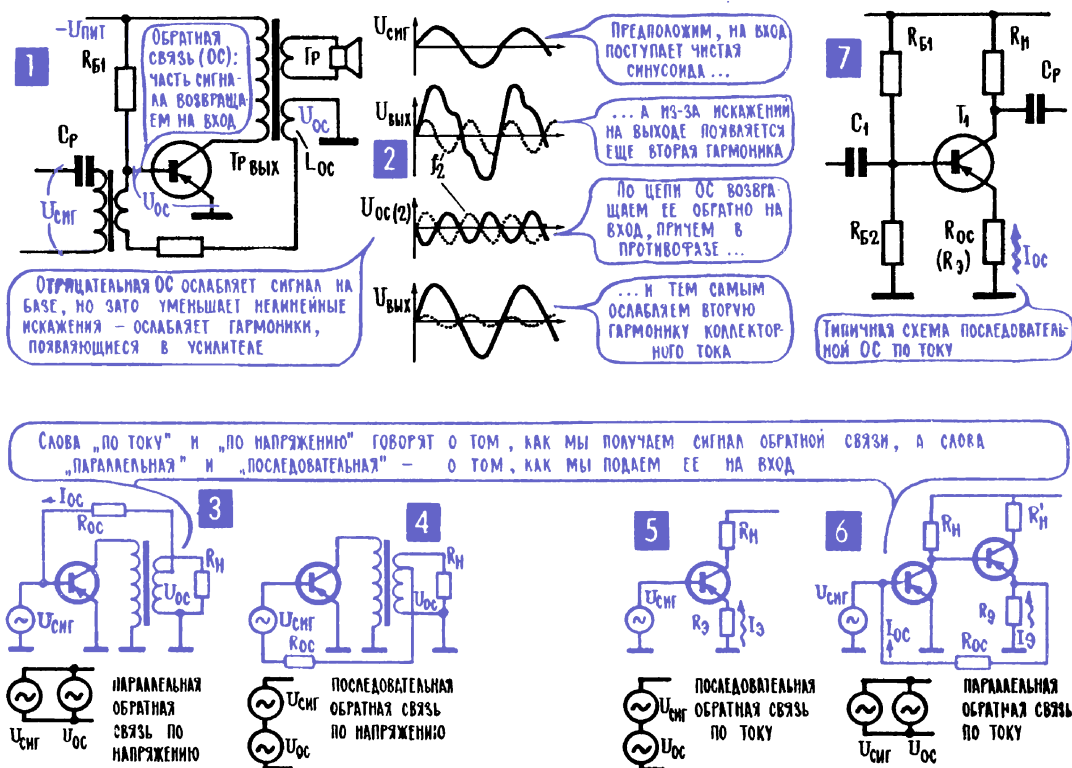


Рис. 12.11. Обратные связи

Можно сразу сказать, что отрицательная обратная связь снижает усиление каскада – раз ослабляется входной сигнал, то уменьшается и выходной, слабее становится «мощная копия». Но зато отрицательная обратная связь позволяет делать то, чего никаким иным способом добиться не удалось бы, – она позволяет снизить нелинейные искажения, которые появляются в каскаде. Крайне упрощенно это показано на рис. 12.11; 2.

Все дело в том, что отрицательная обратная связь приносит на вход не только основной сигнал, но все его новые составляющие, которых там не было, они появились в результате искажений. Причем они действуют на входе в такой фазе, что сами ослабляют посторонние составляющие коллекторного тока. Конечно же, и мы сразу это признали, одновременно ослабляется и основной сигнал. Но такую неприятность можно компенсировать, подав несколько больший сигнал от предыдущего каскада. И, заплатив некоторым количеством, некоторым дополнительным усилением, можно выиграть качество, выиграть верность воспроизведения звука, естественность звучания. Особенно нужна отрицательная обратная связь в выходных каскадах, работающих в классах В и АВ, так как в них из-за сложных операций с сигналом, из-за его разрезания и сшивания легче всего могут появляться нелинейные искажения.

Иногда отрицательной обратной связью охватывают один каскад усилителя, а иногда сразу несколько каскадов. При этом существует четыре варианта обратной связи, к которым в итоге сводится все многообразие схем. Вот эти четыре варианта: последовательная и параллельная обратная связь по напряжению и последовательная и параллельная обратная связь по току. Слова «последовательная» и «параллельная» говорят о том, каким способом обратная связь вводится во входную цепь: последовательно с источником сигнала или параллельно ему. А слова «по напряжению» и «по току» говорят о том, как сигнал обратной связи получают с выхода усилительного каскада. Если напряжение обратной связи определяется током усилительного каскада и мало зависит от выходного напряжения, то это обратная связь по току. Так, например, если в схеме ОЭ в цепь эмиттера включен резистор $R_{\text{э}}$ без обычного конденсатора $C_{\text{э}}$ (рис. 12.11; 5), то на этом резисторе создается напряжение обратной связи, и это напряжение как раз и определяется коллекторным током, то есть $R_{\text{э}}$ является элементом обратной связи по току.

Если в этой схеме мы будем менять выходное напряжение, например изменяя сопротивление нагрузки $R_{\text{н}}$, то напряжение обратной связи практически не изменится. А вот на схеме ОК (эмиттерный повторитель, рис. 12.4; 4 и 12.6) напряжение обратной связи – это фактически напряжение на самой нагрузке, которая включена в цепь эмиттера (в коллекторной цепи теперь уже резистора нет), и всякое изменение выходного напряжения – это одновременно и изменение обратной связи. То есть схема ОК создает обратную связь по напряжению¹⁷. Так же, как и схема, в которой напряжение обратной связи снимается прямо со вторичной обмотки выходного трансформатора (рис. 12.11; 1).

16. Отрицательная обратная связь помогает автоматически поддерживать режим усилителя. Теперь мы можем так объяснить действие конденсатора $C_{\text{э}}$, который в традиционной схеме ОЭ (рис. 10.10; 1) шунтирует резистор $R_{\text{э}}$ в эмиттерной цепи: этот конденсатор замыкает накоротко для переменного тока резистор $R_{\text{э}}$ и предотвращает таким образом отрицательную обратную связь. Но только по переменному току: постоянное напряжение, которое коллекторный ток создает на $R_{\text{э}}$, все равно приложено к базе, и всякие медленные изменения коллекторного тока (не сигнал, не переменная составляющая, а именно медленные изменения, связанные, например, с тепловым режимом или с заменой батареи) приведут к медленным изменениям напряжения на базе. Это так называемая обратная связь по постоянному току, в данном случае отрицательная обратная связь,

¹⁷ В схеме ОК (эмиттерный повторитель) действует 100%-ная отрицательная обратная связь по напряжению, поэтому эта схема увеличивает только ток, а напряжение даже слегка ослабляется. Аналогично в схеме ОБ действует 100%-ная отрицательная обратная связь по току, поэтому в ней усиливается только напряжение.

потому что постоянное напряжение на R_3 на базу попадет «минусом», то есть в полярности, которая закрывает транзистор. И всякое увеличение коллекторного тока, действуя «само на себя», через элемент обратной связи R_3 препятствует увеличению коллекторного тока. Без обратной связи он увеличивался бы сильнее.

Существуют и другие схемы отрицательной обратной связи по постоянному току, но все они в принципе действуют одинаково: увеличиваясь, коллекторный ток увеличивает некое постоянное напряжение, которое стремится его же и уменьшить (см., например, рис. 10.11; 1). И вводятся такие схемы в большинстве случаев тоже с одной и той же целью – чтобы стабилизировать режим усилителя, автоматически поддерживать ток при самых разных покушениях на его постоянство.

17. Регуляторы тембра меняют частотную характеристику усилителя. Иногда полезно несколько ухудшить частотную характеристику усилителя, например поднять низшие частоты, которые слишком плохо воспроизводит громкоговоритель, или ослабить высшие частоты, частично подавить «шип» старой граммофонной пластинки. Для этого используются регуляторы тембра – электрические RC-цепочки, частотные свойства которых можно менять, изменяя, например, одно из сопротивлений. На рис. 12.12; 1 самый простой регулятор тембра – RC-цепочка с переменным резистором R_T . Цепочку чаще всего включают так, что она шунтирует участок усилительной схемы, старается замкнуть сигнал накоротко. Емкость C_T подобрана с таким расчетом, чтобы на низших частотах ее емкостное сопротивление было достаточно большим, чтобы этот конденсатор, если он будет в схеме один (движок R_T в крайнем верхнем положении), ослаблял бы лишь высшие частоты, заваливал частотную характеристику в области высших частот. Но если переменный резистор R_T введен полностью, то конденсатор C_T вообще ни на что не влияет, общее сопротивление цепи очень велико, и в нее почти не отвечают ни высшие частоты, ни низшие.

На том же принципе действует распространенный регулятор тембра (рис. 12.12; 2) с отдельной регулировкой высших и низших частот. Его элементы рассчитаны таким образом, что одна ветвь регулятора в зависимости от положения движка $R_{вч}$ заваливает или поднимает частотную характеристику в области высших частот, а вторая ветвь в зависимости от положения движка резистора $R_{тч}$ меняет характеристику в области низших частот.

Работает такой регулятор очень эффективно, но уровень сигнала он только уменьшает, и поэтому для него нужно иметь значительный запас усиления.

Элементы, корректирующие частотную характеристику, в том числе и регуляторы тембра, можно в принципе включить и в цепь отрицательной обратной связи (рис. 12.12; 3, 4). При этом здесь они все делают наоборот: те

частоты, которые пропускаются без ослабления, создают более сильную обратную связь, и частотная характеристика в области этих частот заваливается.

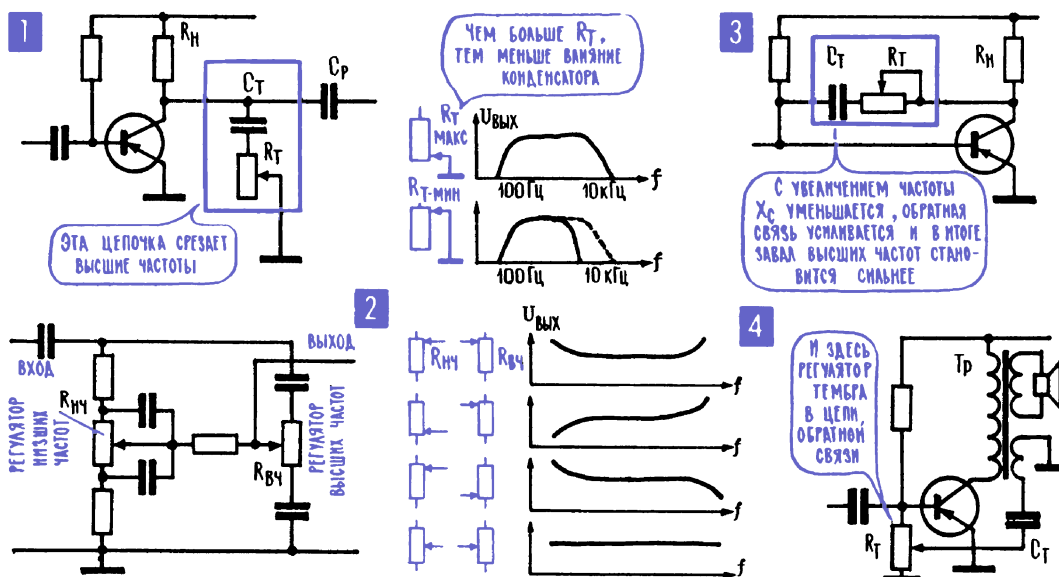


Рис. 12.12. Регуляторы тембра

18. Фазовые сдвиги в усилителе могут привести к возникновению положительной обратной связи, к превращению усилителя в генератор. Помимо тех цепей отрицательной обратной связи, которые вводятся специально, в частности для ослабления нелинейных искажений, могут появиться незапланированные, паразитные цепи обратной связи. Например, через источник питания (рис. 12.7). Или через общие для входа и выхода участки самого транзистора. Или, наконец, через электрические и магнитные поля, которые создаются выходными цепями и наводят сигнал во входных цепях (рис. 12.13).

Паразитные обратные связи могут оказаться и отрицательными, и положительными, а может быть и так, что сигнал обратной связи, попав на вход транзистора, будет сдвинут по фазе относительно действующего там сигнала на какой-либо промежуточный угол в пределах от 0° до 360° . Кроме того, характер обратной связи может меняться с частотой – так же, как это наблюдалось в RC-генераторе (гл. 11; 9). Потому что любая RC-цепь на разных частотах создает разные сдвиги фаз (рис. 12.1; 4).

На все эти сложные явления можно было бы и не обращать внимания в усилителях НЧ, если бы не одно прискорбное обстоятельство: обратная связь может оказаться настолько сильной, что будет выполняться условие связи (гл. 11; 7), и на тех частотах, где еще к тому же выполняется усло-

вие фаз, просто произойдет самовозбуждение усилителя, он превратится в генератор (рис. 12.1; 3). Кстати, источником самовозбуждения могут оказаться и цепи отрицательной обратной связи: на каких-то частотах, чаще всего на самых высоких, из-за дополнительных фазовых сдвигов отрицательная обратная связь может превратиться в положительную (рис. 12.1; 4).

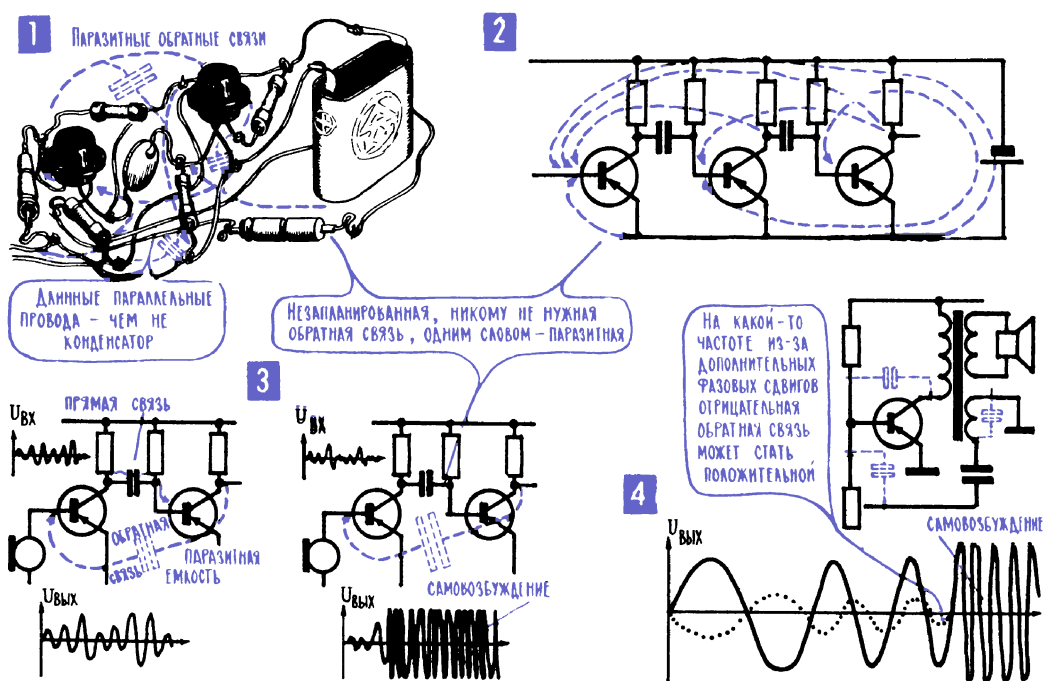
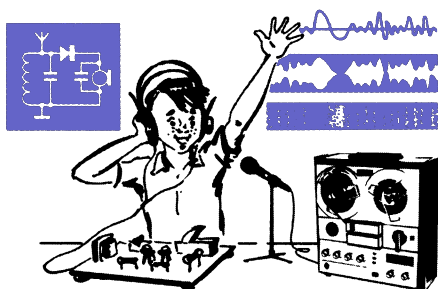


Рис. 12.13. Паразитные обратные связи в усилителях

Устранить самовозбуждение усилителя не всегда просто, а бывает, и обнаружить его нелегко. На этой предупреждающей ноте от усилителей низкой частоты мы переходим к другим схемам.



ГЛАВА 13

Передача и хранение информации

Примечание редактора. Эта глава представляет собой извлечения из нескольких глав книги, посвященных принципам радиосвязи и телевидения, а также аналоговой записи звука и изображения. Большинство из этих принципов остались неизменными и по сей день, а вот способы осуществления на практике, конечно, изменились. Практическая реализация всех перечисленных изобретений сегодня ориентируется на как можно большее применение информации в цифровом виде: вплоть до того, что, например, телевизионный сигнал цифруется сразу на телестанции, в цифровом виде передается через эфир и в таком же виде выводится на дисплей телевизора (а телевизор в результате фактически превращается в компьютер, только сугубо специализированный). Преимущества передачи и хранения информации в цифровом виде в первую очередь заключаются в том, что цифровые данные не могут искажаться самопроизвольно со временем, не изменяются при копировании и передаче по каналам связи. Обычная магнитофонная запись звука необратимо портится при копировании и все больше искажается при каждой перезаписи, а в цифровом виде каждая копия оказывается идентична оригиналу. Поэтому разделы о практической реализации из книги опущены как потерявшие актуальность.

Однако нужно понимать, что сотовая связь или сети Wi-Fi сегодня функционируют на основе тех же принципов, что и аналоговая радиосвязь в прошлом. Поэтому, зная, например, особенности распространения радиоволн тех или иных диапазонов, можно с гораздо большим пониманием дела организовать прием телевидения или сотового сигнала у себя на даче, разместить Wi-Fi-роутер в нужном месте квартиры или настроить прием сигнала спутниковой навигации в помещении. То же самое касается и звука: понимая, какие принципы были положены в основу звукозаписи в прошлом, манипуляции с современными виртуальными студиями станут куда более осмысленными. Кроме того, из тех времен пришли многие термины (модуляция, несущая частота, амплитудно-частотная характеристика и т. д.), происхождение и смысл которых без ознакомления с самими принципами останется непонятным.

Радиосвязь

1. Проводник, по которому идет переменный ток, излучает электромагнитные волны. Когда-то радиолюбители конструировали приемники,

пытаясь конкурировать с промышленностью, получить более высокие технические характеристики и дополнительные удобства. Или реализовать в своем любительском приемнике какую-нибудь новинку, которая в серийной аппаратуре появится через годы. Или, наконец, построить приемник с хорошими параметрами при минимальных затратах.

Сейчас же все это ушло в область воспоминаний. Промышленность выпускает широкий ассортимент самых разных приемников, и уже давно приемник из предмета роскоши (когда-то говорили: «У него есть радиоприемник!») – с таким же почтением, с каким сейчас, наверное, сказали бы: «У него есть вертолет!») стал обыденным явлением. Вряд ли кому-то сейчас удастся построить приемник лучше фирменного, и в любом случае он окажется гораздо дороже.

Однако радиоприем – прекрасная база для обучения радиоэлектронике. Нам предстоит пройти непростой, но очень интересный путь по радиоприемнику. Но начнем мы этот путь с радиопередатчика.

Движущиеся заряды, в частности заряды, образующие ток в проводнике, создают вокруг себя магнитное поле. Причем вдали это поле появляется не в тот же момент, что и у самой поверхности проводника, а с некоторым опозданием. Электрические и магнитные поля распространяются со скоростью света, то есть проходят в секунду 300 000 км, и на расстоянии 30 м от проводника поле появится через 0,000 000 1 с (через одну десяти-миллионную секунды).

Опоздание очень небольшое, но все же опоздание есть, и оно играет принципиально важную роль в процессе излучения свободных электромагнитных волн.

Когда по проводнику течет постоянный ток и вокруг него появляется магнитное поле, то это поле нельзя назвать свободным. Оно привязано к породившему его току: прекратите ток – и поле тут же исчезнет. Электрическое поле существует вокруг скопления зарядов, тоже крепко привязано к этим зарядам: уберите заряд – и поля нет. Но совсем иначе ведут себя электрические и магнитные поля, если их создает непрерывно и быстро меняющийся ток или непрерывно и быстро меняющийся электрический заряд.

Старый, добрый, испытанный метод – мысленный эксперимент: пропускаем по проводнику переменный ток и следим за тем, что происходит с электрическими и магнитными полями на некотором расстоянии от этого проводника (рис. 13.1; 1). Первое же нарастание тока создаст нарастающее магнитное поле, сначала оно появится у самой поверхности проводника, а затем, перемещаясь в пространстве со скоростью света, доберется и до некой точки x . Когда же ток начнет уменьшаться, то магнитное поле тоже будет ослабевать. И тоже не сразу – у поверхности проводника уже поля нет, а в точке x оно еще существует.

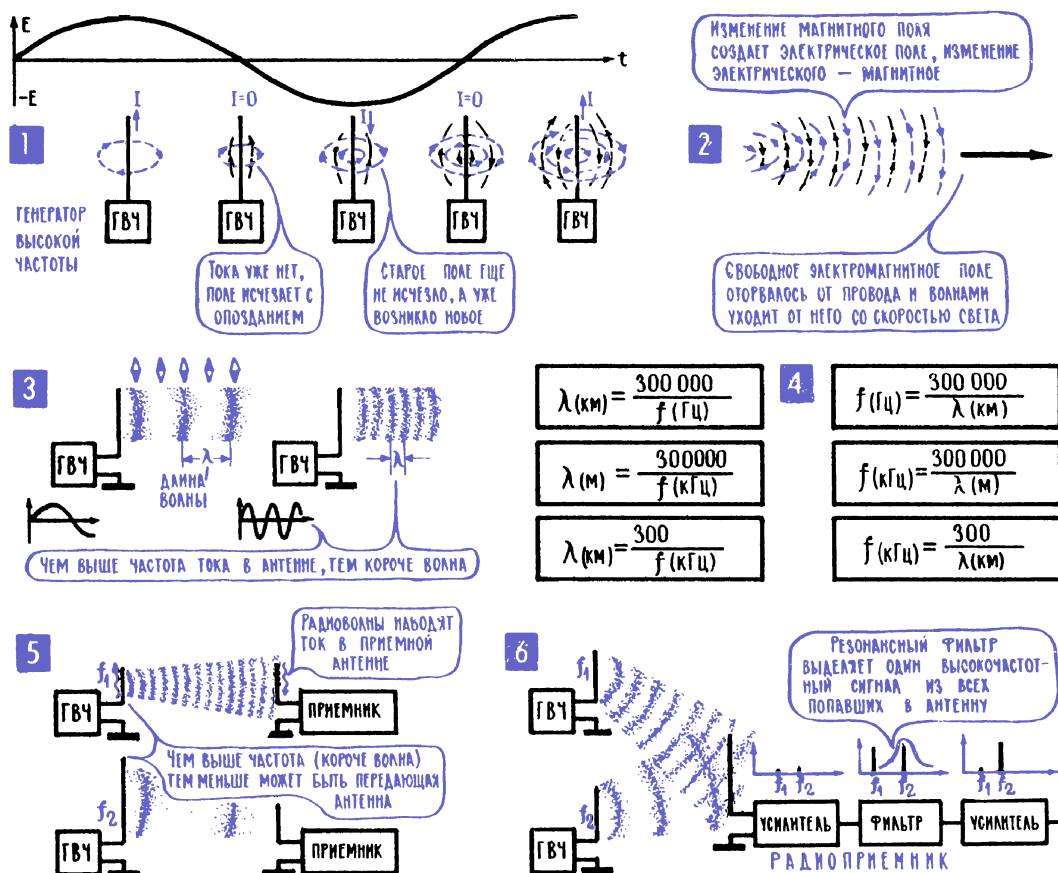


Рис. 13.1. Электромагнитные волны

Теперь представьте себе, что ток в проводнике меняется очень быстро. И что в точке x еще не успело исчезнуть старое магнитное поле, как в проводнике начал действовать следующий полупериод тока и пошла в пространство следующая порция магнитного поля. Мы можем в упрощенном виде так описать события: под действием переменного тока проводник один за другим посылает в пространство сгустки магнитных полей — каждый последующий новый сгусток «подталкивает» предыдущий, старый, отсекает его от проводника, и в пространство уходят свободные магнитные поля.

Ток в проводнике всегда появляется под действием напряжения, а значит, некоторого накопления зарядов. А они создают вокруг проводника и некоторое переменное электрическое поле. Переменное потому, что раз ток переменный, то и напряжение переменное, а значит, концентрация зарядов тоже меняется. С электрическим полем, по сути, происходит то же самое, что и с магнитным: один сгусток поля следует за другим, сгустки

электрических полей, подталкиваемые следующими такими же сгустками, уходят от проводника, начинают самостоятельную свободную жизнь в пространстве.

Но электричество и магнетизм – это лишь два разных проявления одного электромагнитного процесса. И электрические поля, выброшенные в пространство, так же, как и магнитные, оказываются лишь составляющими единого сложного образования – электромагнитного поля. В этом поле происходит непрерывный обмен энергией между его составляющими, их взаимные превращения – изменения электрического поля рожают магнитное поле, а его изменения, в свою очередь, рожают электрическое поле. Проводник с переменным током излучает одновременно обе составляющие поля – электрическую и магнитную, они непрерывно переходят одна в другую, их уровень и направление все время меняются (рис. 13.1; 2).

2. Чем выше частота излучающего тока, тем меньше длина излучаемой электромагнитной волны. В самых разных по своей природе волновых процессах есть некоторые общие черты. Так, скажем, волны на поверхности воды и звуковые волны имеют кое-что общее с таким не похожим на них объектом, как волны электромагнитные. Для всех для них, в частности, может быть введена одна и та же характеристика – длина волны. У морских волн это расстояние между двумя соседними гребнями, у звуковых – расстояние между двумя участками с максимальным давлением (рис. 7.2).

Длина электромагнитной волны – это расстояние между двумя соседними одинаковыми сгустками (одного и того же направления), электрической или магнитной составляющей. Если в мысленном эксперименте взять в руки компас и, остановив электромагнитную волну, перемещаться вдоль нее и наблюдать за отклонением стрелки, то можно будет сказать: длина волны – это расстояние между двумя точками, где стрелка отклоняется в одну сторону и притом с одинаковой силой (рис. 13.1; 3). Этот эксперимент относится к числу мысленных не потому, что его трудно осуществить, а потому, что его осуществить невозможно: электромагнитную волну остановить нельзя, она всегда в движении, всегда несетя вперед со скоростью света.

Чем выше частота переменного тока, создавшего электромагнитную волну, тем чаще следуют друг за другом сгустки ее электрических и магнитных составляющих, тем, следовательно, короче длина волны (рис. 13.1; 3). Чтобы подсчитать длину волны λ , нужно знать частоту f переменного тока и вспомнить, что скорость света $c = 300\,000$ км/с. За одну секунду ток совершит f полных циклов изменения (гл. 6; 6), а волна за эту же секунду успеет пройти 300 000 км. Поэтому между каждой парой соседних одинаковых сгустков окажется расстояние $\lambda = 300\,000 / f$ (рис. 13.1; 4). Можно, кстати, дать такое определение длине волны: это расстояние, которое электромагнитная волна успевает пройти за время, равное одному периоду.

3. С помощью электромагнитных волн можно создать канал связи. Проводник с переменным током, излучающий электромагнитные волны, сразу же назовем передающей антенной. На некотором расстоянии от него расположим другой проводник и назовем его приемной антенной (рис. 13.1; 5, 6). Электромагнитные волны, добравшись от передающей антенны к приемной, наведут в ней переменный ток. Можно так описать появление тока в приемной антенне: электрическая составляющая поля будет двигать свободные заряды в проводе так же, как электрическое поле двигает наэлектризованные клочки бумаги. А кроме того, магнитная составляющая поля, поскольку она непрерывно меняется, наведет в приемной антенне ток своим испытанным методом – за счет электромагнитной индукции (гл. 5; 11). А поскольку и электрическая, и магнитная составляющие поля непрерывно меняются, то меняются и силы, которые двигают заряды в приемной антенне. Меняются и по величине, и по направлению. И наводится поэтому в приемной антенне переменный ток (рис. 13.2; 1,2).

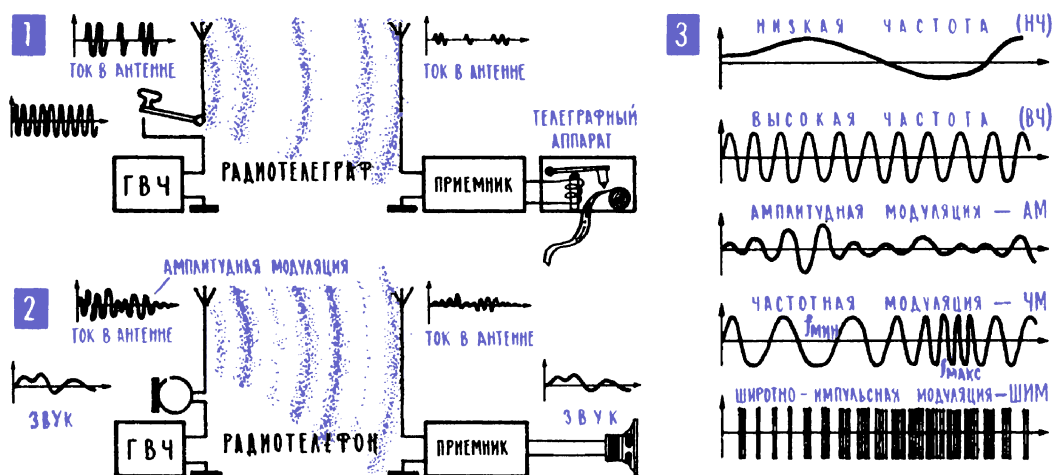


Рис. 13.2. Принципы передачи и приема электромагнитных волн

Ток, который электромагнитная волна наведет в приемной антенне, будет, разумеется, очень слабым, потому что мощность излучающего тока, которая передается электромагнитным волнам, разносится ими во все стороны, размазывается по огромному пространству. Но важно другое: мощность излучения, интенсивность электромагнитного поля, следует по пятам за изменением тока в передающей антенне. А за мощностью излучения следует по пятам ток в приемной антенне. Поэтому ток в приемной антенне повторяет все изменения тока в передающей, оказывается его копией. Слабой копией, но точной. А это значит, что по линии связи – от передающей антенны к приемной можно передавать информацию без со-

единительных проводов, используя электромагнитную волну как быстрого и исполнительного гонца. Главный процесс в такой системе беспроводной электросвязи – это излучение. И поэтому сразу же назовем ее системой радиосвязи – «радио» можно перевести на русский как «связанный с излучением», это слово происходит от латинского «радиус» – «луч».

4. Для эффективного излучения радиоволн нужен ток высокой частоты. Первое, что хочется сделать, – построить простейшую линию радиотелефонной связи, включив в передающую антенну микрофон, а в приемную антенну – громкоговоритель (головной телефон). Расчет прост – микрофон переведет звук на электрический язык и создаст в передающей антенне меняющийся ток, который будет излучать радиоволны. Они, в свою очередь, наведут ток в приемной антенне, а громкоговоритель воспроизведет с его помощью звук, копию звука, услышанного микрофоном.

Несмотря на простоту и привлекательность такой системы, на практике она неприменима. И вот одна из причин. Чтобы передающая антенна эффективно излучала электромагнитные волны, эта антенна должна быть как можно выше, во всех случаях ее высота должна быть соизмерима с длиной волны (рис. 13.1; 5). Это требование связано с самим механизмом излучения: трудно представить себе, чтобы громкоговоритель размером с булавочную головку эффективно излучал звук. Хорошо, если высота антенны равна половине λ , неплохо, если четверти. Можно смириться даже с тем, что высота антенны составляет несколько процентов от длины волны, хотя при этом мощность излучения составит чрезвычайно малую часть мощности переменного тока в передающей антенне. Теперь подсчитаем: даже на средней звуковой частоте 1000 Гц длина волны оказывается 300 км. И если смириться с тем, что высота антенны составляет всего 1 % от λ (это очень плохо, но пусть хоть так), то понадобится антенна высотой 3 км. Построить такую высокую антенну непросто. А ведь нужно еще излучать и более низкие частоты, для которых антенну пришлось бы делать намного выше.

А вот другой серьезный недостаток: если одновременно будет работать несколько таких систем радиосвязи и в приемную антенну попадут все сигналы, то разделить их будет невозможно, слушатель получит невообразимую смесь голосов и мелодий.

Выход такой: создавать радиоволны нужно с помощью токов высокой частоты, а каждому передатчику разрешать работать только на одной, именно за ним закрепленной частоте. Во-первых, это позволит в приемнике с помощью резонансных фильтров (гл. 6; 24) отделять сигнал нужной станции от всех остальных (рис. 13.1; 6). А во-вторых, для эффективного излучения высокочастотному току понадобятся уже сравнительно неболь-

шие антенны. Так, например, частоте 150 кГц, одной из самых низких высоких частот, применяемых для радиовещания, соответствует длина волны 2 км. Высота антенны, если принять для нее 10 % от длины волны, составит 200 м. А инженеры уже давно умеют строить передающие антенны высотой в несколько сот метров.

Примечание редактора. Здесь нет опечатки – частоты от 30 до 300 кГц (длинно-волновый диапазон) действительно издавна использовались для радиовещания. Преимуществом этого диапазона является высокая дальность (длинные волны способны огибать земной шар) и проникающая способность (на сверхнизких частотах может быть осуществлена даже связь с подводными лодками в погруженном состоянии), недостаток – крайне малая информационная емкость (см. далее раздел 8). В России с 2014 года диапазон длинных волн для государственного и коммерческого радиовещания не используется; длинноволновые передатчики остались лишь в некоторых странах за рубежом.

Правда, использование высокочастотных токов в линии беспроводной связи создает новые проблемы – на передатчике нужно как-то записать информацию в высокочастотном токе, а в приемнике нужно эту информацию извлечь.

5. Модуляция; изменяя тем или иным способом высокочастотный ток, записывают в нем информацию. Включив в передающую антенну телеграфный ключ, а в приемную – приемный телеграфный аппарат, можно создать линию беспроводной радиотелеграфной связи (рис. 13.2; 1). Именно это в конце прошлого века сделал изобретатель радио Александр Степанович Попов. Свои работы он так и называл – телеграфирование без проводов. Передавать по радио речь, то есть осуществлять телефонирование без проводов, научились значительно позже.

Чтобы записать в высокочастотном токе речь или музыку и таким образом заставить радиоволны переносить эту информацию к приемнику, можно просто включить угольный микрофон в антенну. Так же, как его включали в цепь постоянного тока (рис. 8.3). Под действием звуковых волн сопротивление микрофона меняется, а значит, будет меняться и амплитуда высокочастотного тока, как в свое время менялся ток в линии телефонной связи (гл. 8; 5). Этот процесс называется амплитудной модуляцией. Высокочастотный ток, модулированный по амплитуде, излучает модулированные радиоволны – их интенсивность тоже меняется, повторяя все изменения звукового давления перед микрофоном. Модулированные радиоволны наводят в приемной антенне модулированный высокочастотный ток, а довольно простой электронный блок (заранее назовем его детектором) позволяет расшифровать этот ток (рис. 13.3) и получить переменный ток низкой частоты, точную копию звука.

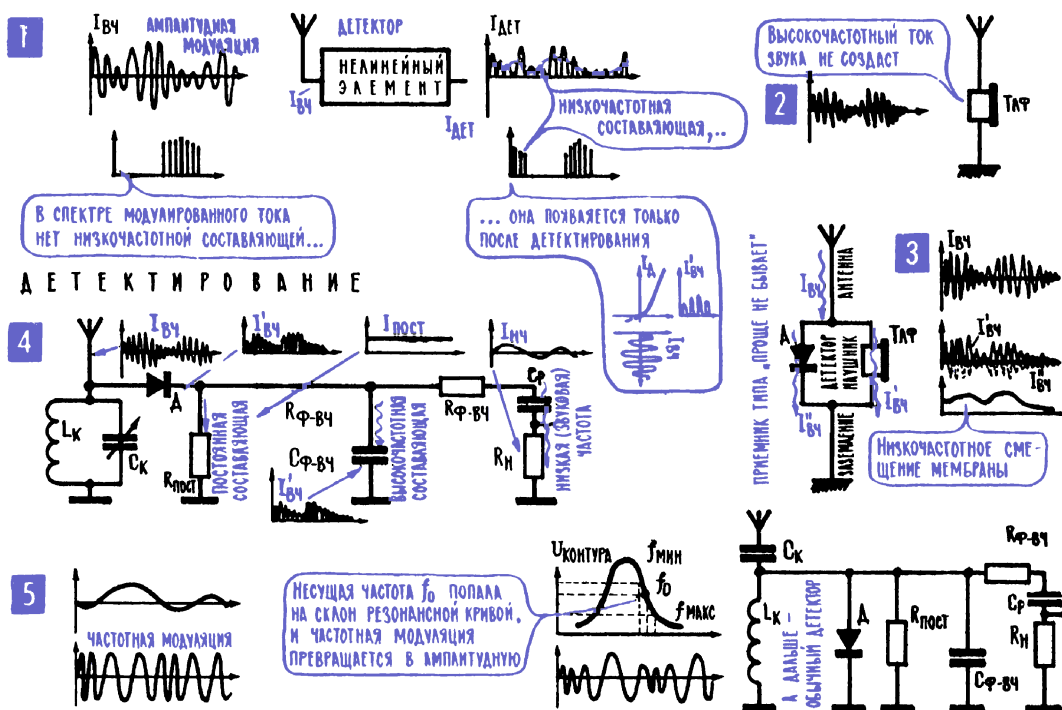


Рис. 13.3. Детектирование радиосигнала

Амплитудная модуляция, сокращенно АМ, – это лишь один из способов зашифровывания информации в высокочастотном токе. Другой распространенный способ – частотная модуляция ЧМ (рис. 13.2; 3). Здесь амплитуда высокочастотного тока остается неизменной, а под влиянием микрофона в сравнительно небольших пределах меняется сама частота переменного тока. Сделать это несложно: генератор высокочастотного тока в передатчике – это всегда ламповый или транзисторный генератор, частоту которого определяют параметры колебательного контура (гл. 11; 3). Существуют несложные схемы, которые под действием микрофонного тока в небольших пределах меняют емкость контура и таким образом осуществляют частотную модуляцию. Передатчики многоканальных линий радиосвязи часто работают в импульсном режиме, это позволяет использовать много разных способов модуляции. Например, менять амплитуду импульса (амплитудно-импульсная модуляция, АИМ), ширину импульса (широотно-импульсная модуляция, ШИМ), время его появления (фазово-импульсная модуляция, ФИМ) или отображать изменения микрофонного тока в различных комбинациях импульсов (импульсно-кодовая модуляция, ИКМ). Естественно, что для всех этих способов модуляции существуют свои способы детектирования, извлечения информации из модулированного сигнала.

6. *Детектирование: модулированный высокочастотный ток преобразуют таким образом, чтобы извлечь записанную в нем информацию.* Слово «детектор» в переводе на русский означает «обнаружитель», оно происходит от того же корня, что и «детектив» – «сыщик». Прежде чем разбираться в том, как работает детектор, нужно убедиться в том, что он действительно нужен. А для этого достаточно включить громкоговоритель (головной телефон) прямо в антенну. Даже если передающая станция находится близко и в приемной антенне наводится достаточной силы высокочастотный сигнал, то с помощью одного только громкоговорителя все равно ничего услышать не удастся. Начнем с того, что подвижная система громкоговорителя (телефона) просто не будет поспевать за изменениями высокочастотного тока. А если бы она даже поспевала, то создавала бы неслышимые высокочастотные колебания воздуха, ультразвук. А нужно, чтобы звуковая катушка громкоговорителя или мембрана телефона двигались бы под действием низкочастотного тока, под действием электрической копии того самого звука, который слышал микрофон и который нужно воспроизвести в приемнике.

Не пытайтесь найти такой низкочастотный ток в приемной антенне, его там просто нет. В приемной антенне циркулирует только наведенный радиоволнами ток высокой частоты с изменяющейся, модулированной амплитудой. А для того чтобы получить низкочастотный ток, нужно прежде всего преобразовать спектр этого высокочастотного тока, пропустить его через нелинейный элемент. Только в результате нелинейных процессов в спектре могут появиться новые составляющие и, в частности, низкочастотный ток, который нам необходим (рис. 13.3; 1).

Самый простой приемник из всех возможных показан на рис. 13.3; 3. Телефон Тлф шунтирован полупроводниковым диодом Д, который закорачивает телефон, причем «через такт» – во время одного полупериода сопротивление диода мало, во время следующего – велико. И поэтому через телефон, так же как через диод, уже идет не переменный высокочастотный ток, а пульсирующий. А он, как всякий пульсирующий ток, состоит из двух составляющих – постоянной и переменной. Но постоянная составляющая будет постоянной только до тех пор, пока перед микрофоном тишина, пока нет модуляции. Как только начнется модуляция, начнет меняться и постоянная составляющая продетектированного сигнала, повторяя все изменения амплитуды высокочастотного тока. А эта амплитуда тем больше, чем больше в данный момент микрофонный ток на передающей стороне. А значит, «постоянная» составляющая будет повторять все изменения низкочастотного тока в цепи микрофона, все изменения звукового давления перед ним. Можно сказать так: «постоянная» составляющая продетектированного сигнала сама содержит две составляющие – истинно постоянную $I_{\text{пост}}$ и низкочастотную $I_{\text{нч}}$. А значит, весь продетектированный сигнал состоит из трех составляющих – $I_{\text{вч}}$, $I_{\text{нч}}$ и $I_{\text{пост}}$.

В простейшем приемнике рис. 13.3; 3 сравнительно медленные, низкочастотные изменения тока заставят двигаться мембрану телефона, и она создаст звук. В большинстве же случаев детектор должен выделить низкочастотный электрический сигнал $I_{нч}$ в чистом виде и уже потом, как правило, после усиления, этот сигнал попадет на громкоговоритель. Поэтому в типичный детектор рис. 13.3; 4, кроме диода, входят еще и разделительные фильтры. Конденсатор $C_{фвч}$ сразу же замыкает никому не нужную составляющую ВЧ (высокой частоты). Этому способствует резистор $R_{фвч}$, который не пускает ее дальше. Емкость $C_{фвч}$ сравнительно невелика – сотни, тысячи пикофард, но этого вполне достаточно, чтобы создать легкий путь для ВЧ-составляющей (на частоте 150 кГц конденсатор емкостью 0,01 мкФ = 10 000 пФ имеет сопротивление 100 Ом, см. табл. 11.1). Низкочастотную составляющую выделяет цепочка $C_p R_{нч}$, в которой конденсатор имеет достаточно большую емкость и легко пропускает токи НЧ (низких частот).

Если к этой схеме добавить колебательный контур $L_k C_k$, несколько расстроенный по отношению к частоте принимаемой станции, то получится устройство для детектирования частотно-модулированного сигнала – частотный детектор (рис. 13.3; 5). Введем обозначения: без частотной модуляции частота сигнала – f_c , а при модуляции она меняется от $f_{мин}$ до $f_{макс}$. По мере того как частота сигнала приближается к резонансной частоте контура или удаляется от нее, меняется напряжение на элементах контура (гл. 6; 22), и в итоге ЧМ превращается в АМ. А дальше АМ-детектор делает свое обычное дело – превращает переменный ток ВЧ в пульсирующий и из него уже выделяет низкочастотную составляющую.

Основная профессия колебательного контура, основная его работа в радиоприемнике – выделение сигнала принимаемой станции из бесчисленного множества сигналов, наведенных в приемной антенне радиоволнами разных радиостанций (рис. 13.1; 6). Чтобы познакомиться с этой деятельностью контура, нужны некоторые дополнительные сведения.

7. В спектр модулированного сигнала входят составляющие несущей частоты и двух боковых частот (частотных полос). Пока нет модуляции, ток в передающей антенне – чисто синусоидальный ток. Но как только начнется модуляция, он уже перестает быть синусоидой в результате медленного изменения амплитуды (в процессе модуляции) высокочастотного тока, форма его несколько искажается. Короче говоря, модуляция есть процесс нелинейный, и в спектре модулированного сигнала появляются новые составляющие (гл. 8; 11). Математический анализ и точные измерения показывают, что эти составляющие появляются обязательно парами и что их частоты чуть выше и чуть ниже основной, или, как ее называют, несущей, частоты $f_{нес}$. При этом верхняя боковая частота f_v и нижняя боковая частота f_n отличаются от несущей ровно на частоту модуляции F (рис. 13.4).

Модуляция – это частный случай нелинейного преобразования двух сигналов, при котором появляются составляющие суммарной и разностной частот (гл. 11; 18).

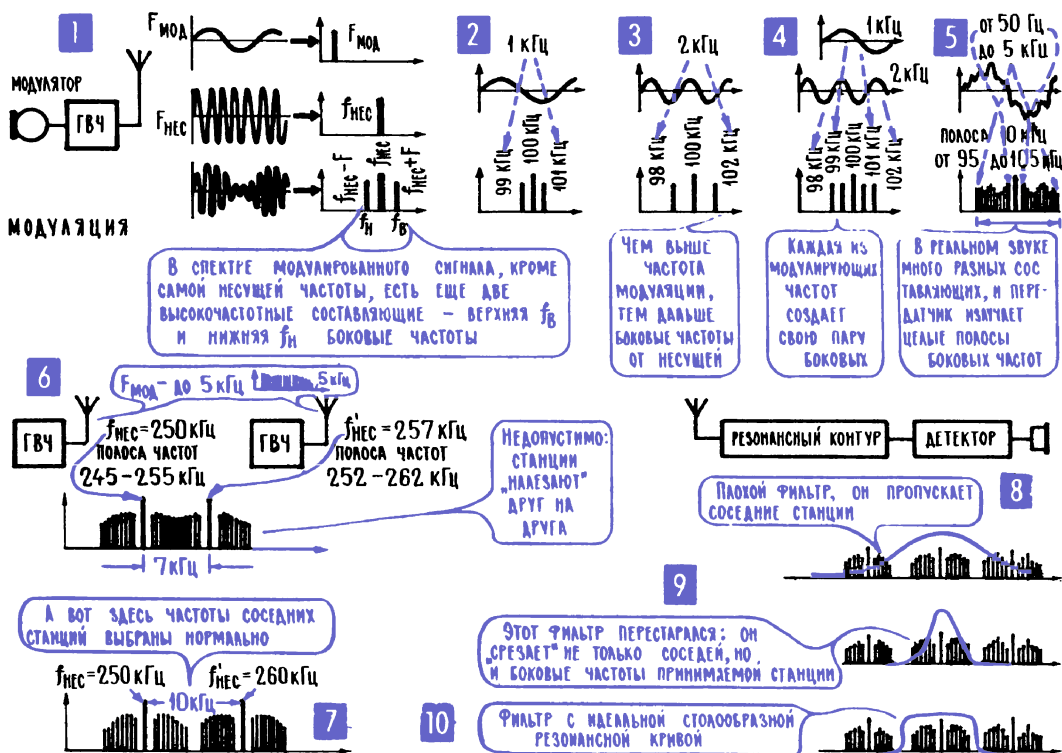


Рис. 13.4. Модуляция сигналов

Две боковые составляющие с частотами $f_{\text{В}}$ и $f_{\text{Н}}$ появляются в том случае, когда высокочастотный ток модулируется одним чисто синусоидальным низкочастотным сигналом. Если же таких модулирующих сигналов несколько, то каждый из них создаст свою пару боковых частот (рис. 13.4; 4). Реальный звуковой сигнал состоит из большого числа синусоидальных составляющих (гл. 7; 13), и при модуляции появляются целые полосы боковых частот (рис. 13.4; 5). Причем граничные боковые частоты – самая низкая из низших $f_{\text{Н мин}}$ и самая высокая из верхних $f_{\text{В макс}}$ – определяются высшей модулирующей частотой $f_{\text{макс}}$. Так, например, если несущая частота 100 кГц, а низкочастотный модулирующий сигнал имеет спектр от 200 Гц до 3 кГц (спектр речи), то получается $f_{\text{В макс}} = 103$ кГц и $f_{\text{Н мин}} = 97$ кГц. А если ту же несущую модулировать сигналом, спектр которого 50 Гц – 10 кГц (спектр музыки), то получаются уже такие граничные боковые частоты – верхняя $f_{\text{В макс}} = 100$ кГц и нижняя $f_{\text{Н мин}} = 90$ кГц.

Эти числовые примеры помогают сделать важный вывод: передатчик излучает не одну частоту, а целую полосу частот ΔF , и ширина этой поло-

сы частот зависит от того, каким сигналом модулирован высокочастотный ток: она равна удвоенной наивысшей частоте модуляции $F_{\text{макс}}$. В частности, при передаче речи (первый пример, полоса $\Delta F = 6$ кГц) передатчик излучает более узкую полосу частот, чем при передаче музыки (второй пример, полоса $\Delta F = 20$ кГц). Все это значит, что фильтр, который будет выделять нужную станцию, должен пропустить к детектору не только несущую частоту, но все боковые частоты, весь спектр модулированного сигнала, всю полосу частот, излучаемых передатчиком (рис. 13.4; 9, 10). И еще один вывод: нельзя назначать радиостанциям очень близкие рабочие частоты, нужно раздвигать несущие частоты так, чтобы спектр одного передатчика не налезал на спектр другого (рис. 13.4; 6, 7). Именно поэтому на некоторых диапазонах, не мешая друг другу, может работать очень много станций, а на других диапазонах мало.

8. У длинных, средних, коротких и ультракоротких радиоволн свои особенности распространения и различные «частотные территории». Все высокочастотные токи, используемые для радиосвязи, радиовещания, телевидения, радиолокации и других целей, принято делить на несколько участков, диапазонов. Такое деление на диапазоны, в частности, связано с тем, что радиоволны разной длины по-разному проходят путь от передатчика к приемнику. Границы между диапазонами весьма расплывчаты, бывает, что разные специалисты по-разному определяют граничные частоты. Но границы частотных участков, которые отводятся для радиовещательных станций, установлены очень точно. Всего таких участков выделено четыре, и названы они диапазонами длинных волн ДВ, средних волн СВ, коротких волн КВ и ультракоротких волн УКВ (рис. 13.5; 1). Коротковолновых участков, на которых работают радиовещательные станции, несколько, и их называют по средней длине волны – «диапазон 25 метров» или «25-метровый диапазон», «диапазон 41 метр», или «41-метровый диапазон» и т. д. Условия распространения радиоволн разной длины различны. Это связано с тем, что волны разной длины неодинаково реагируют на препятствия, которые встречаются на их пути, неодинаково отражаются от одних и тех же «зеркал». Влияние длины волны на характер взаимодействий с внешним миром – характерная черта любых волновых процессов. Так, например, мелкие волны, рябь на воде, разрушаются, наткнувшись на небольшой камешек, а длинная, большая волна огибает его совершенно незаметно. Или другой пример: световые волны почти полностью отражаются от человеческого тела или поглощаются в нем, а волны более короткие, рентгеновские лучи, пронизывают его почти беспрепятственно, проходят насквозь, лишь слегка поглощаясь в сравнительно плотных тканях.

Длинные радиоволны лучше всех других распространяются над земной поверхностью, легко огибают большие препятствия в виде оврагов и гор, огибают и сам земной шар (рис. 13.5; 2), подобно тому как большая мор-

ская волна перекачивается через мелкую скалу. Поэтому в любое время дня и ночи длинноволновые станции можно услышать на очень больших расстояниях, если только быстро ослабевающие радиоволны доносят к приемной антенне достаточно энергии. Вдоль земной поверхности распространяются и все остальные радиоволны – средние, короткие и УКВ, но с ростом частоты сама земля все сильнее поглощает их энергию. И к тому же эти волны, особенно короткие и УКВ, уже не огибают Землю и почти не проходят за линию горизонта.

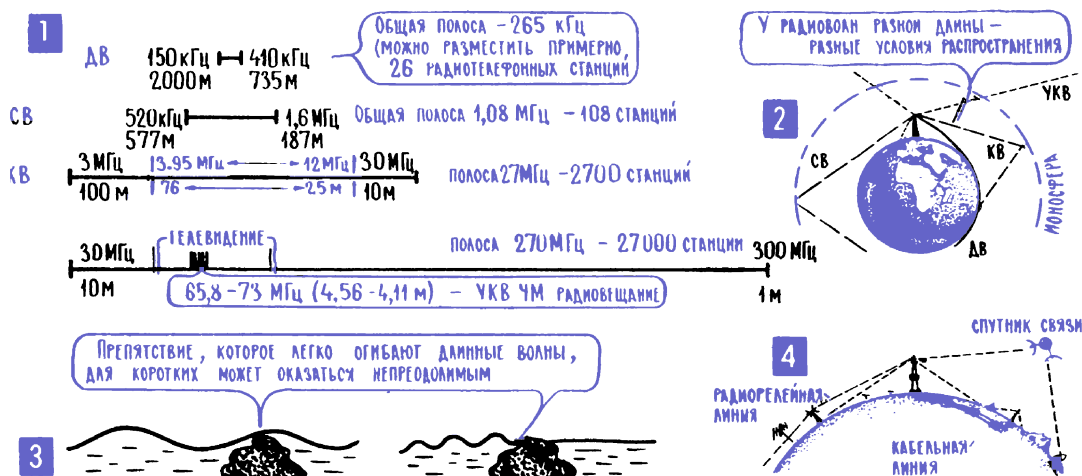


Рис. 13.5. Диапазоны электромагнитных волн для радиосвязи¹

Но почему же тогда, спросит наблюдательный читатель, мы слышим далекие средневолновые и коротковолновые станции? Только потому, что их радиоволны приходят к приемнику, отразившись от огромного зеркала, которое находится над землей. Это зеркало – ионосфера, ионизированные слои атмосферы, где под действием солнечных лучей нейтральные атомы газов превращаются в ионы (гл. 2; 9). И хоть мала плотность ионов в этих ионизированных слоях, радиоволны все же отражаются от них, как от металлических предметов. В разное время суток и в разное время года из-за изменения солнечной активности плотность различных слоев ионосферы меняется, и поэтому меняются условия отражения и распространения радиоволн. Средние волны, например, днем вообще от ионосферы не отражаются, и поэтому дальние средневолновые станции слышны только с наступлением темноты. Плохо слышны днем станции и на коротковолновых диапазонах 41 м и 49 м, а станции диапазонов 25 м и 19 м, наоборот, лучше слышны днем.

¹ В современных условиях поддиапазон УКВ для вещательных ЧМ-станций (в быту теперь более принято сокращение FM-диапазон, от английского *frequency modulation* – частотная модуляция) сдвинулся в основном в район 90–110 МГц, а основная доля телевизионного вещания приходится на часть УКВ-диапазона от 110 МГц до 800 МГц и более.

А ультракороткие волны, как правило, вообще не отражаются от ионизированных слоев ионосферы, они протыкают ее и уходят в космическое пространство. Поэтому на УКВ слышны только очень близкие радиостанции, те, что находятся на расстоянии прямой видимости и радиоволны которых добираются от передатчика к приемнику над землей (рис. 13.5; 4). В последнее время, правда, человек перехитрил природу, научился передавать УКВ на очень большие расстояния. Делается это с помощью цепочки приемопередающих радиостанций² или с помощью искусственного спутника Земли, который можно было бы назвать активным зеркалом – электронная аппаратура на спутнике принимает сигнал земной УКВ-станции, усиливает его, а затем излучает обратно на Землю.

На разных диапазонах может работать, не мешая друг другу, разное количество станций. Чтобы боковые частоты соседних станций не налезали друг на друга, между несущими частотами устанавливают интервал 10 кГц, и при этом оказывается, что на ДВ-диапазоне может уместиться не больше 26 станций, на СВ – 108, на каждом из коротковолновых радиовещательных участков по 25–30, в диапазоне УКВ – 360 станций³. Общая ситуация такая: с укорочением волны «частотная территория» становится больше. Так, например, на всем коротковолновом диапазоне, на волнах от 10 м до 100 м, можно было бы разместить в двадцать раз больше станций, чем на длинных и средних вместе взятых. А на сантиметровых волнах (длина волны от 1 см до 10 см, граничные частоты, соответственно, от 30 000 до 3000 МГц) разместилось бы около трех миллионов станций с полосой 10 кГц. Этому не нужно искать каких-то сложных объяснений: просто чем короче волна, тем более высокая частота ей соответствует и тем меньше оказывается в сравнении с ней «порция», которая нужна одной станции. Если из булочки можно нарезать десяток бутербродов, то из большого каравая размером с диван таких же бутербродов может получиться несколько тысяч.

Примечание редактора. В настоящее время вещание на длинных и коротких волнах повсеместно сокращается, хотя на этих диапазонах по-прежнему работают различные службы (службы спасения, полиция, медицинские службы, пожарные, МЧС, наземная навигация и т. д.), а также коротковолновые рации и радиотелефоны для местной индивидуальной связи. Для гражданских целей освоен диапазон дециметровых волн (ДМВ), имеющий частоты от 300 до 3000 МГц (3 ГГц), и часть сантиметрового диапазона около 5000 МГц (5 ГГц). Нижнюю часть диапазона ДМВ (до ~800 МГц) занимает в основном телевидение, диапазоны около 800–950, 1800–2100, 2600 МГц отведены для сотовой связи и беспроводной передачи данных (стандарты 3G, LTE/4G и пр.).

² Ретрансляционных станций – ретрансляторов.

³ Имеется в виду не весь диапазон УКВ, а его часть, отведенная для ЧМ-вещания в СССР (65,9–74 МГц в современном стандарте).

Есть также несколько диапазонов, открытых для свободного использования – при условии соблюдения ограничений на определенную мощность передатчика, с тем чтобы разные устройства не мешали друг другу. Из них наиболее популярен диапазон около 2400 МГц (2,4 ГГц), в котором, в частности, работают беспроводные сети Wi-Fi и Bluetooth, а также, например, микроволновки. Для любительских нужд отведены также и другие диапазоны – например, 433 и 868 МГц.

Общая закономерность, без учета всяческих нюансов, состоит в том, что чем ниже частота, тем лучше проникающая способность радиоволн. Правда, и тем меньше информационная емкость, то есть количество каналов и скорость передачи, которые можно обеспечить в данном диапазоне. Например, теоретическая пропускная способность базового стандарта Wi-Fi (802.11b) в диапазоне 2,4 ГГц составляет 11 мегабит в секунду, а с использованием частоты 5 ГГц (802.11n) она возрастает до 300 мегабит в секунду. Вместе с тем электромагнитные волны с частотой 5 ГГц могут быть остановлены даже листвой деревьев, а бетонная стена толщиной более 10 см уже для диапазона 2,4 ГГц может стать непреодолимым препятствием. В то же время простой и дешевый маломощный любительский модуль передачи данных на 433 МГц легко преодолевает до полуметра железобетона и более четырех метров кирпичной кладки.

Аналоговое телевидение

9. Любую картинку можно представить как набор точек с различной яркостью. Любую картинку, которую мы видим, можно представить себе как сложную мозаику из мельчайших светящихся точек, как некоторое количество отдельных источников света различной яркости, определенным образом расположенных в пространстве (рис. 13.6). И передать такую картинку на большое расстояние – это значит в месте приема заставить светиться такое же количество светоизлучателей с таким же точно расположением в пространстве и с такой же яркостью, как это было у самой передаваемой картинки. Забудем пока о цвете и объеме, попробуем в мысленном эксперименте создать систему передачи плоской черно-белой (точнее, одноцветной, монохромной) картинки.

Одно из решений задачи – система из светочувствительного экрана с большим числом фотоэлементов и светоизлучающего экрана с большим числом источников света, например лампочек (рис. 13.6; 1). Фотоэлементы и лампочки в строгом порядке расположены на своих экранах и соединены между собой попарно: каждая точка светочувствительного экрана соединена с точно такой по месту расположения точкой светоизлучающего экрана. Поэтому по каждой линии связи в виде электрического сигнала передается информация о яркости одной из точек картинки. А все комплекты фотоэлемент – линия связи – лампочка воссоздают на светоизлучающем экране точечную копию картинки, изображение, сотканное из отдельных светящихся точек, или, иначе, растровое изображение (в оптике растром называют решетку, разбивающую картинку на элементы).

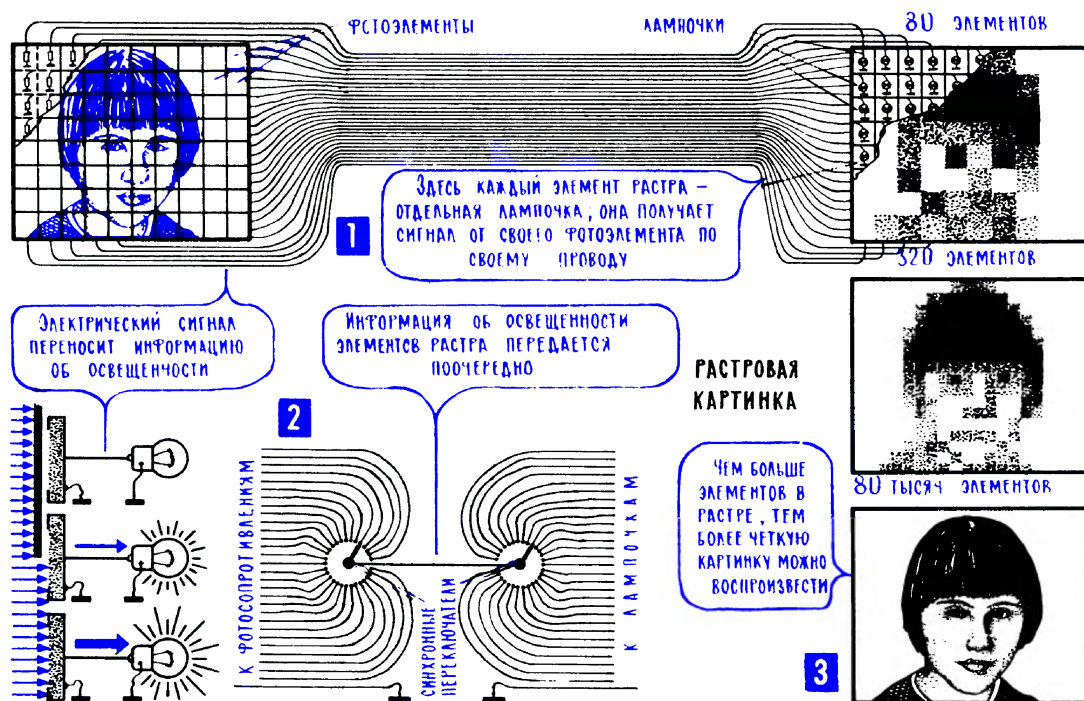


Рис. 13.6. Передача картинки с помощью электрического сигнала

Растровая копия истинной картинки будет тем точнее, тем четче, чем больше элементов в растре (рис. 13.6; 3). Человеческий глаз может видеть очень мелкие детали картинки, и чтобы ее копию сделать неотличимой от сложного и четкого оригинала, нужно было бы иметь растр из десятков миллионов точек.

Но обычно изображение кажется нам достаточно четким, если оно содержит несколько миллионов элементов (примерно такую четкость имеет изображение на экране кино) или даже несколько десятков тысяч элементов (четкость фотографии в газете). В соответствии с принятым в нашей стране стандартом телевизионная картинка может состоять примерно из полумиллиона элементов разной яркости. При этом чувствуется растровая структура картинки, особенно если посмотреть на экран вблизи, однако изображение получается достаточно четким. Но, конечно же, осуществить телевизионную передачу по системе, которую мы выбрали в своем первом мысленном эксперименте, все равно было бы невозможно. Хотя бы потому, что трудно представить себе канал связи, состоящий из полумиллиона отдельных соединительных линий. Например, представить себе, что в каждую квартиру входит телевизионный кабель, в котором полмиллиона проводов.

Примечание редактора. Требования к разрешению картинки (то есть к количеству точек раstra на единицу длины) зависят от разрешения человеческого глаза, которое составляет около одной угловой минуты, и от расстояния от него до изображения. Простые подсчеты показывают, что при таких свойствах глаза четким будет казаться изображение, разложенное на точки размером не более 0,0003 доли расстояния до глаза. То есть для книги, журнала или экрана планшета-смартфона, которые мы рассматриваем с расстояния 30–40 см, величина точки раstra не должна превышать 0,08–0,12 мм, для экрана настольного монитора (расстояние – 50–70 см) – 0,15–0,2 мм, для экрана телевизора (расстояние 2–3 м) – 0,6–1 мм. Из этих цифр выводят величину минимально необходимого пространственного разрешения для различных способов воспроизведения изображений, которое для цифровых изображений обычно измеряется в точках на дюйм, в некоторых случаях – в линиях на дюйм (1 дюйм = 25,4 мм). Так, для типографской печати в размере половины журнальной страницы (примерно 170–180 мм по ширине) или для экранов смартфонов минимальное разрешение принимается равным примерно 250 точек на дюйм, для настольного монитора – около 100–120 точек на дюйм, для телевизора достаточно 25–30 точек на дюйм. Поэтому и экран «айфона» с диагональю 5 дюймов (12,5 см), и экран домашнего кинотеатра шириной в 1,5 м имеют одинаковое общее количество точек, равное 1920×1080, – они предназначены для просмотра с разного расстояния.

Изображения с меньшим разрешением воспринимаются как нечеткие, размытые, однако это не всегда заметно из-за особенностей восприятия: например, для движущихся изображений разрешение может быть меньше необходимого из-за эффекта смазывания при движении, когда мы все равно не успеваем рассмотреть детали. Обычное телевизионное изображение в стандарте PAL или SECAM имеет общее количество точек (пикселей в цифровой терминологии) по длине и ширине, равное 720×576 (0,4-мегапиксельное изображение), а в формате домашней аналоговой записи на кассетах было принято сжимать его еще вдвое, и такая запись тем не менее нормально воспринималась при просмотре. В то время как для качественных фотографий принято намного большее разрешение – 8–10 мегапикселей и более (примерно 4000×2500 точек), иначе они при просмотре в большом размере и особенно при печати на бумаге будут выглядеть нечеткими.

10. Развертка изображения: элементы картинки передаются поочередно по одному каналу связи. В современных системах передачи изображения, таких как телевидение или фототелеграф, картинка передается по одной линии связи. Сама идея передачи картинки по одному проводу чрезвычайно проста: информация о яркости элементов изображения передается поочередно – сначала на приемном экране воссоздается яркость одной точки, затем другой, потом третьей и т. д. (рис. 13.6; 2). Для этого на передающей и на приемной сторонах имеются переключатели, коммутаторы, которые подключают к линии связи сначала одну пару фотоэлемент–лампочка, затем другую, потом третью, четвертую, пятую... В итоге в линию идет серия электрических сигналов, и каждый из них несет информацию о яркости одной из точек картинки. Чтобы такая система работала четко, необходимо выполнить два условия.

Во-первых, нужно, чтобы сами лампочки обладали некоторой световой инерцией, чтобы лампочка светила хотя бы некоторую часть паузы – с того момента, как коммутатор отключился от нее, и до того момента, когда снова придет ее очередь присоединиться к линии связи. Во-вторых, и это самое главное, нужно, чтобы сам коммутатор не вносил путаницы, чтобы переключатели на передающей стороне и на приемной стороне действовали согласованно, чтобы они соединяли фотоэлемент только с его лампочкой и ни с какой другой. А для этого оба переключателя должны двигаться по контактам синхронно и синфазно, с одной и той же скоростью, в каждый момент должны касаться контактов одной и той же пары фотоэлемент–лампочка.

Подобную систему можно осуществить для передачи картинки, разбитой на сотни тысяч и миллионы элементов, но, конечно, при столь большом числе элементов раstra используются не механические переключатели, а электронные.

11. Передающая телевизионная трубка: большое количество фотоэлементов, поочередно включаемых электронным лучом. На рис. 13.7; 1 очень упрощенно показано устройство одной из разновидностей передающей телевизионной трубки – иконоскопа. Ее основа – мозаичный фотокатод, пластинка, покрытая мельчайшими светочувствительными серебряно-цезиевыми крупинками, каждая из которых фактически представляет собой микроскопический фотоэлемент. Картинка, которую нужно превратить в серию электрических сигналов, с помощью объектива проектируется на светочувствительную мозаику фотокатода. При этом каждая крупинка-фотоэлемент получает свою порцию света и, как полагается фотоэлементу, создает свою электродвижущую силу, пропорциональную освещенности: чем больше света падает на крупинку-фотоэлемент, тем большую ЭДС она вырабатывает. В итоге на фотокатоде создается невидимая электрическая картинка, повторяющая картинку световую. И острый электронный луч, двигаясь по фотокатоду от одной его точки к другой, прочерчивает всю эту электрическую картинку и поочередно подключает крупинки-фотоэлементы к нагрузке. А значит, по мере движения луча по резистору нагрузки R_n идет ток, в котором отражена освещенность той или иной точки фотокатода. То есть по мере движения электронного луча происходит развертка изображения, по нагрузке идут серии электрических сигналов. Последовательно, точку за точкой они описывают на электрическом языке картинку, которую нужно передать (рис. 13.6; 2).

Это, конечно, очень упрощенный рассказ о событиях в иконоскопе и его устройстве, в действительности все происходит сложнее и интереснее. Так, например, электронный луч сразу считывает информацию с большого числа светочувствительных крупинок, а не с одной. Современная технология, в принципе, позволяет создать на фотокатоде светочувстви-

тельные точки строго определенных размеров и расположенные в строгом порядке. Однако намного проще делать фотокатод с беспорядочно расположенными, но зато очень мелкими светочувствительными крупинками, значительно более мелкими, чем один элемент раstra. В этом случае одним элементом раstra, одним фотоэлементом оказывается сразу несколько светочувствительных крупинок, попадающих в сферу действия электронного луча.

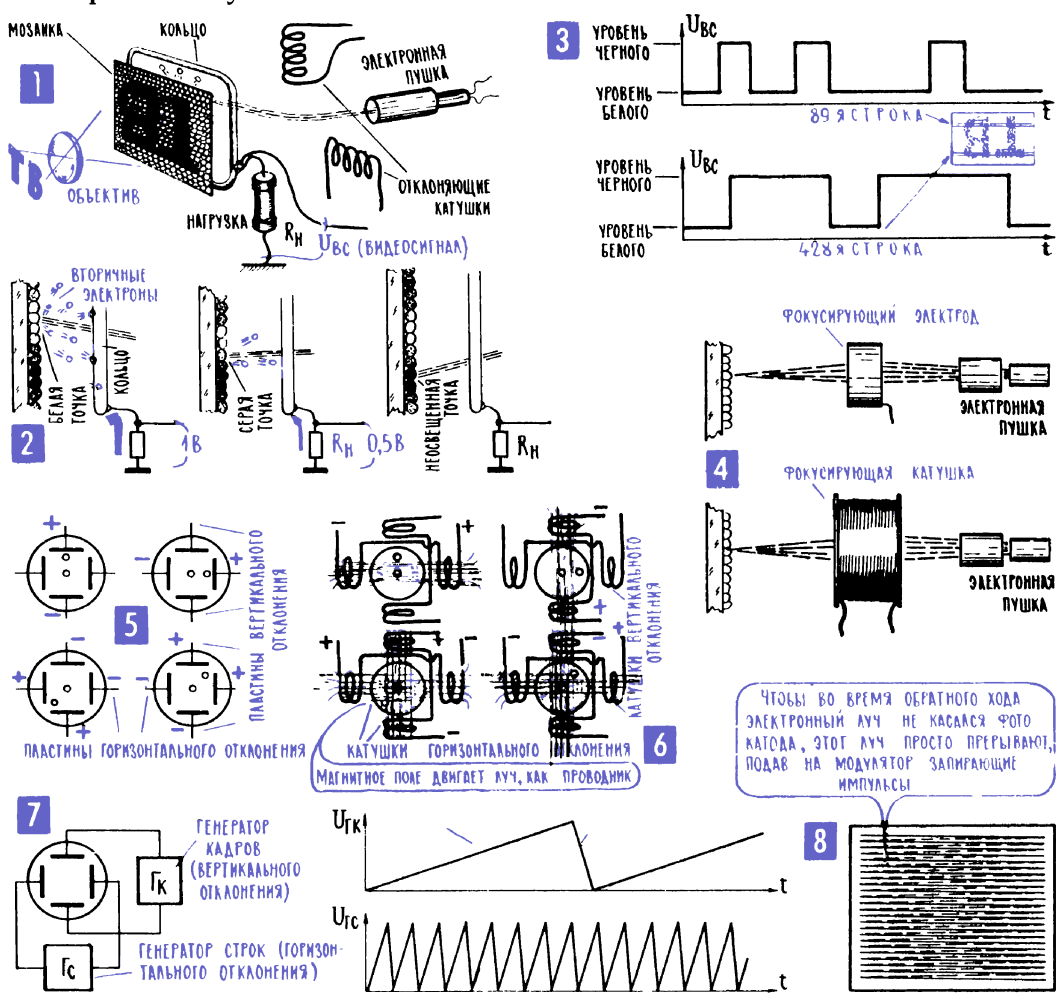


Рис. 13.7. Простейшая передающая телевизионная трубка – иконоскоп

А вот другая интересная подробность: главную роль в поочередном подключении крупинок-фотоэлементов к сопротивлению нагрузки играют вторичные электроны. Их выбивает из фотокатода электронный луч, а собирает кольцо-коллектор. Количество вторичных электронов, выбитых с какого-либо участка фотокатода, зависит от того, насколько интенсивно

этот участок освещен. Именно вторичные электроны, частично отвечающие на сопротивление нагрузки, создают в нем ток, пропорциональный освещенности той или иной точки фотокатода.

12. В электронно-лучевой трубке формирование и отклонение электронного луча осуществляются электрическими или магнитными полями. Электронный луч, который в иконоскопе осуществляет развертку изображения, формируется в несколько приемов. В какой-то части иконоскоп, как и другие электронно-лучевые трубки, похож на многоэлектродную усилительную лампу (гл. 10; 13). Источник электронов, как всегда, раскаленный катод, роль анода выполняет кольцо-коллектор, на котором относительно катода действует большой «плюс». Правда, если в лампе электроны, вылетевшие с катода, сами попадают на анод, то в трубке они достигают кольца-коллектора с пересадкой, точнее даже с заменой. Быстрые и собранные в острый луч первичные электроны проскакивают сквозь кольцо, ударяют в фотокатод, из него вылетают медленные вторичные электроны, которые собираются на кольце-коллекторе под действием притягивающего «плюса». Это самый настоящий динаatronный эффект (рис. 10.8; 6), но, в отличие от лампы, здесь он не мешает нормальной работе, а работает сам.

Прежде всего электроны проходят сквозь отверстие в управляющем электроде (его часто называют модулятором или еще управляющим цилиндром), который играет ту же роль, что и управляющая сетка в усилительной лампе. Меняя напряжение на управляющем электроде, мы меняем интенсивность электронного потока, меняем количество электронов, образующих луч, то есть меняем ток луча.

Затем электроны проходят отверстие в ускоряющем электроде, который иногда называют первым анодом. Назначение ускоряющего электрода отражено в самом его названии: на этот электрод так же, как и на кольцо-коллектор, подан большой «плюс», который разгоняет электроны, дает им энергию, чтобы пройти через все последующие испытания.

Следующий цикл обработки электронного потока – фокусировка, собирание электронов в узкий луч, который сходится в точку на самом светочувствительном экране. Фокусировка бывает электростатическая и магнитная. В первом случае используется то, что электрон обладает отрицательным зарядом и его можно смещать в пространстве, действуя электрическим полем – «плюс» подтягивает электроны к себе, «минус» их отталкивает. Для электростатической фокусировки в трубку вводится еще один фокусирующий электрод (рис. 13.7; 4). На него подается некоторое постоянное напряжение, и оно вместе с напряжениями на других электродах так отклоняет движущиеся электроны, чтобы луч сфокусировался, сжался в точку в самой плоскости фотокатода.

В системах магнитной фокусировки используется то, что движущийся заряд обладает магнитным полем (гл. 5: 1), а значит, на него можно влиять внешним магнитным полем. Фокусирующая катушка расположена снаружи трубки, она изгибает траекторию электронов совсем не так, как фокусирующий электрод, но конечный результат получается таким же (рис. 13.7; 4). Точную фокусировку можно получить, меняя внешнее магнитное поле, то есть меняя ток в фокусирующей катушке.

Следующая операция – отклонение луча в пространстве, она также осуществляется с помощью электрических или магнитных полей. В телевизионных системах производится строчная развертка изображения; луч строку за строкой прочерчивает экран в горизонтальном направлении, постепенно смещаясь вниз. Чтобы перемещать электронный луч, достаточно иметь две системы отклонения – горизонтальную и вертикальную (рис. 13.7; 5, 6). Первую из них называют строчной разверткой, вторую – кадровой разверткой. В трубках с электростатическим отклонением имеются две пары пластин (рис. 13.7; 5); меняя напряжение, которое к ним прикладывается, можно перемещать луч вверх-вниз и влево-вправо. Точно так же магнитное отклонение луча осуществляется расположенными вне трубки отклоняющими катушками (рис. 13.7; 6): меняя в них ток, меняют и магнитное поле, отклоняющее электронный луч (см. рис. 5.6).

13. Генераторы кадровой и строчной развертки дают пилообразные напряжения разной частоты. Для отклонения луча в комплекте с трубкой согласованно работают два генератора – кадровый и строчный. Первый из них дает меняющееся напряжение, которое сравнительно медленно сдвигает луч сверху вниз, второй дает меняющееся напряжение, которое заставляет луч сравнительно быстро двигаться справа налево, прочерчивать строку за строкой. Чтобы луч двигался равномерно и всем точкам фотокатода уделял одинаковое внимание, задерживался на каждой из них одно и то же время, нужно, чтобы к отклоняющим пластинам подводилось пилообразное, то есть равномерно нарастающее, напряжение (рис. 13.7; 7).

Прочертив строку, луч должен очень быстро вернуться в исходное положение и начать считывание следующей строки. Точно так же кадровая пила, переместив луч через весь фотокатод сверху вниз, должна быстро поднять луч обратно, вверх, и начать новый цикл прочерчивания строк. Во время обратного хода луч может внести путаницу, вторично попадая на одни и те же точки светочувствительного катода. Чтобы этого не случилось, на время обратного хода луч убирают, подав запирающее напряжение на управляющий электрод.

Таковы в общих чертах процессы развертки изображения в передающей трубке, процессы, в результате которых картинка превращается в видеосигнал $U_{\text{вс}}$.

14. Приемная трубка (кинескоп): электронный луч, пробегая по люминофорному экрану, создает в разных точках свечение различной яркости. Иконоскоп в принципе не изменил нашу первую систему преобразования световой картинке в электрические сигналы (рис. 13.6; 2); и в том, и в другом случае использовался один и тот же физический процесс, просто фотоэлементы перестали быть самостоятельными деталями, а превратились в мельчайшие светочувствительные точки на фотокатоде. Что же касается приемного светоизлучающего экрана, то здесь не отделаешься простым уменьшением лампочек накаливания.

Для создания световой копии картинке используются особые вещества – люминофоры, которые светятся под действием электронной бомбардировки. Яркость такого свечения тем больше, чем выше энергия электронов и чем больше их попадает в люминофор за единицу времени. То есть если направить на люминофорную точку электронный луч, то можно менять ее яркость, изменяя ток луча (рис. 13.8; 2, 3). Ну, а дальше уже, как говорят шахматисты, дело техники. Создается электронно-лучевая трубка с люминофорным экраном – кинескоп (рис. 13.8; 1). На этот экран направляют острый электронный луч и заставляют его прочерчивать строку за строкой, двигаясь синхронно и синфазно с лучом иконоскопа. Одновременно меняют ток луча в кинескопе в соответствии с информацией, поступившей от иконоскопа (рис. 13.8; 4). В тот момент, когда луч иконоскопа считывает информацию с сильно освещенного участка фотокатода и по нагрузке R_n идет сравнительно большой ток, растет напряжение $U_{вс}$, которое «плюсом» подается на модулятор кинескопа (рис. 13.8; 4) и уменьшает действующий там «минус» смещения (часто видеосигнал $U_{вс}$ подается на катод кинескопа, что также меняет напряжение между модулятором и катодом). При этом увеличивается ток луча в кинескопе, и на его экране появляется яркая точка. А поскольку оба луча – в иконоскопе и в кинескопе – всегда находятся в одних и тех же точках раstra, то картинка на люминофорном экране кинескопа оказывается точной копией картинке на фотокатоде иконоскопа.

В устройстве кинескопа (рис. 13.8; 1) узнается много знакомых деталей. Катод, управляющий электрод (именно на него подается сигнал, который меняет ток луча, меняет яркость свечения точек экрана), ускоряющий электрод (первый анод), фокусирующий электрод, катушки вертикального и горизонтального отклонения луча (на них подаются отклоняющие пилообразные напряжения строчной и кадровой развертки). Роль второго, главного анода в кинескопе выполняет аквадаг⁴ – токопроводящее покрытие, нанесенное изнутри на стекло трубки, на второй анод подается очень высокое напряжение 15, иногда и 20 тысяч вольт. Эти цифры не требуют

⁴ Аквадаг – суспензия мелкодисперсного графита в воде с добавками, применяемая для формирования тонкого электропроводящего слоя графита. Также аквадагом называют собственно слой, сформированный таким образом.

комментариев: работая с телевизором, занимаясь его наладиванием или ремонтом, нужно соблюдать чрезвычайную осторожность!

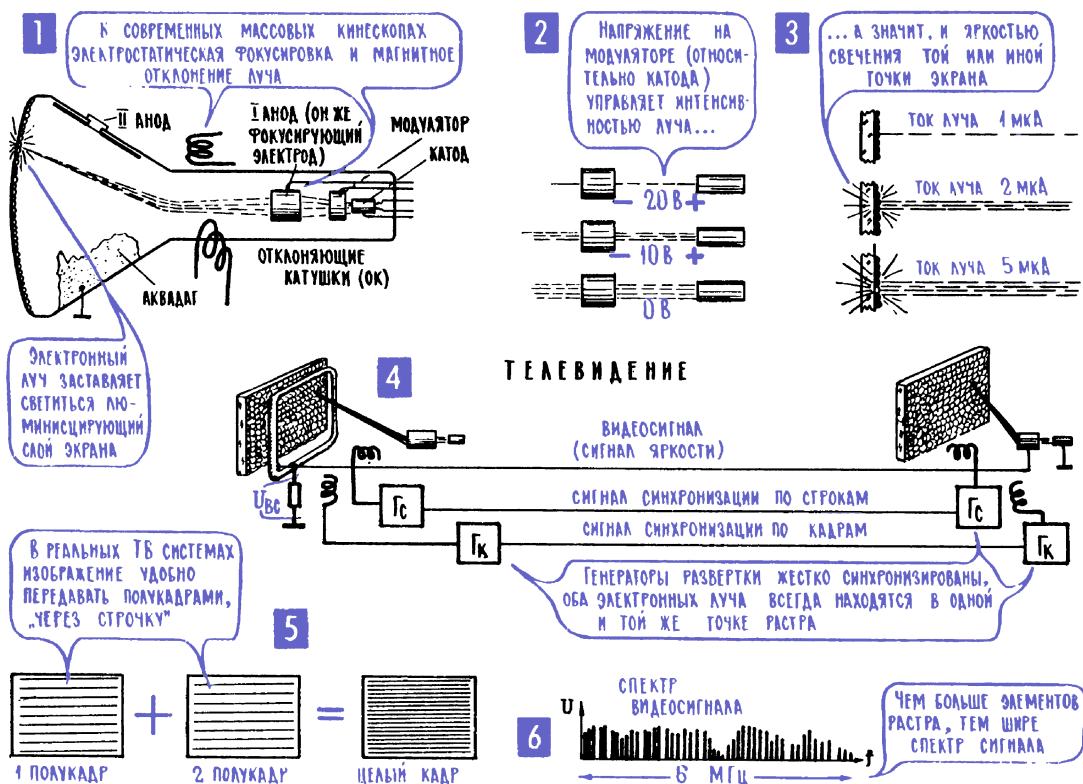


Рис. 13.8. Приемная телевизионная трубка – кинескоп

Первичные электроны, то есть быстрые электроны самого луча, на второй анод не попадают – они ударяют в люминофорный экран, заставляют его светиться и при этом выбивают из экрана медленные вторичные электроны. Вот их-то и собирает второй анод (рис. 13.8; 1) и отправляет обратно к источнику высокого напряжения. Этот процесс имеет принципиальное значение; если бы не выбрасывание вторичных электронов, то на люминофорном экране накапливались бы электроны самого луча и через некоторое время у экрана был бы гигантский отрицательный заряд. Таким образом, в кинескопе так же, как и в иконоскопе, замкнутая электрическая цепь создается с участием вторичных электронов.

Теперь, имея в своем распоряжении комплект-минимум, необходимый для передачи изображения, мы можем несколько более подробно рассмотреть работу всей системы, познакомиться с ее важнейшими характеристиками и с теми требованиями, которые нужно выполнить, чтобы картинка на экране кинескопа действительно была копией картинка на фотокатоде иконоскопа.

Примечание редактора. Вместо вакуумной трубки-кинескопа ныне используется прямоугольная матрица из отдельных жидкокристаллических точек, приобретающих под действием подведенного напряжения различную прозрачность, и подсвеченная с тыла люминесцентным или светодиодным светильником. Существуют и светодиодные матрицы, отдельные точки в которых сами светятся с разной яркостью в зависимости от заданного уровня тока. Однако замена кинескопа на плоские жидкокристаллические или светодиодные экраны произошла значительно позже, чем замена различных передающих вакуумных трубок на светочувствительную полупроводниковую матрицу, осуществленная еще в 1970–1980-х годах. Причем передающие трубки тоже как минимум на 15–20 лет пережили всех остальных своих родственников среди вакуумных электронных ламп, век которых полностью закончился еще в 1960-е годы. Но кинескоп, прототип которого был создан в конце XIX века немцем Фердинандом Брауном, намного перекрыл и их – он оказался, наверное, вообще самым долгоживущим типом электронного компонента среди применяемых в массовом масштабе. Кинескоп оставался основным устройством для воспроизведения изображений около 90 с лишним лет, если считать от 1907 года, когда учитель изобретателя телевидения Владимира Зворыкина Борис Розинг подал заявку на изобретение «Способ электрической передачи изображений на расстоянии», и до начала 2000-х, когда громоздкие кинескопы стали вытесняться плоскими экранами на основе различных технологий.

Причем жидкокристаллические дисплеи и телевизоры входили в обиход не без серьезного сопротивления, особенно со стороны профессиональной части пользователей – поначалу у ЖК-экранов цветопередача была намного хуже, чем у цветных кинескопов, доведенных к тому времени до возможного идеала. Дело еще осложнялось тем, что ЖК-экраны достаточно большого размера оказывались по тем временам непомерно дорогими. И сейчас еще у многих дома или на даче работают не такие уж и старые телевизоры на основе кинескопа, особенно с маленькими диагоналями – для них габариты и вес кинескопа не играли такой роли, зато продукт оказывался заметно дешевле, и производство небольших телевизоров с кинескопами продолжалось почти до конца 2000-х.

15. Для передачи движущихся изображений необходима частая смена кадров. Если бы понадобилось передавать неподвижное изображение, как, скажем, в фототелеграфе, то с передачей одного кадра, одной целой картинки можно было бы не спешить: имея кинескоп с достаточно большим послесвечением люминофора, каждый кадр можно было бы передавать несколько секунд, а то и несколько минут. Другое дело, если нужно передавать движущееся изображение – в этом случае, как и в кино, кадры должны часто сменять друг друга, время на передачу одного кадра составляет доли секунды. В кино смена кадров происходит 24 раза в секунду, почти такая же частота – 25 кадров в секунду – принята и для телевидения⁵. Правда, в

⁵ Такая частота принята в отечественном стандарте SECAM, а также в европейском PAL (см. далее), она соответствует половине частоты переменного тока 50 Гц. В США, Японии и Канаде (стандарт NTSC) принята частота смены кадров 30 Гц в соответствии с частотой переменного тока 60 Гц, принятой в этих странах. Для телевизионного изображения такая частота смены кадров считается приемлемой, так как оно рассматривается издали. Для компьютерных мониторов безопасная для глаз частота начинается с величины 85 кадров в секунду. Современные цифровые телевизоры, впрочем, также обеспечивают кадровую развертку не менее 100 Гц.

телевидении, для того чтобы уменьшить мелькания картинки, передаются не целые кадры, а полукадры, и сменяют они друг друга в два раза чаще. Сначала, например, передаются все четные строки (первый полукадр), потом все нечетные (второй полукадр), потом опять все четные (первый полукадр) и т. д.⁶ При этом число полных кадров остается таким же, как в кино (то есть 25 кадров в секунду), а картинка меняется в два раза чаще (50 раз в секунду), что как раз и уменьшает мелькания экрана (рис. 13.8; 5). Что же касается отделения четных строк от нечетных, поочередной передачи полукадров и точного размещения строк на экране, то подобные задачи в электронных схемах решаются не очень-то сложными методами.

Итак, с кадровой разверткой все более или менее ясно: генератор кадровой развертки должен давать пилообразное напряжение с частотой 50 Гц. Теперь несколько слов о количестве строк и частоте генератора строчной развертки.

16. С увеличением числа строк возрастает четкость картинки, однако одновременно сильно расширяется спектр телевизионного сигнала. Тот факт, что четкость изображения зависит от числа строк, не требует, по-видимому, особых пояснений: чем больше строк прочерчивает луч в иконоскопе, а значит, и в кинескопе, тем тоньше каждая строка и тем более мелкие детали картинки могут быть переданы (рис. 13.6). В разных странах существуют разные телевизионные стандарты, выбрано разное число строк телевизионного раstra. В Великобритании, например, 405 строк, в США и Канаде – 525 строк, во Франции – 819 строк. В Советском Союзе, Венгрии, Польше, ГДР, Чехословакии, Болгарии и многих других странах стандартом установлено разделение кадра на 625 строк.

Примечание редактора. Приведенные автором количества строк соответствуют черно-белым телевизионным стандартам для различных регионов примерно на начало 1960-х годов. В дальнейшем, с приходом цветного телевидения в конце 1960-х, стандарты более унифицировались и соответствуют трем основным системам: PAL (Западная Европа, кроме Франции, большая часть Африки и Азии, включая Австралию) и SECAM (часть Восточной Европы, а также Франция, страны экс-СССР, включая Прибалтику, Украину, Белоруссию, Россию, Кавказ и ряд азиатских, а также африканских стран) оба имеют полное количество строк 625, реальное, с учетом потерь при обратном ходе луча кадровой развертки, – 576, но различаются способами передачи цветного сигнала (см. далее раздел 18). В США, Канаде, Японии был принят стандарт NTSC – полное количество строк 525, реальное 480. Эти стандарты имеют большое количество разновидностей, принятых в разных странах, различающихся деталями. Все современные телевизоры являются мультисистемными, то есть могут автоматически распознавать стандарт и подстраиваться под него, поэтому, например, российские операторы кабельных каналов часто ведут передачи в западных стандартах.

⁶ Так называемая чересстрочная развертка, обозначается буквой *i* (от англ. *interlacing*) вдобавок к числу строк стандарта (например, 625i). Обычная построчная (прогрессивная) развертка, когда строки идут подряд, обозначается буквой *p* (от слова *progressive*).

В принципе, можно было бы передавать изображение с более высокой четкостью, чем это предусмотрено мировыми стандартами, телевизионная техника позволяет прочерчивать кадр тысячами и даже десятками тысяч строк. Однако повышение четкости, увеличение числа строк не достается даром, оно сопровождается расширением спектра телевизионного сигнала (рис. 13.8; 6).

Спектр телевизионного сигнала не остается постоянным, в процессе передачи он меняется и зависит от того, какая картинка, какое изображение в данное время передается. Чем мельче детали картинки, тем чаще меняется ток в процессе развертки изображения, тем, следовательно, выше частота телевизионного сигнала. В реальной картинке могут быть детали самых разных размеров, и в спектре телевизионного сигнала могут быть самые разные частоты.

Будем считать, что нижняя граница спектра начинается от нуля, то есть от постоянной составляющей (в действительности так оно и есть, в спектре должны быть не только чрезвычайно низкие частоты, доли герца, но и постоянная составляющая: в ней отражены очень медленные изменения средней яркости), и попробуем определить, чему же равна наивысшая частота спектра, его верхняя частотная граница. Чтобы подсчитать эту наивысшую частоту, представим себе, что передается картинка в виде шахматной доски с мельчайшими клеточками, размер каждой клеточки равен высоте строки (рис. 13.9; 1). Расчет будем вести для нашего стандарта, то есть для кадра, разделенного на 625 строк. Если бы кадр был квадратным, то на нем разместилось бы $625 \times 625 = 390\,625$ клеточек. А поскольку кадр продолговатый, соотношение его сторон по стандарту равно 4:3, то клеточек будет на 30 % больше, то есть примерно 520 000⁷.

Это значит, что по мере развертки такого изображения уровень сигнала на выходе иконоскопа будет меняться 520 000 раз. Если предположить, что черным клеточкам соответствует один положительный полупериод телевизионного сигнала, а белым – отрицательный и что луч иконоскопа обегает этот кадр за 1 с, то окажется, что телевизионный сигнал имеет частоту 260 кГц. Но это еще не все: в действительности за 1 с передается не один кадр, а 25, и максимальная частота оказывается еще в 25 раз выше, то есть примерно составляет 6 МГц. Конечно же, такая картинка, как шахматная доска из полумиллиона микроскопических клеточек, никогда не передается, но мелкие детали размером с толщину строки, как правило, есть на любой картинке. Информация об этих деталях как раз и передается высокочастотными составляющими спектра (рис. 13.9; 2).

Из нашего простейшего расчета видно, что с увеличением числа строк резко (в квадратичной зависимости) возрастает высшая частота спектра,

⁷ В действительности часть строк теряется при обратном ходе луча кадровой развертки, поэтому реальный размер кадра в стандартах PAL или SECAM равен 720×576 . Однако ширина полосы сигнала рассчитывается на полный теоретический кадр.

а это влечет за собой дополнительные трудности в усилении и преобразовании телевизионного сигнала. Не говоря уже о том, что увеличивается полоса частот, которую должен занимать в эфире телевизионный передатчик (гл. 13; 7).

Четкость изображения принято оценивать числом вертикальных линий, которые еще можно различить в картинке. Горизонтальные линии, сами строки ни о чем не говорят, они появляются на экране кинескопа в результате развертки, и строчная структура раstra прекрасно видна даже в том случае, когда никакой картинки нет вообще. На испытательной таблице имеется рисунок с расходящимися вертикальными линиями или с параллельными линиями разной толщины, и возле этого рисунка стоят цифры, которые говорят о том, какому числу строк эквивалентна данная четкость. Если четко различаются линии в районе цифры 550, то это значит, что картинка имеет четкость, какая была бы при разделении раstra на 550 строк. А если различаются линии в районе цифры 625, то, значит, картинка передается с максимально возможной четкостью. Практически максимальную четкость увидеть никогда не удастся – либо на самом передатчике, либо в приемнике, в его усилителях, резонансных фильтрах или в антенне самые высшие частоты телевизионного сигнала заваливаются, и это, конечно, приводит к снижению четкости⁸.

Примечание редактора. В современных цифровых системах (и телевизионных, и компьютерных) передача изображения осуществляется совершенно аналогично процессу, описанному автором применительно к старинным иконоскопам и кинескопам. Разница только том, что сигнал на выходе цифровой матрицы (используемой вместо иконоскопа на передающей стороне) для каждой точки изображения сразу оцифровывается, передается в таком виде по сетям связи, а затем опять преобразуется в аналоговый вид (то есть в величину тока или напряжения) в приемном устройстве. По мере развития этой области возникали все новые стандарты входных сигналов для отображающих устройств (дисплеев), отличающиеся тем, где именно происходит конечное преобразование из цифры в аналоговую форму.

Эти стандарты (интерфейсы) можно увидеть на задней стенке любого видеоманитона или на панели видеокарты настольного компьютера: цифровой сигнал может преобразовываться в аналоговый еще в приемнике и передаваться в виде традиционных уровней напряжения для каждой точки (интерфейсы VGA, RGB или S-video) или поступать в дисплей непосредственно в цифровой форме (интерфейсы DVI или HDMI). Все современные плоские ЖК- или светодиодные экраны по своей природе все равно требуют сигнала в цифровой форме, поэтому промежуточное преобразование в устаревших интерфейсах VGA или RGB только портит картинку.

⁸ Если телевизионный сигнал аналоговый и воспроизводится на аналоговом телевизоре; у цифрового телевидения четкость значительно выше и определяется в основном разрешением дисплея и применяемыми алгоритмами сжатия сигнала (см. далее «Примечание редактора»).

Вещательный сигнал с традиционных аналоговых телепередатчиков, которые еще довольно широко распространены, в том числе и в России, после усиления на входе телеприемника также оцифровывается и в дальнейшем передается на дисплей. Общее число передаваемых точек изображения в каждом кадре для стандартного телевидения соответствует разрешению экрана в 720×576 точек (российский стандарт SECAM или европейский PAL) или в 640×480 (американский NTSC и компьютерный стандарт VGA), то есть составляет около 300–450 тысяч. Для цветного изображения (см. далее) каждая из точек несет информацию о трех цветах, по одному байту для каждого из цветов, то есть общее количество информации равно для каждого кадра 1–1,5 мегабайта. О единицах информации (байтах и мегабайтах) и необходимом их количестве для представления изображений см. также гл. 16; 7.

17. Телевизионные передачи могут вестись только на ультракоротких волнах. В нашей системе передачи изображения передающая трубка и приемная пока связаны проводами (рис. 13.8; 4). По этим проводам идет то, что мы называем видеосигналом, – меняющийся ток (напряжение) с очень широким спектром, от постоянной составляющей до примерно 6 МГц. Такую систему можно сравнить с передачей электрической копии звука по телефонным проводам (гл. 8; 5). А чтобы передавать телевидение без проводов, нужен еще канал радиосвязи – передатчик с антенной, излучающей радиоволны, и приемник, улавливающий эти радиоволны и вновь превращающий их в электрический сигнал (гл. 13; 5).

Когда передавался звук, то высокочастотный ток в радиопередатчике модулировался звуковым сигналом, модулировался низкочастотным током, а в приемнике детектор выделял этот низкочастотный ток. Те же самые операции нужно проделать и с электрической копией картинки, с видеосигналом, который появляется на выходе передающей телевизионной трубки (рис. 13.9; 3). Но есть большая разница между передачей по радио звукового и телевизионного сигнала, причем прежде всего разница количественная: спектр видеосигнала в несколько тысяч раз шире, чем спектр звукового сигнала. Для нормальной модуляции нужно, чтобы несущая частота радиопередатчика была бы по крайней мере в несколько раз выше, чем максимальная модулирующая частота. Это значит, что для передачи видеосигнала, наибольшая частота которого, как мы только что подсчитали, 6 МГц, нужен передатчик с несущей частотой в несколько десятков мегагерц, то есть передатчик, работающий на ультракоротких волнах (гл. 13; 8).

Если бы при передаче изображения, как это было при передаче звука, излучались обе боковые полосы частот (гл. 13; 7), то каждый телевизионный передатчик занимал бы в эфире полосу частот больше 12 МГц, столько же, сколько понадобилось бы для 1200 радиотелефонных передатчиков. Чтобы уменьшить полосу частот, занимаемую телепередатчиком, одну из его боковых полос в антенну не пускают, и в эфир излучается только одна

ча займет одним-единственным каналом самую скоростную линию связи, например Wi-Fi, притом работающую в идеальных условиях – пропускной способности реальной линии, скорее всего, не хватит. Путем различных ухищрений, характерных еще для традиционного телевидения (чересстрочная развертка, передача цветоразностной информации вместо полных трех цветов) можно снизить требования примерно вдвое-втрое, но все равно очень немногие линии передачи способны выдержать такую нагрузку, и при этом для других каналов места уже не остается. Поэтому цифровое телевидение при передаче по линиям связи (через эфир или по кабелю), а также при записи на различные носители всегда дополнительно подвергают операции сжатия информации, что позволяет снизить требования к линиям передачи и емкости носителей в десятки раз.

Для телевизионных передач сначала было выделено 12 частотных каналов в диапазоне метровых волн (рис. 13.9; 5), а затем к ним добавили еще 60 каналов в диапазоне дециметровых волн. Из-за особенностей распространения ультракоротких волн (гл. 13; 8) телевизионные передачи можно принимать только на расстоянии прямой видимости или немного дальше. Чтобы расширить зону уверенного приема, передающую антенну стараются поднять повыше, но даже антенны, установленные на верхушке высочайшей Останкинской телевизионной башни, создают зону уверенного приема радиусом лишь до 120–150 км. Передача телевизионных программ на большие расстояния ведется по радиорелейным или кабельным линиям либо через искусственные спутники Земли; их антенны подняты уже настолько высоко, что перебрасывают ультракороткие волны на многие тысячи километров.

Между прочим, в том, что ультракороткие волны распространяются только на сравнительно небольшие расстояния, кроме недостатков, есть одно важное достоинство – удаленные телепередатчики могут работать на одних и тех же частотах, не мешая друг другу. Поэтому в разных городах страны совершенно разные программы передаются на одних и тех же телевизионных каналах, и даже основных двенадцати каналов хватает для многих сотен телепередатчиков.

18. Используя люминофоры красного, синего и зеленого свечения и передав по телевизионному каналу информацию об окраске объекта, можно воспроизвести многоцветную картинку. Простейшие опыты с акварельными красками подтверждают: любой цвет радуги можно получить, смешивая в определенной пропорции краски трех основных цветов – красного, синего и зеленого. Такое смешение лежит в основе цветной фотографии и цветного кино: на киноплёнке, например, три тончайших слоя эмульсии, три одноцветных изображения – красное, синее и зеленое. В разных местах кадра они имеют разную плотность и, складываясь в разных пропорциях, дают многокрасочную картинку.

Примечание редактора. Автор путается в принципах смешения цветов – акварельные краски на бумаге отражают свет, и смешение красного, синего и зеленого здесь не даст нужного эффекта, так как цвета не складываются, а вычитаются друг из друга (т. н. субтрактивные цвета – при смешении в одинаковых пропорциях они должны вычитаться друг из друга и по идее дать черный цвет). Так, при смешении красного и зеленого на бумаге вместо желтого получится темный грязно-коричневый. Аналогичный эффект получится при печати цветной фотографии или изображения типографским способом. Для таких изображений три компонента цвета подбирают другим способом: это желтый, пурпурный и бирюзовый.

Красный, синий и зеленый компоненты употребляют для получения цветных картинок при излучении света или прохождении его через цветные фильтры (аддитивные цвета – при смешении они должны дать белый цвет). Для иллюстрации смешения цветов нужна либо достаточно частая смена цвета источников (например, светодиодов), либо они должны быть достаточно мелкими, чтобы зрительно сливались в одну точку. Красный, синий и зеленый цвета можно рассмотреть в каждой точке на экране телевизора или монитора (см. далее), разглядывая его через сильное увеличительное стекло.

Подобным же образом, передав по каналам связи три составляющие многоцветного объекта – красную, синюю и зеленую, а затем в месте приема сложив их на общем экране, можно получить цветное телевизионное изображение. В принципе, задача эта решается несколькими разными способами. Иногда, например, создаются три совершенно одинаковых телевизионных канала, для одновременной передачи трех составляющих цветной картинки. Или по очереди передаются три кадра – красный, синий и зеленый.

Само сложение трех картинок на общем экране тоже можно осуществить по-разному. Например, с помощью трех кинескопов с красным, синим и зеленым светофильтрами и системы зеркал. Или воспользоваться тем, что химики научились делать люминофоры, которые дают свечение разных цветов, изготовить на их основе кинескопы с красным, синим и зеленым свечением и опять-таки сложить три картинки на общем экране. Или, наконец, взяв за основу масочный кинескоп, в котором три электронных луча одновременно рисуют три совмещенные друг с другом картинки трех основных цветов (рис. 13.10; 3).

На мозаичном экране этого кинескопа примерно полтора миллиона мельчайших (диаметр меньше 0,3 мм) точек трех разных сортов люминофоров – с красным, синим и зеленым свечением, примерно по пятьсот тысяч точек каждого цвета. Люминофорные точки расположены в строгом порядке, тройками, место каждой точки на экране выдерживается с точностью до 0,005 мм. Перед экраном – тонкая (толщина 0,15 мм) стальная маска, и в ней столько же мельчайших дырочек, сколько люминофорных троек на экране, то есть около пятисот тысяч.

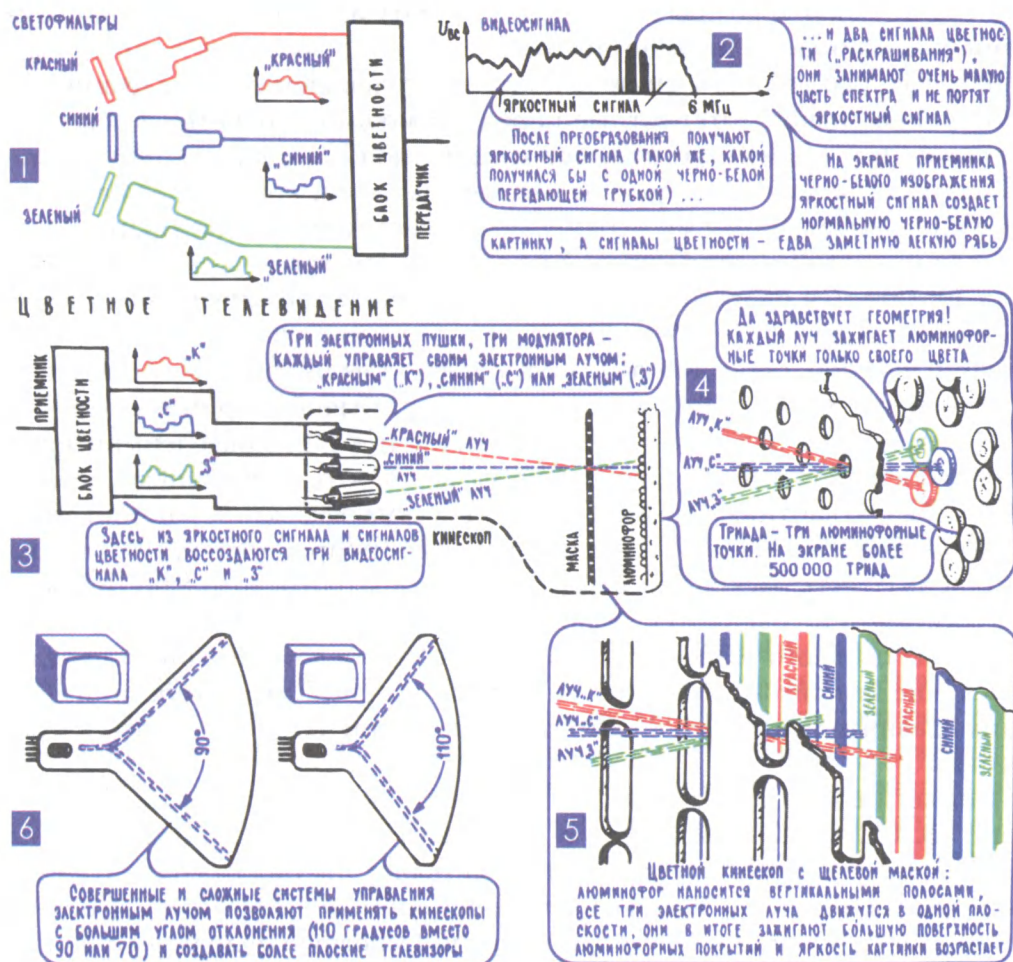


Рис. 13.10. Передача цветного изображения

В массовом кинескопе три электронных луча, их одновременно перемещает общая отклоняющая система, но током каждого луча можно управлять в отдельности. Все три луча попадают на экран, только пройдя через отверстие в маске. А поскольку лучи приходят к маске под разными углами, то и отверстие они тоже проходят под разными углами и попадают в разные точки экрана. В массовом кинескопе все рассчитано так, чтобы каждый луч попадал на люминофорные точки только одного цвета. Поэтому один луч рисует только красную картинку, второй - только синюю, третий - только зеленую. А на электроды, управляющие током этих лучей, соответственно подаются три разных сигнала - один несет информацию о красной составляющей картинки, второй - о синей, третий - о зеленой. В итоге на экране «одна в другой» появляются три картинки трех основных

цветов, а так как точечная структура экрана издали незаметна, то эти картинки сливаются в одну многоцветную.

Важная особенность систем цветного телевидения – их совместимость. Это значит, что цветные передачи можно смотреть на обычном черно-белом телевизоре, разумеется, в черно-белом виде, а цветной телевизор показывает и черно-белые передачи, но, конечно, тоже в черно-белом виде. К тому же в совместимых системах передатчик цветного телевидения занимает такую же полосу частот, как и черно-белый. Все это достигается благодаря целому ряду очень остроумных технических решений.

При цветной передаче передается черно-белая картинка, которая в цветном телевизоре «раскрашивается», а в обычном принимается, как она есть, в черно-белом виде. При этом используется одна очень интересная особенность нашего зрения: оказывается, что, раскрашивая четкую черно-белую картинку, можно получить весьма эффектное многоцветное изображение, не прорисовывая в красках всех подробностей, всех мелких деталей. То есть раскрашивание можно производить довольно грубыми мазками, это не очень-то сильно отразится на четкости. В совместимых системах цветного телевидения вместе с черно-белой картинкой передаются еще два сигнала «раскрашивания», два сигнала цветности, имеющих сравнительно узкий спектр, так как особой четкости от них не требуется.

Сигналы цветности «втискивают» в спектр черно-белого видеосигнала (рис. 13.10; 2), практически не ухудшая этим основного изображения: на экране черно-белого телевизора из-за сигналов цветности создается едва заметная мелкая рябь. Такой способ передачи можно сравнить с исполнением трех разных мелодий на одном рояле. Основную мелодию играют на всей клавиатуре, сопровождают ее богатым аккомпанементом, мощными аккордами на басах. А двум другим, вспомогательным мелодиям достается всего несколько клавиш в районе самых высоких нот. Непосвященный человек и не заметит легкого попискивания вспомогательных мелодий, так же как черно-белый телевизор оставляет без внимания сигналы цветности. А в цветном телевизоре эти сигналы выделяются из спектра и бережно обрабатываются.

В цветном телевизоре сигналы цветности вместе с основным черно-белым сигналом сложным образом преобразуются, и в итоге восстанавливаются три исходных цветовых сигнала, в которых-то как раз и заключена информация о красной, синей и зеленой составляющих цветной картинки. Эти три сигнала подаются на три управляющих электрода цветного кинескопа – «красный», «синий» и «зеленый». При цветной передаче они совместными усилиями раскрашивают экран во все цвета радуги. А когда идет черно-белая передача, то все три цветные составляющие сбалансиро-

ваны так, что дают одноцветное черно-белое изображение. Только в том случае, когда баланс нарушается, у одноцветной картинке появляется зеленоватый, синеватый или красноватый оттенок. Отсутствие этого оттенка, чистый черный тон картинке говорит о том, что три основных цвета сбалансированы правильно и цветная передача будет идти в правильных цветовых тонах.

В мире существует несколько совместимых систем цветного телевидения. По основной своей идее все они одинаковы, главное различие – в способах записывания информации в сигналах цветности. В нашей стране цветное телевидение развивается на основе советско-французской системы СЕКАМ (SECAM), в которой сигналы цветности передаются по очереди, через строку. В приемнике один из сигналов попадает на линию задержки и, двигаясь по ней, дожидается прихода второго сигнала. У черно-белого и цветного телевизоров много общих узлов, различия появляются только после детектора, когда начинается выделение и переработка сигналов цветности. В целом же цветной телевизор намного сложнее черно-белого по своей схеме, по технологии обработки электрических сигналов. Кроме того, в цветном телевизоре имеется такая сложная деталь, как масочный кинескоп, который считается самым дорогим прибором бытовой электроники. И несмотря на все это, цветные телевизоры, еще недавно уникальные и, скажем прямо, капризные аппараты, стали массовым явлением, они миллионами сходят с заводских конвейеров, надежно и безотказно работают сотни и тысячи часов. Это лишний раз подтверждает, что современная электроника умеет создавать сложную и совершенную аппаратуру, пригодную для массового повторения, для выпуска большими тиражами.

Запись звуковой и видеоинформации

19. Записать звук – значит запечатлеть в материале точный его график, с которого потом можно было бы воспроизвести такой же звук⁹. Еще совсем недавно совершеннейшей фантастикой казалась сама возможность записывать звуки, сохранять их долгое время, а затем воспроизводить, когда понадобится. Рассказ о записанных, замороженных звуках включили даже в репертуар известного вруна барона Мюнхгаузена («...На морозе звуки замерзли в рожке, а теперь, отогревшись у печки, оттаяли и стали сами вылетать из рожка»), и уже одно это говорит, насколько невероятной казалась сама возможность звукозаписи. А вообще-то если разобраться, то в записывании звуков нет ничего принципиально

⁹ Современная запись отличается только тем, что вместо физической копии графика (в виде впадин-горбов на виниловой пластинке или намагниченных участков на ферромагнитной ленте, см. далее) записывается числовая информация об амплитудах сигнала в определенные моменты времени. Иными словами, вместо физической модели графика звука создается его цифровая копия.

невозможного. Человек давно умел записывать медленные события – вести дневники, писать историю, строить графики изменения температуры или производства зерна. Задача звукозаписи сводилась лишь к тому, чтобы научиться записывать очень быстрые процессы, записывать изменения (в данном случае изменения силы звука), которые происходят за тысячные доли секунды.

Задачу записи быстрых звуковых колебаний впервые решил Эдисон в 1877 году. Идея его первого устройства звукозаписи – фонографа – была ошеломляюще проста, ее создание не потребовало ничего, кроме понимания сути дела. В принципе, устройство, подобное эдисоновскому фонографу, могло быть создано много тысяч лет назад, сохранив для истории голоса Архимеда и Юлия Цезаря, Гомера и Пушкина. Однако тот факт, что великое изобретение тысячелетия лежало на поверхности, не стоит, наверное, объяснять капризами Случая. Появление того или иного изобретения, той или иной новой, свежей идеи во многом определяется общим уровнем научного мышления, общим уровнем представлений об устройстве мира. И еще, конечно, вниманием к предмету: фонограф изобрели в разгар «телефонной лихорадки», через год после рождения телефона, который показал, какие чудеса можно делать со звучащей речью.

Главная идея, положенная в основу фонографа, состояла в том, что вести летопись звукового давления, записывать звук поручили самому звуку. Человек, голос которого нужно было записать, говорил в рупор фонографа, под действием звуковых волн начинали колебаться, вибрировать укрепленная на конце рупора мембрана и закрепленная на ней стальная игла, следуя за всеми изменениями звукового давления. Игла упиралась в восковой валик (сначала применялись валики, покрытые мягкой оловянной фольгой), а пружинный механизм, наподобие часового, медленно вращал этот валик и одновременно перемещал его вдоль оси (рис. 13.11; 1), и игла прорезала в мягком воске винтообразную канавку. А поскольку игла одновременно совершала колебания под действием звуковых волн, то глубина канавки получалась неодинаковой.

В первых системах звукозаписи была глубинная запись (рис. 13.11; 2): при положительной амплитуде звуковой волны (наибольшее сжатие воздуха) игла вдавливалась в воск с наибольшей силой, и канавка получалась самой глубокой. А во время отрицательной амплитуды (наибольшее разрежение воздуха) канавка получалась наиболее мелкой. Так изменения звукового давления во времени превращались в изменения положения иглы в пространстве, и эти пространственные перемещения непрерывно фиксировались на движущемся воске. Или, проще говоря, к игле непрерывно подводились новые участки воска, и она записывала, каким в данное мгновение было звуковое давление в рупоре. И на воске появлялась фонограмма, этот своеобразный график звука, нарисованный самим звуком.

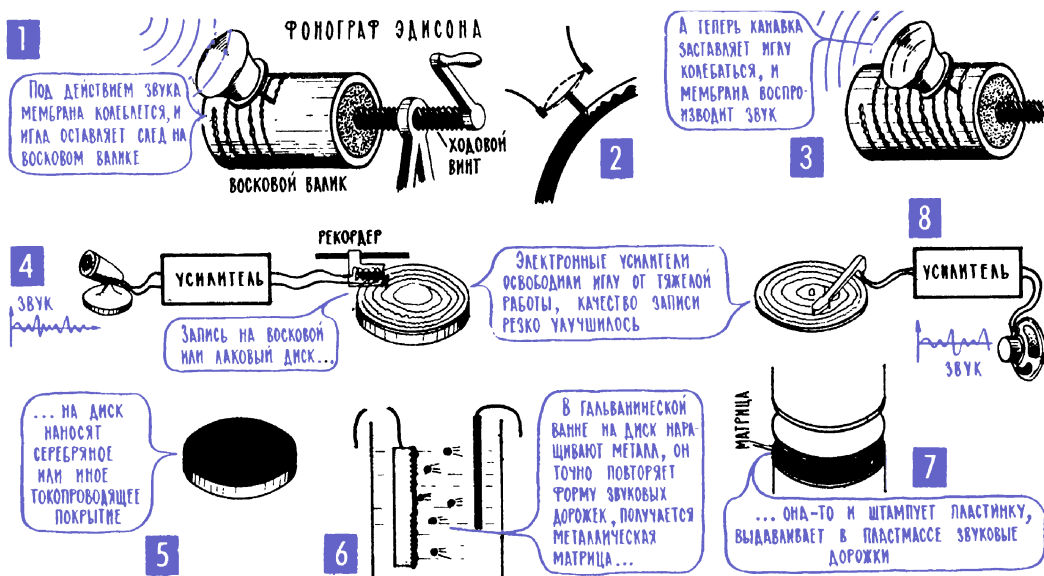


Рис. 13.11. Фонограф Эдисона и его усовершенствования

Воспроизведение звука с такой фонограммы тоже было несложным. Дело это было поручено самому графику, самой извилистой восковой канавке. Ту же иглу, которая только что прорезала в воске фонограмму, еще раз пускали по канавке, с такой же скоростью вращая восковой валик (рис. 13.11; 3). Из-за изменения глубины канавки игла совершала движения вверх-вниз, подобно велосипеду, который движется по холмистой местности. А вместе с иглой приходил в движение излучатель звука – рупор.

20. Современные системы грамзаписи позволяют получить высокое качество звучания. Такую систему звукозаписи, где след звуковых колебаний остается в виде механической деформации какого-либо материала, в частности воска, называют механической записью звука. За столетие своего существования системы механической записи сильно изменились, впитали в себя массу новых идей, изобретений, история которых наверняка могла бы послужить темой увлекательного приключенческого романа. Лет через десять после рождения фонографа восковой валик был заменен плоской пластинкой со спиральной звуковой канавкой, в принципе такой же, как на современных пластинках. Это позволило перейти к тиражированию записей, к изготовлению копий фонограммы.

Вот основные процессы такого пластинкопечатания. Сначала восковой диск с фонограммой покрывают токопроводящим слоем, например тончайшим слоем серебра или графитовой пылью (рис. 13.11; 5). Затем в гальванической ванне методами гальванопластики (восковой диск опускают в раствор ионов металла, и под действием тока эти ионы движутся к

диску, осаждаются на нем) наращивают на него сравнительно массивное металлическое покрытие (рис. 13.11; 6). Воск расплавляют и удаляют, остается металлическая матрица, с помощью которой на разогретом пластичном материале печатают, правильнее сказать, выдавливают, пластинки (рис. 13.11; 7).

Принцип размножения фонограмм позволил решить сложное противоречие в требованиях к материалу: для записи теперь можно было применять мягкий, податливый материал, а для самих пластинок использовать материал более твердый, такой, который при воспроизведении записей не срезала бы игла, сглаживая тем самым извилины звуковой дорожки.

К концу XIX века, то есть примерно через двадцать лет после изобретения фонографа, была разработана технология массового изготовления пластинок, появились граммофоны (от греческих слов «граммо» – запись, писать и «фон» – звук) и «замороженные» звуки, записанные голоса и оркестры, подобно книгам, чертежам, рисункам, стали продолжением нашей памяти. Еще через четверть века механическая запись звука стала электро-механической (рис. 13.11; 4), а вскоре появились и электромеханические системы воспроизведения. В них звуковую канавку освободили от физической работы, уже не сама игла двигала излучатель звука, и мощности от нее уже не требовалось. Механические колебания иглы переводились на электрический язык в так называемом звуконосителе – он создавал электрическую копию звука наподобие микрофона. А затем полученный сигнал усиливался электронными усилителями и воспроизводился громкоговорителем (рис. 13.11; 8). Теперь сама глубина звуковой канавки могла быть меньше, мельче могли быть и изгибы на ней – легкая игла, освобожденная от значительной массы рупора и связанного с ним воздуха, легко считывала самый сложный рельеф звуковой дорожки и не портила (почти не портила) при этом фонограмму.

Легкий звукопередатчик во многом определил дальнейший прогресс грамзаписи (привычное сокращение, но не очень удачное – в буквальном переводе оно означает «запись записи», хотя по смыслу это «запись на граммофонных пластинках»), так как появилась возможность применять для пластинок новые мягкие материалы на основе виниловых смол. Сегодня достижения механической записи звука можно проиллюстрировать такими цифрами. Частотный диапазон пластинки очень широк – от 20 Гц до 20 кГц, ограничения в основном связаны с качеством звукопередатчика. Стоит вспомнить, что при записи и воспроизведении звука чисто акустическим способом (рупор – игла – рупор) полоса частот в лучшем случае составляла 150–4000 Гц, причем очень сильной была неравномерность частотной характеристики из-за разного рода акустических резонансов.

Новые материалы позволили резко улучшить еще один показатель – во много раз снизился уровень собственных шумов пластинки, специфиче-

ское шипение, которое можно услышать со старинных, заигранных пластинок. У современных пластинок уровень шумов доведен до –50–55 дБ, причем после каждых пятидесяти проигрываний пластинки шум возрастает не более чем на 2 дБ.

Благодаря мягким материалам для пластинки и легкому звукоснимателю, не нагружающему пластинку, запись стали вести примерно в два с половиной раза «гуще», то есть сам рельеф дорожки можно было сделать мельче. Если, например, раньше при записи звука с частотой 1000 Гц допустимое расстояние между двумя соседними впадинами на дорожке составляло около 0,3 мм, то теперь оно стало 0,15 мм. А значит, пластинки могут вращаться медленнее – вместо 78 оборотов в минуту сейчас наиболее широко используется скорость 33½ оборота в минуту. Кроме того, меньше стала и сама ширина канавки, соседние канавки стали примерно в три раза ближе. И в итоге звучание пластинки диаметром 30 см увеличилось с 5 до 27 минут. У долгоиграющих пластинок диаметром 27 и 17,5 см время звучания – соответственно 18 и 9 минут. У таких пластинок ширина звуковой канавки обычно меняется в пределах от 0,03 до 0,12 мм, расстояние между соседними канавками – 0,1–0,003 мм, тихим звукам соответствуют выступы канавки в десятитысячные доли миллиметра, то есть меньше размера пылинки. Это лишнее напоминание о том, что современная пластинка – изделие нежное, ее нужно бережно, аккуратно хранить.

21. Стереофонические и квадрофонические системы воспроизводят пространственное распределение источников звука. Для чего человеку два уха? На этот, казалось бы смешной, вопрос ответить не так-то просто. Можно, конечно, предположить, что природа просто снабдила нас резервом на случай болезни или иной неприятности. Но почему же она не позаботилась о резервировании сердца, печени, желудка?.. Вопрос о происхождении парных органов пока остается открытым. Но как бы в итоге ни решалась загадка двух ушей, как бы ни объяснилось их появление в процессе эволюции, мы можем точно сказать, что дает нам бинауральное слушание (в точном переводе – двухушное): оно позволяет определить место, где находится источник звуковых волн, следить за его движением и, следовательно, лучше ориентироваться в сложном мире звуков.

На низких частотах, примерно до 1000 Гц, наш слуховой аппарат фиксирует сдвиг фаз, то есть разность хода звуковых волн, попадающих в левое и правое ухо. Мозг мгновенно вычисляет, какому направлению может соответствовать такая разность хода, и таким образом определяет, откуда идет звук. На высших звуковых частотах уже сравнивается средняя сила звуков, пришедших к левому и правому уху, и по результатам сравнения определяется, с какой стороны идет звуковая волна (рис. 7.5). Точные регист-

рирующие приборы нашего слуха и слуховые центры мозга непрерывно сравнивают множество звуковых сигналов, поступающих с разных направлений, и рисуют в нашем сознании сложную картину пространственного распределения источников звука. Например, пространственное размещение музыкальных инструментов в большом оркестре. Или солистов в вокальном ансамбле. И если мы хотим, чтобы звуковоспроизводящая установка с высокой верностью воспроизводила бы точное звучание оркестра или ансамбля, то нужно не только воспроизвести всю полосу звуковых частот, не только предотвратить нелинейные искажения, не допустить появления посторонних призвуков, но нужно еще воссоздать пространственное распределение источников звука. Чтобы звук литавр, которые в оркестре находятся слева от слушателя, и в комнате, где мы слушаем пластинку, приходил слева. И чтобы мы слышали, как перемещается по сцене певец, чувствовали объем, пространство сцены.

Для точного воспроизведения пространственной звуковой картины нужно было бы установить на сцене большое число микрофонов и каждый связать со своим громкоговорителем. Это была бы довольно сложная система: каждой паре микрофон–громкоговоритель нужен свой отдельный канал связи или отдельная фонограмма. К счастью, оказалось, что вполне удовлетворительные результаты дают уже два звуковых канала (рис. 13.12; 6), а двухканальную стереофонию не так-то сложно осуществить. В частности, оба звуковых канала, правый и левый, удастся записать на одной пластинке и даже, более того, в одной звуковой канавке (рис. 13.12; 3). На каждой из скошенных стенок канавки создается своя собственная глубинная запись, отдельная фонограмма. Скосы канавки расположены под углом 90° (под углом 45° к вертикальной оси; такая система называется 45/45), и каждый из двух взаимно перпендикулярных кристаллов звукоснимателя (или каждая из двух взаимно перпендикулярных катушек) преобразует в электрический сигнал колебания иглы только «своего» направления (рис. 13.12; 6). Так на выходе двухкристального (двухкатушечного) стереозвукоснимателя появляются два независимых сигнала – «левый» и «правый». Они поступают на два независимых усилителя и воспроизводятся двумя громкоговорителями, расположенными на значительном расстоянии (2–3 м).

Очень важно, чтобы соотношение между уровнями громкости правого и левого каналов всегда оставалось таким, как соотношение громкости звуков, которые «услышали» два микрофона во время записи. Только при этом условии пространственная звуковая картина будет правдоподобной. Если, например, увеличить громкость правого канала, а громкость левого оставить без изменений, то весь оркестр уйдет вправо, исчезнет объем сцены и богатое звуковое пространство превратится в убогую звуковую точку. Вот почему регуляторы громкости и даже регуляторы тембра обоих каналов спарены; подвижные контакты переменных сопротивлений закреплены на одной оси, их поворачивает одна общая ручка. А для того что-

бы первоначально установить правильное соотношение между уровнями правого и левого каналов, вводится дополнительный элемент регулировки – переменный резистор «Баланс». С его помощью добиваются, чтобы оба громкоговорителя звучали с одинаковой громкостью, когда источник звука находится в центре сцены.

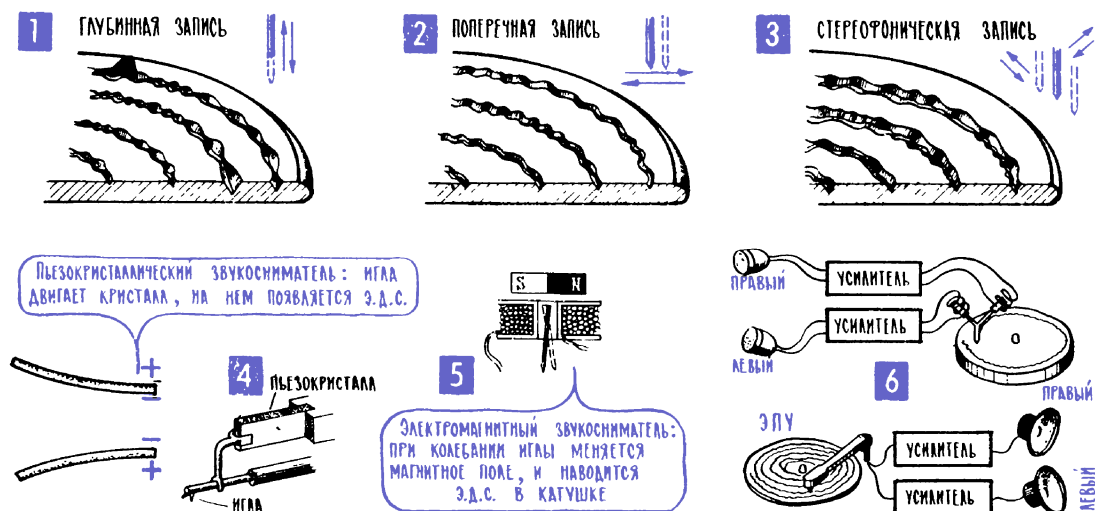


Рис. 13.12. Запись и воспроизведение звука

Одно из достоинств принятой системы стереофонической грамзаписи – ее совместимость. Это означает, что на стереопроеигрывателе можно воспроизводить монофоническую, то есть одноканальную, запись (разумеется, звучание при этом тоже будет монофоническим, одноканальным), а стереопластинки можно проигрывать на обычном монофоническом проигрывателе (и конечно, опять-таки без стереоэффекта). К этому достоинству нужно, правда, сделать дополнение: проигрывать стереофонические пластинки монофоническим звукоснимателем не очень-то желательно – если этот звукосниматель неточно отрегулирован, он будет портить пластинку.

В последнее время делаются попытки усилить эффекты объемного звучания, более точно передавать пространственную картину звука, используя уже не два, а четыре канала. Такие системы получили название квадрофонических, от слова «квадро» – «четыре». Придуман даже способ записывания всех четырех каналов в одной звуковой канавке, для этого используется идея частотного уплотнения каналов связи. В систему записи вводятся два высокочастотных генератора, два «радиопередатчика», с несущими частотами в районе 40 кГц. Один из них модулируется сигналом третьего стереофонического канала, второй – сигналом четвертого. На каждой стенке звуковой канавки теперь записывают довольно широкий

спектр частот, в него входят звуковые частоты первого или второго канала и ультразвуковые частоты, в которых модуляция зашифровала сигналы двух дополнительных каналов квадрофонии. В воспроизводящем устройстве эти модулированные сигналы третьего и четвертого каналов выделяются фильтрами, детектируются и воспроизводятся в чистом виде. Система эта довольно сложна, и пока часто осуществляют «псевдоквадро», то есть «как бы квадро»: из левого L и правого P каналов стереофонии формируют еще два канала $L + P$ и $L - P$; их подают на отдельные громкоговорители¹⁰.

Очень высокое качество звучания, в том числе стереофонию и квадрофонию, позволяет получить магнитная запись звука¹¹.

22. Магнитная фонограмма: изменения звукового давления записаны в изменениях намагниченности участков ленты из ферромагнитного материала. Чтобы понять физическую основу магнитной записи звука, нужно обратиться к явлению, хорошо известному из повседневного опыта, – к остаточной намагниченности. Иголka после соприкосновения с постоянным магнитом сама намагничивается, становится своего рода постоянным магнитом. Стальной сердечник, вставленный в катушку, по которой идет постоянный ток, сохранит некоторые остаточные магнитные свойства и после того, как ток в катушке прекратится. Все это и есть остаточный магнетизм, он связан с тем, что элементарные магнитики, однажды повернувшись под действием внешнего магнитного поля (гл. 5; 6), не полностью возвращаются в исходное положение, когда это внешнее поле исчезает; нужно приложить внешнее поле обратного направления, чтобы размагнитить кусок стали. Но когда это поле исчезнет, появится остаточная намагниченность другой полярности, более слабая, чем первоначальная. Чтобы полностью размагнитить стальной предмет, его помещают в магнитное поле, созданное переменным током, и медленно вытаскивают этот предмет из меняющегося поля. Само явление остаточной намагниченности называют гистерезисом, а график, который показывает, как идет процесс намагничивания, за свою форму получил название петли гистерезиса (рис. 13.13; 2).

¹⁰ Современные цифровые системы записи и воспроизведения звука могут обеспечить в принципе любую пространственную картину распределения звука. Но надо учитывать, что в этом деле не менее важную роль играют характеристики помещения, в котором размещается вся система. В обычной 20-метровой гостининой городской квартиры добиться удовлетворительных результатов можно разве что при размещении слушателя в одной строго определенной точке.

¹¹ В быту это касается только высококачественных катушечных магнитофонов, причем, как правило, при достаточно высокой скорости движения ленты (19 см/с). Кассетные деки и тем более переносные магнитофоны с кассетами в принципе не могут обеспечить качество звучания, приближающееся к качеству «виниловых» проигрывателей (см. рис. 13.13; 8, а также в разделе 25 частотные характеристики записи на ленту при различных скоростях).

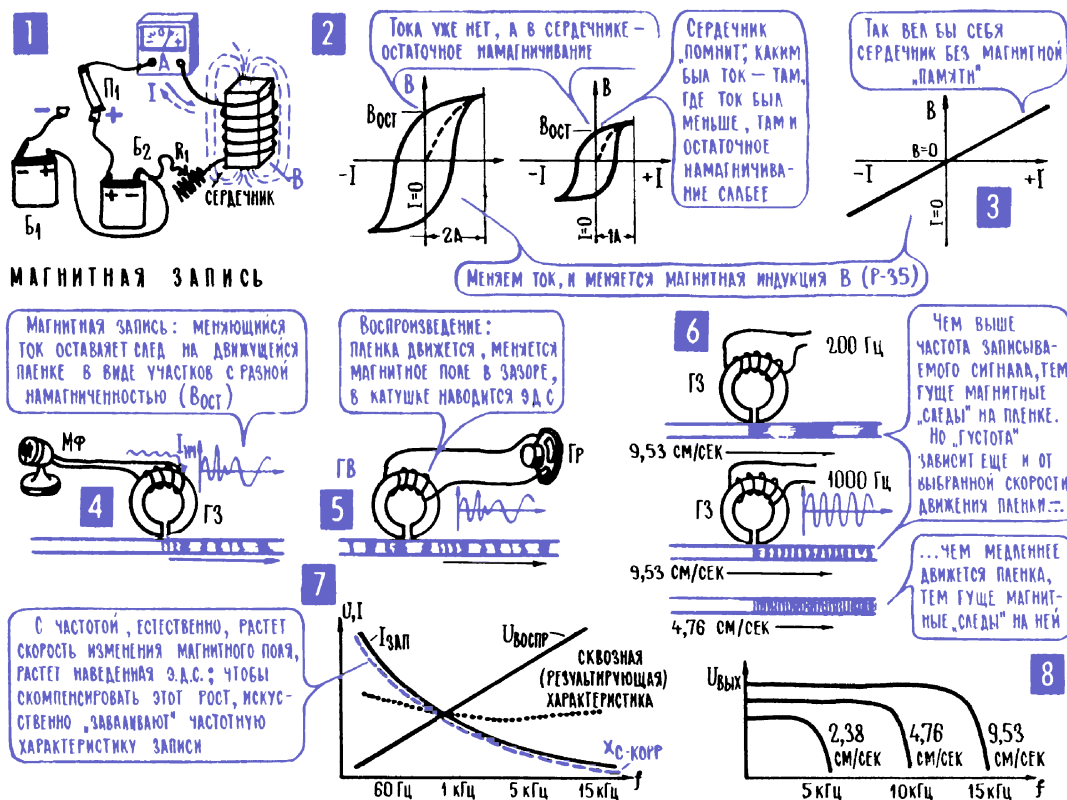


Рис. 13.13. Принципы магнитной записи

Самое главное вот что: степень остаточной намагниченности – остаточная магнитная индукция $B_{ост}$ – зависит от того, насколько сильным было внешнее намагничивающее поле. Так, например, сердечник, вставленный в катушку с током, окажется намагниченным тем сильнее, чем больше был ток в этой катушке.

На графиках рис. 13.13; 2 видно, что остаточная намагниченность $B_{ост}$ (то есть намагниченность после прекращения тока) будет разной при разных значениях намагничивающего тока. От этих графиков до магнитной записи звука остается буквально один шаг. К катушке, намотанной на сердечник с воздушным зазором, подводим низкочастотный переменный ток $I_{нч}$ (рис. 13.13; 4), электрическую копию звука. Если протягивать мимо воздушного зазора стальную ленту, то меняющийся ток, точнее его меняющееся магнитное поле, создаст в различных участках ленты разную остаточную намагниченность: в те моменты, когда по катушке шел более сильный ток, намагниченность будет побольше; с уменьшением тока будет ослабевать и остаточная намагниченность. В итоге изменения намагниченности стальной ленты будут точно повторять изменения тока (а значит, звукового давления) во времени. Так же, как на пластинке, летопись звука

отображалась глубиной канавки, на стальной ленте она будет отображаться уровнем остаточной намагниченности.

23. В современных магнитофонах запись производится на полимерную пленку, покрытую тонким ферромагнитным слоем. Уже в начале нашего века грамзапись получила довольно широкое распространение, и граммофоны, как это принято сейчас говорить, стали аппаратами широкого потребления. Магнитофоны начали появляться в домах лишь в 1950-е годы, и поэтому может создаться впечатление, что магнитофон – изобретение сравнительно позднее. А вместе с тем магнитофон был изобретен примерно в то же время, что и фонограф¹². Просто понадобилось много десятилетий, чтобы решить ряд сложных технических и технологических задач и превратить магнитофон из громоздкой, тяжелой установки, очень неудобной в обращении и создающей к тому же сильно искаженный звук, в простой и удобный аппарат с высоким качеством звучания.

Одно из таких решений – тонкая полимерная пленка, покрытая тончайшим слоем ферромагнитного порошка. Она сменила стальную ленту и проволоку, на которых велась запись в первых магнитофонах. Для магнитной записи электрических сигналов выпускалось несколько типов пленки шириной до 70 мм. В магнитофонах широкого применения использовалась пленка шириной 3,81 мм (в кассетах) и 6,25 мм (на катушках), другие типы пленки находят применение в специальных звукозаписывающих устройствах, например в кино, а также в устройствах памяти вычислительных машин¹³. Разные типы пленки могут иметь разную толщину в пределах от 0,018 мм до 0,055 мм. Ясно, что более тонкой пленки больше умещается на катушку, а значит, при одном и том же диаметре катушки дольше звучит фонограмма.

С годами совершенствовались лентопротяжные механизмы магнитофонов, была значительно снижена механическая нагрузка на пленку, и, значит, в них можно применять более тонкую пленку, не опасаясь ее разрыва. Толщина ферромагнитного слоя у разных типов пленки лежит в пределах от 0,008 мм до 0,02 мм (8–20 мкм). К магнитной пленке нужно относиться бережно, хранить ее в прохладном месте¹⁴, беречь от сырости, сильных магнитных полей. От жары магнитная пленка пересыхает, становится хрупкой, рвется; от сырости она коробится.

¹² Принцип магнитной записи на стальную проволоку впервые разработал Оберлайн Смит в 1888 году, причем под влиянием посещения в 1878-м лаборатории Эдисона. Первое работающее устройство было изготовлено датским инженером Вальдемаром Поульсеном в 1895 году.

¹³ Запись цифровых данных на магнитную ленту до появления дискет или достаточно емких жестких дисков была очень распространена, причем для этого широко применялись даже кассеты, аналогичные бытовым. Более того, и в настоящее время еще довольно распространены стриммеры – устройства для хранения больших объемов данных на магнитных лентах, которые отличаются надежностью и одновременно исключительной дешевизной в эксплуатации.

¹⁴ В особо ответственных случаях (архивы цифровых данных; мастер-записи в звукозаписывающих студиях) магнитную пленку полагается хранить в холодильниках при температуре около 4°.

24. Магнитная головка: катушка на замкнутом магнитном сердечнике с малым воздушным зазором. В сердечнике магнитной головки имеется тончайший зазор, его обычно создают с помощью прокладки из бронзовой фольги, магнитные свойства которой почти такие же, как и у воздуха. Когда к зазору плотно прилегает движущаяся пленка, то магнитное поле замыкается уже не через сам зазор, а через закрывающий его участок ферромагнитного слоя пленки. А магнитный поток всегда старается замкнуться по пути с наименьшим магнитным сопротивлением (рис. 5.5). Тонкий зазор – это лишь небольшой участок магнитной цепи записывающей головки, в основном же магнитное поле замыкается по пути с небольшим сопротивлением, по сердечнику из ферромагнитного сплава – пермаллоя.

Замыкаясь через участок пленки, прилегающий к узкому зазору, магнитное поле оставляет на пленке очень узкий след, и запись ведется экономно, мелкими штрихами. А значит, пленку можно протягивать довольно медленно и на сравнительно небольшом куске пленки долго вести запись (рис. 13.13; 6).

25. Верхняя граничная частота записи определяется скоростью движения пленки и шириной рабочего зазора в головках. Владельцу магнитофона во всех случаях хотелось бы, чтобы пленка двигалась как можно медленнее, то есть чтобы одна кассета или катушка с пленкой звучала как можно дольше. Но скорость движения пленки нельзя выбирать произвольно, она определяет ту наибольшую частоту, которую удастся записать на фонограмме и которая определяет качество звучания магнитофонной записи. Чем более высокую частоту мы хотим записать, тем больше должна быть скорость пленки. Практически эту скорость выбирают с таким расчетом, чтобы фонограмма одного колебания самой высокой записываемой частоты по длине пленки занимала больше места, чем сам зазор магнитной головки (рис. 13.13; 6).

Если нарушить это условие, то окажется, что запись высокочастотного колебания еще не ушла из области зазора, а уже вовсю идет запись следующего колебания. И в воспроизводящей головке при слишком медленном движении пленки в зазоре может одновременно оказаться запись и положительного, и отрицательного полупериода какого-либо колебания, а из-за этого в обмотке вообще не наведется ЭДС. Из этой картины, кстати, видно, что для снижения скорости пленки нужно уменьшать ширину зазора – чем меньше зазор, тем короче след от каждого записанного высокочастотного колебания и тем медленнее можно протягивать пленку.

Но уменьшать зазор беспредельно также нельзя, и здесь существуют свои трудности, свои ограничения. В современных головках воспроизведения делают зазор примерно в 3 мкм (0,003 мм), и при этом на установленной

стандартом скорости удается получить такие предельные частоты записи и воспроизведения: скорость 19,05 см/с – предельная частота около 18 кГц, скорость 9,53 см/с – частота 12,5 кГц, скорость 4,76 см/с – примерно 8 кГц и скорость 2,38 см/с – предельная частота около 5 кГц. Во многих магнитофонах предусмотрены две, а то и три скорости записи и воспроизведения, и, конечно, при меньшей скорости пленки звучат дольше, а частотная характеристика в области высших частот «кончается» раньше (рис. 13.13; 8). Нужно сказать, что магнитная пленка постепенно стирает головку, и ее характеристики в какой-то степени меняются.

26. В большинстве магнитофонов электрический сигнал записывают на двух или на четырех параллельных дорожках, а в видеомагнитофонах – на большом числе дорожек, расположенных под углом или поперек пленки. Для магнитофонов, где пленка наматывается на катушки, шестимиллиметровая пленка, пожалуй, самая удобная. Во всяком случае, более узкая пленка, по-видимому, легко спутывалась, перекручивалась и рвалась бы. С другой стороны, при современных ферромагнитных покрытиях пленки, магнитных головках, усилителях можно было бы обойтись и более узкой пленкой. Компромиссным решением стала многодорожечная запись – сначала на стандартной шестимиллиметровой пленке стали записывать две фонограммы, а часто и четыре (рис. 13.14). Соответственно, уже при двухдорожечной записи возможна двухканальная стереофония, а при четырехдорожечной – даже квадрофония.

Проигрывание фонограмм с разных дорожек возможно двумя разными способами. В большинстве двухдорожечных магнитофонов головки просто закреплены в приподнятом положении, чтобы они прилегали к пленке не по всей ширине, а лишь к ее половине (рис. 13.14; 1). При этом чтобы перейти с одной дорожки на другую, пленку нужно просто перевернуть. Это довольно удобно, можно обойтись без перемотки пленки – в одну сторону проигрывается одна дорожка, а затем кассеты меняют местами, переворачивают, и звучит вторая дорожка.

Есть магнитофоны, в которых два комплекта головок, их можно переключать в зависимости от того, какая дорожка используется для записи или воспроизведения. Причем пленка может двигаться как в одну, так и в другую сторону, что создает дополнительные удобства – катушки не только не нужно перематывать, но даже не нужно переставлять. Иногда в магнитофонах такого типа имеется один комплект головок, и при переходе с дорожки на дорожку головки просто поднимаются или опускаются. В четырехдорожечных магнитофонах имеются два блока – блок стирающих головок и блок универсальных головок, в каждом из которых по две одинаковые головки, расположенные одна над другой (рис. 13.14; 3). При стереофонии обе головки одного блока работают одновременно, каждая в своем канале.

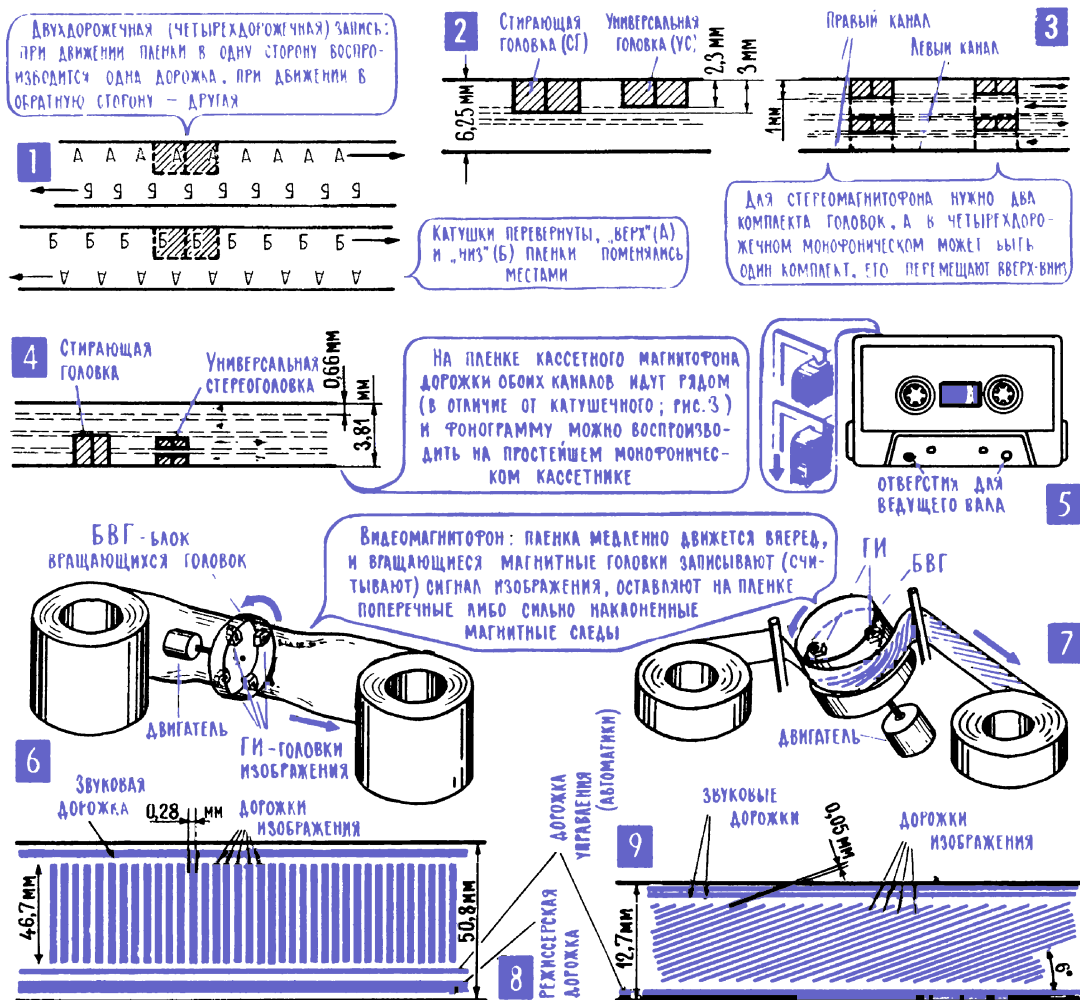


Рис. 13.14. Многодорожечная запись звука и видеозапись

Заговорив о многодорожечной магнитной записи, уместно вспомнить еще один аппарат для магнитной записи электрических сигналов — видеомагнитофон, то есть аппарат для записи изображения, превращенного в электрический сигнал телевизионными методами (см. разделы 9–18 этой главы).

Спектр телевизионного сигнала, как мы говорили, содержит составляющие с очень высокими частотами. В частности, для стандарта, принятого в нашей стране, спектр видеосигнала простирается примерно до 6 МГц (гл. 13; 16), это в 300 раз больше, чем максимальная частота звука, которую должен записать и воспроизвести обычный «звуковой» магнитофон.

Но можно ли вообще записать на магнитную ленту сигнал такой высокой частоты? Еще недавно мы выяснили, что чем выше записываемая частота, тем быстрее нужно продвигать ленту относительно магнитной го-

ловки (см. предыдущий раздел). Для записи звука в диапазоне до 20 кГц в магнитофонах первого класса скорость движения ленты почти 20 см/с (19,5 см/с), и отсюда можно подсчитать, что для записи видеосигнала ленту нужно протягивать мимо головки со скоростью $20 \cdot 300 = 6000 \text{ см/с} = 60 \text{ м/с}$, примерно 200 км/ч! Трудно представить себе магнитофон, где лента движется быстрее курьерского поезда, не говоря уже о том, что при такой скорости большой пятисотметровой катушки хватит на каких-нибудь 8 секунд. И вместе с тем задача магнитной записи видеосигнала решена, причем решена просто и остроумно: сама лента движется сравнительно медленно, переходя с одной катушки на другую, а магнитная головка, вращаясь очень быстро, с огромной скоростью «прочерчивает» на ленте параллельные магнитные дорожки с записью видеосигнала. Эти невидимые дорожки располагаются иногда поперек пленки (рис. 13.14; 8), а чаще под небольшим углом (рис. 13.14; 9). Чтобы запись, а затем и воспроизведение сигнала шли непрерывно, используются две или четыре вращающиеся головки, они размещены на блоке вращающихся головок БВГ, который сидит на оси отдельного двигателя (рис. 13.14; 6, 7).

На телецентрах используют, как их называют, профессиональные видеомагнитофоны, довольно большие установки, с помощью которых записывают на ленту многие программы, а затем передают их в эфир. В 1980-е годы появились небольшие бытовые видеомагнитофоны, они предназначены для того, чтобы просматривать программы на обычном домашнем или клубном телевизоре. В бытовом видеомагнитофоне «Электроника ВМ-12», для которого был выбран наиболее распространенный в мире стандарт записи VHS, запись производилась на ленту шириной 12,7 мм, двигавшуюся со скоростью 2,34 см/с, а БВГ обеспечивает движение головок для записи изображения относительно пленки со скоростью примерно 30 м/с. Это меньше, чем следует из нашего простейшего расчета, – снижение скорости намного упрощает аппарат, хотя и несколько ухудшает качество картинки.

На ленте выделено место для двух дорожек записи звука (рис. 13.14; 9), а также для дорожки сигналов автоматики. Изображение будет устойчивым лишь в том случае, если и лента, и магнитные головки на БВГ будут двигаться очень точно и равномерно. Причем требования к механическим системам предъявляются настолько жесткие (БВГ, например, не должен отклоняться от своего «расписания» даже на миллионные доли секунды), что выполнить их можно только с помощью систем электронной автоматики, управляющих скоростью и фазой вращения двигателей ведущего вала и БВГ. Четкая система автоматического управления двигателями видеомагнитофона позволяла записывать изображение очень узкими дорожками, и на небольшой, размером с ладонь, кассете видеомагнитофона ВМ-12 умещалась трехчасовая программа, например два полнометражных фильма.

Примечание редактора. Стандарт VHS (Video Home System) обеспечивал запись видео с вдвое ухудшенными характеристиками в сравнении с обычной телевизионной картинкой (и без того не блиставшей качеством) – размер кадра соответствовал разрешению около 320×240 точек. Потому качество записи на аналоговых бытовых магнитофонах было много хуже современных цифровых видеозаписей даже с высоким уровнем сжатия информации и к тому же, в отличие от аудио, практически не позволяло копирования путем перезаписи. У аудиозаписей при одной-двух перезаписях на достаточно качественной аппаратуре снижение качества на слух почти незаметно, а для VHS-видео оно в первой же копии снижалось самым радикальным образом. Напомним, что перезапись в цифровом виде на качество не влияет вовсе.

По этим причинам даже самый консервативно настроенный пользователь сегодня не будет записывать видео на кассетный видеомagnetofон, в то время как аналоговые записи на виниловых пластинках, наоборот, подобно ламповым звуковым усилителям, считаются признаком особо изысканного вкуса. С объективной точки зрения, разумеется, цифровая запись звука давно достигла и превысила качество виниловых пластинок; беда, однако, в том, что для достижения такого уровня необходима аппаратура довольно высокой стоимости и к ней фонотека достаточно аккуратно сделанных записей в соответствующих форматах (на привычных файлообменниках вы их, скорее всего, не найдете). Обычным бытовым музыкальным центрам, рассчитанным на проигрывание звука качества CD-аудио или вообще сжатых MP3-файлов, до этого уровня довольно далеко.

А сейчас нам пора возвращаться к аппаратам для записи звука, и видеомagnetofон BM-12 дает удобный повод – идея кассет для магнитной ленты, как и многое другое, пришла в видеозапись из звукозаписи. Удобство кассет не требует особых объяснений – кассета избавляет вас от необходимости каждый раз заправлять ленту, кассеты проще хранить, чем катушки, легче находить нужную запись. Первоначально кассеты применялись в переносных магнитофонах не очень высокого класса, с учетом этого и создавался соответствующий стандарт: невысокая скорость протягивания ленты, в основном 4,76 см/с, иногда еще и вторая скорость для записи речи (кассетный диктофон) – 2,38 см/с; пленка довольно узкая (ширина 3,81 мм) и сравнительно тонкая (до 0,018 мм, из них треть приходится на ферромагнитный слой); при небольшой скорости в компактной кассете умещаются ленты на 60 или на 90 минут звучания. Удобная мелочь: на кассете есть предохранительный пластмассовый язычок (упор). Если его выломать, то в образовавшуюся нишу будет входить рычаг, отключающий при этом систему записи, таким образом, выломав предохранительный язычок, вы защищаете дорожку вам запись от случайного стирания (рис. 13.14; 5).

Постепенно кассетные магнитофоны совершенствовались, появились аппараты четырехдорожечные и стереофонические (в них дорожки левого и правого каналов расположены рядом, и стереозапись можно проигрывать на монофоническом кассетном магнитофоне, разумеется, без стереоэффекта (рис. 13.14; 4). По качеству записи и воспроизведения «кассет-

ники» приблизились к катушечным аппаратам первого и даже высшего класса, хотя, конечно, в катушечном магнитофоне высокое качество получают проще и, пожалуй, надежнее. И все же удобство пользования, малые габариты самого аппарата и особенно домашней фонотеки на компактных кассетах сделали «кассетник» основным типом бытового магнитофона.



ГЛАВА 14

По стопам кремонских волшебников

1. Используя электронные генераторы и преобразователи спектра, можно создавать музыкальные инструменты. Примерно лет триста-четыреста назад в итальянском городе Кремоне работали скрипичные мастера, чьи имена вошли в историю. Антонио Страдивари, Джузеппе Гварнери, Андреа Амати и его внук Николо Амати создавали скрипки, которые отличались поразительной красотой и силой звука. Инструменты кремонских мастеров быстро приобрели мировую известность. Они, подобно редким бриллиантам, покупались за бешеные деньги, ценились как уникальные произведения искусства, их похищали, скрывали в тайниках, секретно вывозили из страны в страну, показывали в музеях. И сегодня скрипки Страдивари, Гварнери, Амати известны все наперечет, лучшие музыканты мира добиваются права играть на этих инструментах.

Десятилетиями предпринимались попытки раскрыть секреты кремонских скрипок, выяснить, какие именно особенности конструкции, материалов, технологии изготовления формируют их неповторимые голоса. Один музыкальный журнал подсчитал, что в свое время чуть ли не дважды в месяц появлялись сообщения о раскрытии секретов скрипок Страдивари, но всякий раз оказывалось, что тайна остается тайной.

Оставив в стороне споры о том, как именно кремонские волшебники создавали свои скрипки, мы можем в самом общем виде отметить, что именно умели делать эти мастера. Они умели формировать спектр акустического сигнала, умели создавать в скрипке механические резонансные системы, которые подчеркивали или, наоборот, приглушали составляющие определенных частот. Может быть, кремонские мастера и не пользовались таким понятием, как частотная характеристика, но занимались они именно тем, что создавали у скрипки желаемую частотную характеристику, лепили звук желаемой формы, подобно тому, как из податливого пластилина дети лепят разные фигурки.

Очень интересные возможности создания различных тембров звучания открываются в электромузыкальных инструментах¹, или, как их сокращенно называют, ЭМИ. Основа этих инструментов – электрические генераторы, взявшие на себя роль струн: сигнал с генератора подается на громкоговоритель (если нужно, через усилитель) и создает звук. Высота тона, естественно, определяется частотой генератора, а тембр звучания – формой кривой генерируемого напряжения. Таким образом, в электромузыкальных инструментах можно легко менять высоту звука, изменяя элементы в цепи генератора (гл. 11; 3, 9, 13, 14) и тем самым менять частоту. И кроме того, можно в широких пределах менять тембр звучания, включая между генератором и громкоговорителем электрические цепи, влияющие на спектр сигнала, например RC-фильтры, резонансные фильтры, нелинейные элементы (гл. 6; 17, гл. 11; 15, 16).

Постройка электромузыкальных инструментов и особенно формирование тембров, характера их звучания – дело очень интересное, увлекательное. Занимаясь им, можно почувствовать себя на месте кремонского скрипичного мастера, раскрывающего тайны сотворения звука: несколько простых электрических цепей, введенных в ЭМИ, создают у него звучание органа или трубы, скрипки или баяна. Результаты работы по формированию тембров во многом зависят от терпения, изобретательности, вкуса и еще от того, насколько глубоко поняты процессы в электрических цепях, насколько глубоко чувствует человек, что на что и как влияет.

2. Музыкальная шкала фортепиано: 88 звуков в диапазоне от 27,5 до 4186 Гц, соседние ноты отличаются по частоте примерно на 6 %. Хорошо известно, что совершенная машина нашего слуха может различать звуки по их частоте. Но какие цифры стоят за этими общими словами? Если, скажем, частота изменится на 10 Гц, заметим мы это или нет? И сколько всего частотных интервалов могло бы обнаружить наше ухо в звуковом диапазоне? Оказывается, что человек способен уловить различие в частоте звука буквально на десятые доли процента. На низших частотах это составляет доли герца, на высоких – несколько герц. При этом в диапазоне слышимых частот от 20 Гц до 20 кГц наш слух мог бы обнаружить более двух тысяч частотных интервалов, частотных ступенек. Правда, при очень тихом звуке частота различается хуже, но и в этом случае можно было бы насчитать 500–600 частотных интервалов. А в музыке используется всего 88 звуков разной высоты, 88 разных нот. Почему так мало?

Во-первых, потому, что частотный интервал между соседними нотами составляет примерно 6 %; он выбран с запасом, так чтобы наверняка можно было отличить одну ноту от другой. Во-вторых, в музыке используется

¹ Электромузыкальными инструментами называются инструменты, в которых звук создается электронными схемами; их не нужно путать с инструментами, в которых звук создается обычным путем, но затем усиливается или преобразуется с помощью электроники, – они называются электромеханическими (типичный пример – электрогитары).

не весь слышимый диапазон, а только часть его – от 27,5 до 4186 Гц. Конечно же, в спектрах музыкальных инструментов полно более высокочастотных и более низкочастотных составляющих, однако основные частоты, первые гармоники музыкальных инструментов, не выходят за пределы двух названных граничных частот.

Музыканты почти никогда не говорят о частоте звука, они присвоили каждой из 88 частот свое имя и только этим именем и пользуются. Но вот обратите внимание: разных звуков на музыкальной шкале 88, а названий у них всего семь – *до, ре, ми, фа, соль, ля, си...* А потом опять повторяется – *до, ре, ми...* и т. д. Сделано это потому, что среди 88 разных нот есть много похожих, и именно этим похожим нотам даны одинаковые названия. А чтобы можно было отличить разные ноты с одинаковыми названиями, их пишут с больших либо с малых букв, сверху или снизу помечают цифрами, указывающим на октаву, к которой они принадлежат.

3. Октава: частотный интервал между звуками, частота которых различается в два раза и звучание которых поэтому кажется похожим. Похожесть некоторых разных музыкальных звуков легко обнаруживается, если, например, прислушаться к звучанию двух разных *до* или любых других двух звуков с одинаковыми названиями. Явно слышится, что частота у двух таких одноименных звуков разная, что одно *до* намного выше другого, но в то же время явно слышится, что они чем-то очень похожи. Заметить признаки такой похожести тоже нетрудно: частота любого *до* ровно в два раза больше, чем предыдущего, и ровно в два раза меньше, чем последующего. Это относится ко всем одноименным нотам: у двух соседних *ре*, двух соседних *ми* и т. д. частота всегда различается в два раза. Этот частотный интервал «в два раза» называется октавой (рис. 14.1; 1), а кроме того, октавой называют все звуки, которые лежат в пределах этого интервала, все ноты, которые находятся между двумя соседними *до*.

Чтобы сделать предположение о физической природе похожести звуков с кратными частотами, достаточно посмотреть, как происходит колебание реальной струны (рис. 14.1; 2). Струна колеблется не только целиком, но еще и своими отдельными частями, колебательные движения совершают половинки струны, четвертушки, участки, равные одной трети длины, одной пятой и т. д. Эти дополнительные колебания как раз и создают высшие гармоники в звуковом спектре струны, создают призвуки, которые определяют ее спектр, окраску звучания. А когда струна работает как приемник звука (гл. 7; 10), то она резонирует не только на основной частоте, но и на обертонах, на высших гармониках. Например, струна, настроенная на 110 Гц (для большой октавы, см. рис. 14.2), будет резонировать и на частотах 220 Гц, 330 Гц, 440 Гц... Можно предположить, что наши природные акустические резонаторы, подобно струне, резонируют на высших частотах, кратных основной частоте, и особенно сильно на частотах, которые в два,

в четыре, в восемь, в шестнадцать раз выше основной частоты. И можно предположить, что именно поэтому нам слышатся такими похожими одноименные ноты из разных октав.

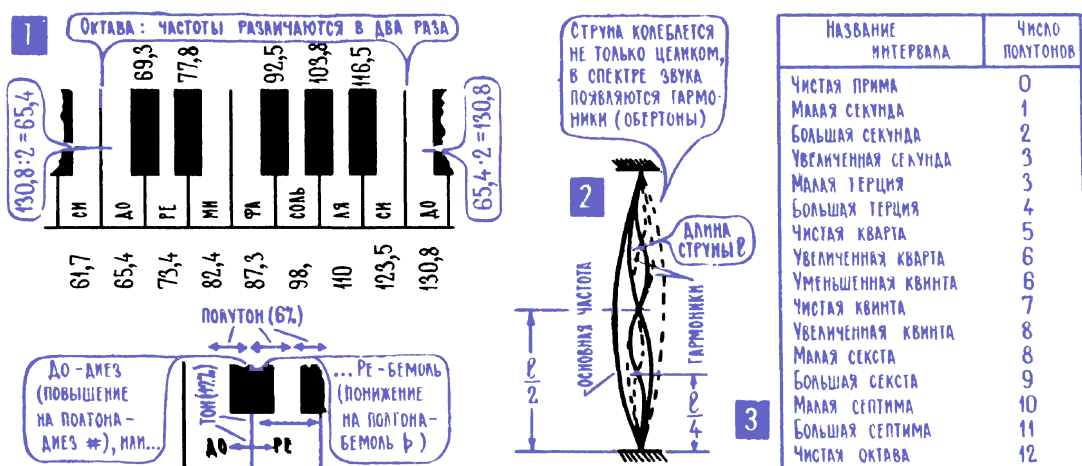


Рис. 14.1. Устройство музыкальной октавы

В пределах октавы – 12 частотных ступенек «высотой» примерно в 6 %² (рис. 14.1; 1); если 12 раз последовательно увеличивать или уменьшать частоту на 6 %, то в итоге получится изменение частоты на 100 %, то есть в два раза. Частотный интервал между двумя соседними нотами получил название «полутон», интервал в два полтона называется «тон». В пределах октавы – 12 полутонов, на всей музыкальной шкале семь полных октав, и каждая из них имеет свое название (рис. 14.2).

В пределах октавы частотных ступенек 12, а названий нот, как можно увидеть, всего 7, они относятся к белым клавишам рояля. Названия остальных пяти нот, которые относятся к черным клавишам, образуются с помощью приставок «диез» и «бемоль». Первая из них обозначает повышение частоты на полтона, вторая – понижение на полтона. Так, например, нота, которой соответствует частота звука 554 Гц, называется *до₂-диез* или *ре₂-бемоль*. Знаки «диез» и «бемоль» универсальны, они сдвигают на полтона вверх или вниз любую ноту, перед которой стоят, или все ноты вообще, если находятся в начале нотной строки, как говорят музыканты – в ключе. Знак «бечар» временно отменяет «диез» или «бемоль».

Обратите внимание, что совершенно разные ноты могут занимать одно и то же место на нотных линейках. Например, над пятой основной линейкой может быть *си* (246,9 Гц) и *соль₂* (784 Гц), на первой нижней дополнительной линейке может быть *ми* (82,4 Гц) и *до₁* (261,6 Гц). Указание о том, как именно в данном конкретном случае нужно читать ноты, дает скрипичный или басовый ключ в начале нотной строки. Если бы не такое

² Точное значение 5,95 %, см. «Примечание редактора» в разделе 4.

двукратное использование линеек, то их нужно было бы иметь намного больше, и нотная запись получилась бы более громоздкой.

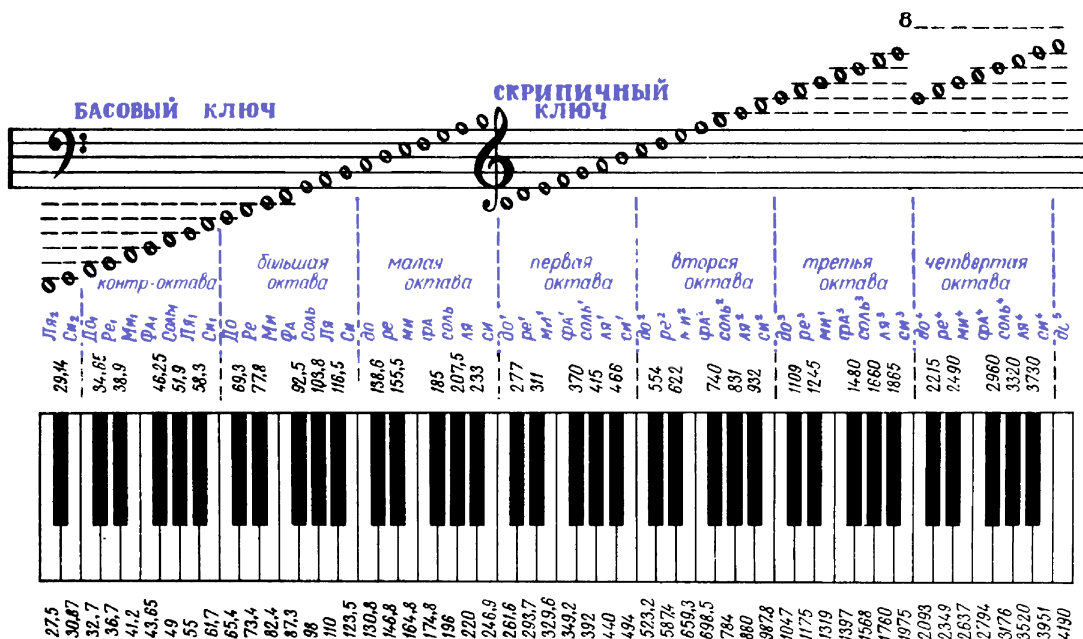


Рис. 14.2. Устройство и частоты хроматической музыкальной шкалы

4. Одновременное звучание двух нот в зависимости от соотношения между их частотами может быть благозвучным (консонанс) или неблагозвучным (диссонанс). Одновременное звучание двух нот с интервалом в октаву, то есть звуков, частоты которых различаются в два раза, создает ощущение единого слитного звука. Называется такое созвучие «совершенным консонансом», то есть идеально согласованным звучанием, чистой октавой (рис. 14.1; 3). Кроме совершенного консонанса, наблюдаются еще и другие благозвучные сочетания, они появляются в том случае, когда оказываются согласованными некоторые гармоники двух звуков. Так, например, консонансом в какой-то степени можно считать чистую квинту, при которой частота 3-й гармоники одного звука совпадает с частотой 2-й гармоники другого. Пример: третья гармоника ля малой октавы имеет частоту $220 \cdot 3 = 660$ Гц, вторая гармоника ми₁ (то есть ми первой октавы) имеет частоту $329,6 \cdot 2 \approx 660$ Гц. Созвучие ля-ми, как и другие созвучия с интервалом в семь полутонов, называется квинтой, его вполне можно считать консонансом, хотя и несовершенным. К числу несовершенных консонансов также относятся кварта и терция, все остальные созвучия – диссонансы, то есть несогласованные, неблагозвучные звуко сочетания.

Возможно, вы обратили внимание, что в нашем числовом примере квинта получается неточная, частота второй гармоники ми₁ лишь прибли-

зительно равна 660 Гц. Первые исследователи музыкальной шкалы, а этой проблемой занимался еще Пифагор в Древней Греции, ввели в нее точные консонирующие интервалы, точные квинты, кварты, терции. Применительно к нашему числовому примеру это значит, что для «ми» была выбрана частота 330 Гц, а не 329,6 Гц, однако частотные ступеньки между соседними нотами при этом получались неодинаковыми и в звучании музыки часто слышалась фальшь. Около трехсот лет назад немецкий ученый и музыкант Андреас Вейкмейстер путем довольно сложных вычислений построил так называемую двенадцатиступенную равномерно темперированную (хроматическую) шкалу, в которой высота всех частотных ступенек одинакова, но в то же время имеются интервалы, очень близкие к консонансам – квинте, кварте, терции. Именно таким музыкальным строем пользуется и современная музыка.

Примечание редактора. Вопреки утверждению автора по поводу «фальши» при использовании натурального музыкального ряда, для людей с хорошим музыкальным слухом фальшиво может звучать как раз математически выверенная равномерно темперированная гамма. В истории музыки не раз отмечалось, что музыкально одаренные люди, не обучавшиеся музыке и ни разу не слышавшие звучания «официальных» инструментов, самостоятельно приходят именно к натуральному звукоряду (потому-то он и называется натуральным, или чистым, подробности об этом см. [6]).

В натуральном звукоряде, принятом в музыке до XVII века, все интервалы внутри октавы (большая и малая секунда, большая и малая терция, кварта, квинта и т. д.) принимаются за отношения целых чисел – например, для большой терции (4 полутона) отношение частот равно $5/4$, для кварты (5 полутонов) – $4/3$, для квинты (7 полутонов) – $3/2$. В равномерно темперированном звукоряде все соотношения частот определяются интервальным коэффициентом (т. е. отношением частот), равным корню 12-й степени из 2 в степени количество полутонов, поэтому из целых соотношений там осталась только октава, для которой отношение частот равно равно 2. Точное значение интервального коэффициента для минимального интервала, принятого в музыке, – полутона – равно 1,0595 (корень 12-й степени из 2).

При равномерно темперированном звукоряде гораздо проще настраивать инструменты (в натуральном строе *ми-диез* не совпадает с *фа-бемоль* и т. п.), и, что еще важнее, можно переносить мелодию без искажений выше или ниже по звукоряду – в натуральном строе каждый аккорд в каждой тональности имел свое неповторимое звучание. Поэтому начиная с XVIII века равномерно темперированный (хроматический) строй получил мировое признание и стал фактическим стандартом музыкального строя.

За основу хроматического звукоряда принята нота *ля* первой октавы (она находится посередине фортепианной клавиатуры), которой присвоена частота ровно 440 Гц, частоты всех остальных 88 нот легко вычисляются, исходя из приведенного выше коэффициента для одного полутона. Достаточно подсчитать частоты 12 нот в пределах одной первой октавы, остальные вычисляются простым удвоением или делением на два. Отметим еще, что на практике от равномерно темперированной шкалы встречаются различные отклонения для сведения к минимуму некоторой

диссонансности звучания, которую слышат люди с хорошим музыкальным слухом: например, при настройке фортепиано на краях диапазона интервалы несколько расширяются.

5. Гармония, ритмы, тембры – важные выразительные средства музыки. Точные физиологические механизмы воздействия музыки на человека пока неизвестны, и иногда кажется, что это даже хорошо: кто знает, не утратит ли своей прелести и силы волшебство музыки, разобранный на части, выраженное в схемах, графиках, формулах? Но в то же время физиологи, физики, математики, изучающие человека, его мышление и психику, неизбежно касаются процессов и явлений, связанных с музыкой, вносят некоторую ясность в их понимание. Так, например, выявлены некоторые особенности восприятия консонирующих и диссонирующих созвучий, на которых основана сложная система музыкальных созвучий, то, что мы называем гармонией. Установлено, например, что восприятие созвучий связано с нелинейными процессами в самом ухе, с появлением в нем различных комбинационных частот: если два звука подводить порознь к левому и правому уху, то вообще невозможно заметить ни консонансов, ни диссонансов. Музыканты же построили совершенную теорию гармонии, в которой рассматриваются самые разные созвучия, аккорды, различные последовательности звуков во времени и те ощущения, с которыми связаны сочетания музыкальных звуков.

Наряду с гармонией в основании музыки лежат ритмы. Марш, вальс, галоп, колыбельная – уже эти примеры напоминают, какую важную роль в музыке играют ритмические рисунки, сложное чередование акцентов, пауз, звуков различной продолжительности. Не только в музыке, но и в стихах и даже в разговорной речи³ слух выделяет, а мозг оценивает ритмы. Вполне возможно, что восприятие музыкальных и речевых ритмов связано с ходом наших внутренних «биологических часов», сложных биохимических систем, отбивающих такт для отдельных клеток и целых органов, определяющих ритм жизни. Наконец, еще одно важнейшее выразительное средство музыки – спектральный состав, тембровая окраска звука. Она прежде всего зависит от того, каким способом создается звук, какой музыкальный инструмент является его источником.

6. Каждый из большого многообразия струнных, духовых и ударных музыкальных инструментов отличается своим характером звучания, тембровой окраской. Все струнные инструменты в зависимости от того, каким образом приводится в движение струна, делят на смычковые (скрипка, виолончель), щипковые (гитара, арфа) и клавишно-ударные (рояль). Можно предположить, что у всех у них был один далекий предок:

³ И в запечатленном на бумаге прозаическом литературном тексте правильный ритм тоже очень важен.

туго натянутая тетива лука. Сама по себе струна создает слабый звук – уже на расстоянии двух-трех метров он почти не слышен. Потому что струна, даже самая толстая, увлекает за собой сравнительно небольшую массу воздуха. Чтобы вовлечь в движение большие массы воздуха, струну объединяют с излучателем, имеющим значительную колеблющуюся поверхность. У скрипки, гитары, контрабаса такой излучатель – это сам корпус инструмента, у рояля – резонансная дека (доска), над которой натянуты струны. Излучатель, резонируя на разных частотах, усиливает, подчеркивает определенные гармоники колебаний струны, окончательно формирует тембр. Те области частотного спектра, которые подчеркиваются, усиливаются инструментом, называются формантами. Звучание инструмента сильнее всего зависит от ширины формантных областей, от того, на какую часть спектра они приходятся. Так, например, у знаменитых скрипок Страдивари главная форманта находится в области 3200–4200 Гц, а у рядовой скрипки – в районе 2200–2800 Гц (рис. 14.3; 1).

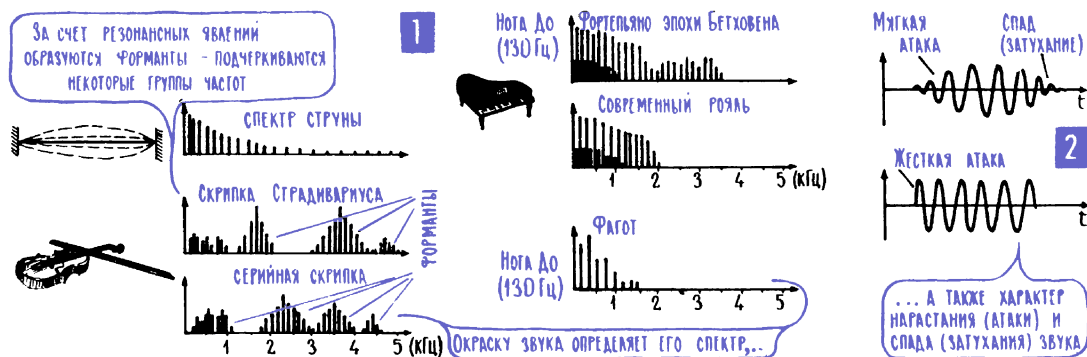


Рис. 14.3. Особенности музыкальных звуков

Основное звучащее тело в духовых инструментах – столб воздуха. В зависимости от того, каким образом он приводится в движение, различают духовые инструменты язычковые (кларнет, гобой, саксофон, фагот) и безязычковые (флейта, свирель). В язычковых инструментах потоки воздуха заставляют колебаться упругий язычок, тонкую деревянную, металлическую или тростниковую пластинку, и сложная колебательная система «язычок – столб воздуха» определяет звучание инструмента. К язычковым относят и так называемые амбушюрные инструменты (труба, тромбон, пионерский горн), где роль колеблющегося язычка выполняют определенным образом сложенные губы музыканта. К язычковым духовым инструментам, строго говоря, нужно отнести баян, гармонь, аккордеон: здесь металлические язычки приводятся в движение воздухом, который нагнетают мехи.

Безязычковые духовые инструменты часто называют свистковыми: звук возникает в них примерно так же, как и в обычном свистке. Быстрый

поток воздуха, зацепившись за острый край так называемой губы, начинает колебаться и возбуждать звуковые колебания всего воздушного столба. Точно так же создается звук во многих органных трубах. В старинных органах воздух нагнетали большими мехами, а сейчас для этого используют мощные электрические вентиляторы. Органист, нажимая на клавиши, переключает потоки воздуха, подает их на разные трубы, меняя высоту и тембр звука. В современном органе несколько тысяч труб, самые низкочастотные имеют длину более 10 м, самые высокочастотные – около 1 см. Во всех же остальных духовых инструментах только одна труба, и для изменения высоты звука меняют ее действующую длину. Для этого с помощью клапанов, а иногда с помощью пальцев перекрывают отверстия в самой трубе (кларнет, фагот), направляют воздушный поток в ее ответвления (труба, валторна) или меняют длину трубы с помощью выдвижного колена (тромбон). Кроме того, можно менять частоту, пользуясь различными приемами вдувания воздуха, как это делают, например, горнисты.

В спектре ударных инструментов составляющие расположены так близко друг к другу, что и их приходится рассматривать как сплошные полосы частот. Тембр звучания зависит от того, как распределяется мощность между участками такой полосы.

7. В одноголосом ЭМИ в каждый момент времени может звучать только одна нота, мелодия формируется из последовательных звуков. Одно из эффективных выразительных средств музыки – аккорды, то есть одновременное звучание нескольких нот. Чтобы звучал аккорд, нужно иметь несколько одновременно работающих источников звука, например несколько струн. В рояле их 88 (вообще-то струн намного больше, каждая клавиша ударяет по двум-трем одинаково настроенным струнам, что придает особую окраску звуку), и поэтому здесь возможны огромные многозвучные аккорды. Рояль – многоголосый инструмент. В гитаре 7 струн⁴, и в принципе гитарные аккорды могут быть семизвучными. А вот на трубе или на саксофоне аккорда не возьмешь: это одноголосые инструменты.

Электромузыкальные инструменты тоже бывают одноголосыми и многоголосыми. В одноголосом ЭМИ только один генератор, в нем с помощью клавиатуры или иным способом переключают элементы схемы, которые определяют частоту (рис. 14.4; 1). В таком одноголосом ЭМИ ак-

⁴ Примерно до 1960-х годов в отечественной музыкальной практике доминировала 7-струнная гитара (ее еще называют цыганской). Начиная с этого времени она быстро вытесняется 6-струнной (испанской) гитарой, более простой в освоении и универсальной – в частности, все версии электрогитар (соло-, ритм- и бас-гитары) основаны на 6-струнной гитаре, на нее также ориентировались зарубежные классические композиторы в своих пьесах для гитарного исполнения. В российской музыкальной классике гитара в качестве самостоятельного инструмента не рассматривалась, только как аккомпанирующий инструмент в приложении к вокалу.

корды звучать не могут, он поет только одним голосом, как флейта, как человек.

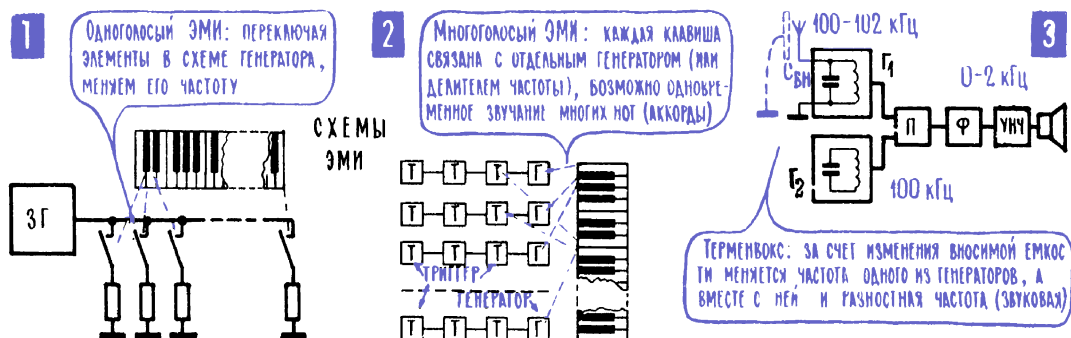


Рис. 14.4. Одноголосые и многоголосые ЭМИ

В качестве генератора одноголосого ЭМИ можно использовать мультивибратор. Правда, в симметричном мультивибраторе (рис. 11.4; 1) изменением одного элемента, например изменением сопротивления одного из резисторов, удастся менять частоту в сравнительно небольших пределах, в лучшем случае в два раза. Попытка одним элементом схемы изменить частоту в больших пределах настолько меняет режим мультивибратора, что может просто наступить срыв колебаний. Чтобы в симметричном мультивибраторе изменять частоту хотя бы на две октавы (в четыре раза), нужно переключать несколько схемных элементов, а это уже неудобно.

На рис. 11.4; 4 показана схема мультивибратора, частоту которого можно легко менять в четыре–восемь раз (две-три октавы), меняя сопротивление только одного резистора R_3 . Такой генератор часто можно встретить в ЭМИ, особенно в простейших. Если такой генератор работает в клавишном одноголосом ЭМИ, то для каждой клавиши должно быть свое сопротивление резистора R_3 . Поэтому R_3 составляют из большого числа резисторов, и настройка инструмента сводится к подбору каждого из них с таким расчетом, чтобы при нажатии на клавишу ЭМИ давал звук нужной частоты.

В одноголосых ЭМИ могут применяться блокинг-генераторы (рис. 11.5), RC-генераторы (рис. 11.3) и LC (рис. 11.2); последние, правда, в простых схемах встречаются довольно редко. В частности, потому, что менять частоту и производить настройку инструмента подбором конденсаторов или катушек сложнее, чем подбором резисторов. Единственный несложный способ изменения частоты LC-генератора – это использование катушки с отводами и точно рассчитанной индуктивностью отдельных секций. Но такая система не позволяет простыми средствами подстраивать частоты, соответствующие отдельным клавишам. Значительные трудности связаны также с тем, что для получения низких частот нужны большие индуктив-

ности: снизить частоту только за счет увеличения емкости нельзя, может оказаться слишком низкой добротность контура (гл. 7; 9)⁵.

Первым электронным музыкальным инструментом был терменвокс, много лет назад его изобрел и построил молодой петроградский физик Лев Термен. В 1921 году в Кремле изобретатель демонстрировал свой терменвокс Владимиру Ильичу Ленину, а спустя несколько лет совершил много гастрольных поездок по стране и миру, с большой концертной программой выступал в лучших залах Парижа, Берлина, Нью-Йорка, Лондона. Терменвокс – одноголосый инструмент, звуковая частота в нем получается с помощью двух высокочастотных генераторов, сигналы которых подаются на нелинейный элемент, детектор. В результате появляется разностная частота (гл. 11; 18), которую вгоняют в низкочастотный диапазон, меняя частоту одного из высокочастотных генераторов. И таким же способом, изменяя одну из высоких частот, переходят от одной ноты к другой. В терменвоксе управление высокочастотным генератором производится весьма эффектно: в контур одного из генераторов включен штырь, и, приближая к нему руку, исполнитель меняет емкость контура, меняет одну из высоких частот, а значит, и разностную, низкую частоту (рис. 14.4; 3). Терменвокс и сегодня можно встретить на концертной эстраде, главным образом в ансамблях электромузыкальных инструментов, его модель нетрудно изготовить и самому (см. *Практикум* в конце этой главы).

Примечание редактора. Терменвокс, первый в мире электронный музыкальный инструмент, занимает особое место среди других ЭМИ – он всегда применялся как совершенно отдельный, самостоятельный музыкальный инструмент, тогда как остальные ЭМИ, как правило, лишь имитируют и расширяют возможности обычных инструментов (как электронный синтезатор). Терменвокс и сегодня остается популярным по всему миру, существует посвященный ему сайт (theremintimes.ru), работает школа игры на этом инструменте под управлением Петра Термена, правнука изобретателя, проводятся конкурсы и концерты. Нередко терменвокс звучит в саундтреках к фильмам и телесериалам, отечественным и зарубежным (список на сайте kinopoisk.ru включает около 50 названий). С 1954 года терменвокс выпускается серийно американской фирмой «Moog», ее инструмент считается классическим, хотя создано много других конструкций. Хороших исполнителей на терменвоксе не очень много – инструмент признан одним из самых сложных в освоении. Одним из самых виртуозных исполнителей в мире считается Лидия Кавина, которая изучала терменвокс еще под руководством самого Льва Сергеевича Термена, как и внучка изобретателя Наталья Термен, мать и учительница Петра Термена.

⁵ Отметим, что общим недостатком электромузыкальных инструментов, использующих перечисленные типы простейших релаксационных генераторов, является неестественность тембровой окраски звука – ведь колебания здесь получаются прямоугольной или, хуже того, импульсной формы, весьма далекой и от чистого синуса, и от тембровых искажений, присущих обычным музыкальным инструментам. Поэтому в хороших электромузыкальных инструментах применяются более совершенные генераторы, например гармонические, а не релаксационные (см. гл. 7; 4, а также *Практикум* в главе 11).

Несмотря на то что одноголосый инструмент не дает аккордов, звучание его может быть очень эффективным. Все зависит от того, какие тембры удастся создать. Здесь уместно вспомнить одноголосый музыкальный инструмент московского инженера А. Володина «Эквадин В-8», который на Всемирной выставке в Брюсселе в 1957 году получил высшую награду «Гран-при». В этом инструменте десятки тембров, легким нажатием нескольких кнопок, заменой определенных электрических цепей можно в огромных пределах менять тембр «Эквадина», имитировать звучание скрипки, виолончели, фagота, органа, трубы и многих других инструментов.

8. Для формирования тембров используются нелинейные элементы, фильтры, формантные фильтры, элементы изменения атаки, умножители и делители частоты. Наш слух хорошо чувствует малейшие изменения в спектре звука. Достаточно сказать, что человек с хорошим слухом замечает 10–15 гармоник звукового сигнала. Музыканты различают в звучании оркестра или хора голоса отдельных певцов, отдельные инструменты. Рассказывают, что известный дирижер Артуро Тосканини однажды остановил репетицию большого симфонического оркестра и сделал замечание какому-то скрипачу: в его скрипке одна из струн была слегка расстроена. Острый слух замечает даже небольшие изменения в цепях электромузыкального инструмента, в которых формируется его тембр. Однако резкие изменения тембра, например переход от мягкого звучания органа к резкому звучанию трубы, требуют резких изменений формы сигнала, серьезных перестроек в цепях формирования тембров.

Одна из возможностей резко изменить форму сигнала – его нелинейное искажение. Осуществить это можно многими разными способами. Можно, например, оставить усилительный каскад без смещения и «срезать» один из полупериодов (рис. 12.9; 3 и рис. 14.5; 1), или, резко увеличив уровень сигнала на входе усилителя, ограничить его по максимуму и по минимуму. В формирователе тембров удобно иметь трансформатор, с его помощью легко включить ограничивающий диод или двухполупериодный мостовой выпрямитель, который вообще сделает сигнал неузнаваемым. Некоторые изменения в таком выпрямителе, нарушающие симметрию схемы, тоже довольно резко меняют характер звучания.

Заметно влияют на характер звучания различные фильтры, в том числе и простейшие: фильтр $R_{\phi 2}, C_{\phi 2}$, срезающий высшие частоты, и фильтр $R_{\phi 1}, C_{\phi 1}$, срезающий низшие частоты (рис. 14.5; 3). И совсем уже резко меняют характер звука формантные фильтры, настроенные на ту или иную частоту звукового диапазона. Простейший формантный фильтр получается, если к обмотке трансформатора с большим числом витков подключить конденсатор (рис. 14.5; 4). Подбирая его емкость C_1 или $C_1 + C_2$, можно менять частоту настройки фильтра. С помощью шунтирующего сопротивления $R_{ш}$ можно менять добротность фильтра, а значит, остроту резонанса.

нансной кривой и ширину подчеркиваемой полосы частот (рис. 14.5; 5). Заметный эффект дает применение двух или трех формантных фильтров, настроенных на разные частоты (рис. 14.5; 5).

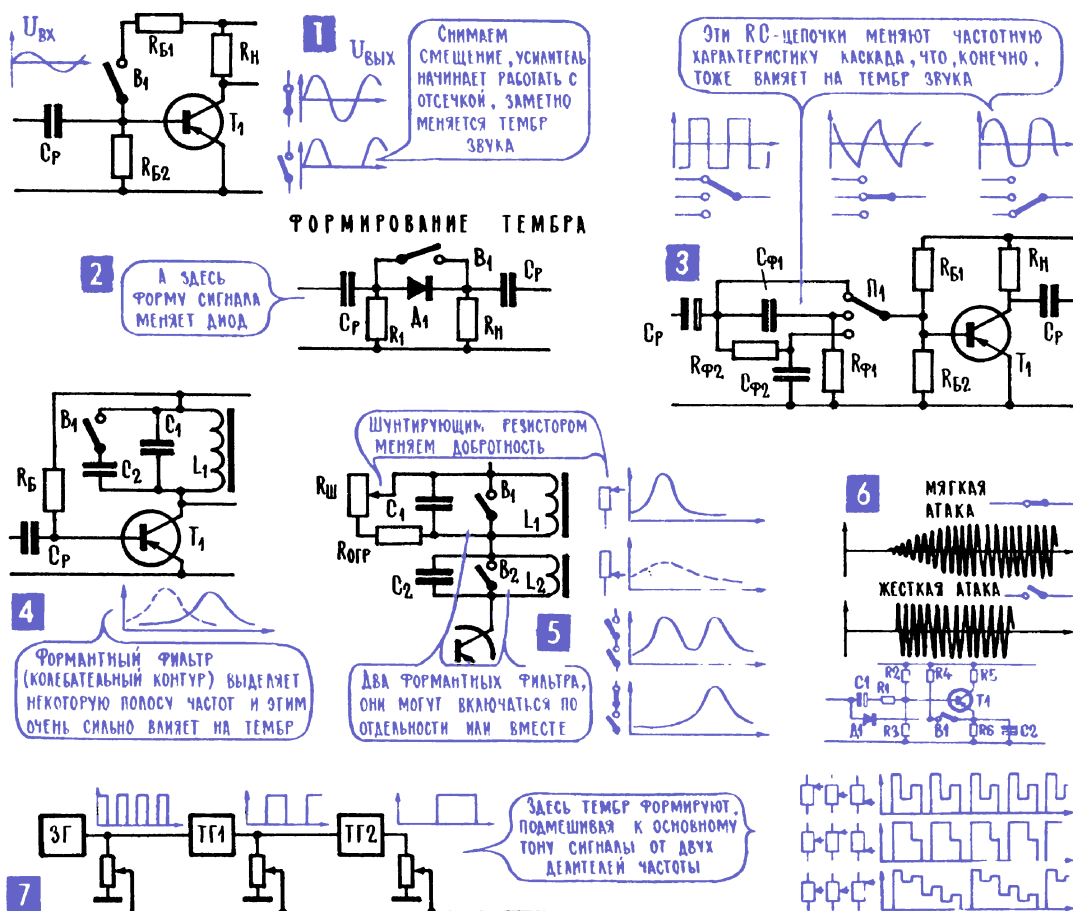


Рис. 14.5. Способы формирования тембра в ЭМИ

У всякого музыкального звука различают три части – атаку, установившуюся стационарную часть и спад. Характер звучания зависит в очень сильной степени от того, как нарастает и спадает звук, от характера атаки и спада (рис. 14.3; 2). Был проделан такой опыт: музыкантам предложили прослушать запись нескольких разных инструментов, причем звук включали после окончания атаки, во время установившегося звучания. И оказалось, что даже опытные музыканты при этом путали один инструмент с другим. Изменение атаки – задача сложная. В простейшем случае она решается с помощью RC-цепочек, которые после нажатия клавиши начинают заряжаться (или разряжаться) и постепенно открывают один из транзисторов, усиливающих сигнал.

Очень сильно меняет характер звучания подмешивание к основному сигналу других сигналов, с иными частотами и спектрами. Проще всего такое подмешивание осуществить с помощью триггеров, которые делят частоту основного генератора (гл. 11; 17). С помощью триггера можно ввести в спектр сигнала составляющие с частотой в два, четыре, восемь раз более низкой, чем основная частота. А можно увеличить уровень сигнала одного из триггеров, сделать его основным, и тогда получится, что к нему подмешиваются составляющие с более высокими частотами (рис. 14.5; 7).

Такая же тактика – деление частоты с помощью триггеров – широко используется в многоголосых электромузыкальных инструментах.

Примечание редактора. Разработку самодельных ЭМИ значительно облегчило появление интегральных счетчиков, а также коммутационных микросхем – мультиплексоров/демультиплексоров, с помощью которых можно с небольшими трудозатратами получать целый набор частот. Кроме того, операционные усилители позволяют производить с сигналом различные манипуляции гораздо проще и более предсказуемо, чем простые RC- и LC-фильтры. Еще больше упростило задачу появление DSP (Digital Signal Processor, цифровой процессор обработки сигналов), в которых осуществимы в принципе любые манипуляции с сигналом, и они при этом полностью переносятся в область программирования, минуя трудоемкие ручные операции налаживания громоздкой схемы и подбора деталей. Следует только учесть, что работа с DSP (да и с обычным микроконтроллером тоже), помимо обычных навыков, характерных для традиционного радиолюбительства, требует опыта в области программирования, и нередко – для рассматриваемой цели построения ЭМИ особенно! – основательной математической подготовки и теоретических знаний.

9. В многоголосом ЭМИ одновременно может работать большое число источников сигнала, возможны различные звукосочетания, аккорды. Казалось бы, есть только один путь создания многоголосого ЭМИ: в нем нужно иметь для каждой ноты свой собственный генератор – так же, как в рояле для каждой ноты есть своя струна. Однако, используя триггеры, можно создать многоголосый ЭМИ по другой схеме, имея в инструменте всего 12 генераторов – для всех нот одной, самой высокочастотной октавы. А затем частоту каждого генератора можно делить с помощью триггера и перейти к следующей, более низкочастотной октаве. Таким образом, имея 12 генераторов и 12 триггеров, можно получить двухоктавный многоголосый ЭМИ; добавив к нему еще 12 триггеров, увеличить число октав до трех и т. д. Можно сказать, что инструмент, выполненный по такой схеме, имеет 12 цепочек – «до», «до-диез», «ре», «ре-диез» и т. д., и в каждой цепочке есть свой генератор и триггеры, которые меняют основную частоту в два раза, переводят ноту в следующую октаву (рис. 14.4; 2).

По числу элементов и по сложности схемы многоголосый ЭМИ с делителями частоты практически не отличается от инструмента с отдельными

генераторами на каждую ноту. Но зато система с делением частоты имеет одно важное достоинство, связанное со стабильностью настройки инструмента. Как правило, частота генератора с течением времени меняется, например из-за изменения магнитных свойств сердечника катушки в LC-генераторе или сопротивления резисторов в мультивибраторе. В инструменте, где на каждую ноту имеется отдельный генератор, возможности расстройки довольно велики: расстроиться может каждый из генераторов. К тому же первоначально настроить такой инструмент тоже непросто: нужно подгонять элементы схемы в каждом из генераторов. А в инструменте с делителями нужно подбирать и подстраивать частоту только 12 генераторов: если основные генераторы будут настроены точно, то триггеры автоматически разделят их частоту на два, на четыре, на восемь... Настроив 12 генераторов, мы настраиваем весь инструмент.

Для многоголосых инструментов сохраняют свою силу все рекомендации по формированию тембров, причем здесь открываются богатейшие возможности подмешивания частот, которые в многоголосом ЭМИ имеются в большом ассортименте (рис. 14.5; 7).

Здесь, разумеется, были сообщены лишь самые предварительные сведения об электромузыкальных инструментах. Более обширная информация о них имеется в нескольких популярных книгах. Кроме того, для знакомства с этой интересной областью электроники может оказаться весьма полезным самостоятельное конструирование электромузыкальных инструментов, пусть даже не очень сложных. Что же касается общей программы нашего путешествия в электронику, то знакомство с электромузыкальными инструментами знаменует собой окончание довольно большого участка пути. Мы завершаем знакомство с устройствами для передачи, записи, воспроизведения и синтеза звука.

Практикум. Модель терменвокса

Существуют десятки вариантов терменвокса – электронного музыкального инструмента, первую модель которого сконструировал выдающийся изобретатель Лев Сергеевич Термен еще в 1919 году. Есть терменвоксы на электронных лампах, транзисторах, микросхемах всяческих разновидностей и даже на микроконтроллерах. Сразу скажем, что сконструировать и построить настоящий терменвокс, пригодный для концертных выступлений, – непростая задача даже для опытного электронщика, столько мелочей там надо предусмотреть. Фирменные инструменты недаром стоят десятки и даже сотни тысяч рублей. Но небольшую модель инструмента соорудить может каждый. За основу приведенной ниже конструкции взята любительская схема из архива официального сайта *theremintimes.ru*, в которой исправлены ошибки, а также огрехи при подборе компонентов.

Принцип работы терменвокса очень прост и проиллюстрирован блок-схемой, приведенной на рис. 14.6. Имеются два идентичных генератора достаточно высокой частоты (около 100 кГц), сигналы которых смешиваются в частотном смесителе, в результате чего образуется частота, равная разности частот этих генераторов (см. гл. 14; 7). В исходном состоянии частоты генераторов равны, разностная частота равна нулю и на усилитель не поступает никакого сигнала.

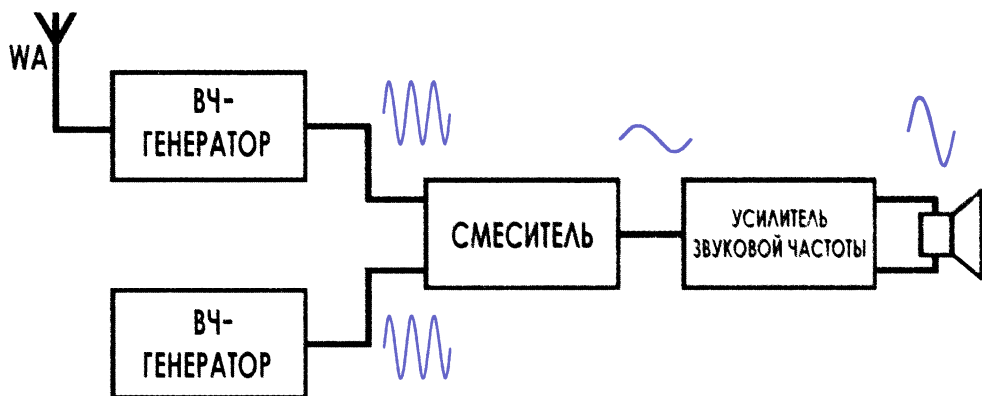


Рис. 14.6. Принцип устройства терменвокса

К одному из генераторов подключена антенна WA. Если к ней поднести руку, то емкость человеческого тела изменит частоту генератора. На выходе смесителя появится разностная частота, находящаяся в звуковом диапазоне. Она поступает на усилитель и затем на динамический громкоговоритель – терменвокс начинает звучать. Тон звучания (то есть значение разностной частоты) зависит от положения руки музыканта – чем ближе, тем больше дополнительная емкость и выше тон звучания. В настоящем терменвоксе имеется еще вторая антенна, с помощью которой музыкант управляет громкостью звука, но в нашей модели мы обойдемся без нее.

Принципиальная схема приведена на рис. 14.7. Она основана на двух генераторах, построенных на логических элементах «И-НЕ» из двух микросхем DD1 и DD2 типа CD4011 (см. *Практикум* к главе 10). Генераторы по умолчанию настроены на одинаковую частоту около 90 кГц, переменный резистор R_3 служит для точной подстройки частоты. В качестве смесителя использован четвертый элемент «И-НЕ» микросхемы DD2, в качестве усилителя – составной транзистор (транзистор Дарлингтона, см. рис. 12.8) типа КТ972Б. В качестве антенны WA можно применить просто медный или алюминиевый штырь длиной 20–30 см, но лучше использовать телескопическую антенну от портативного радиоприемника.

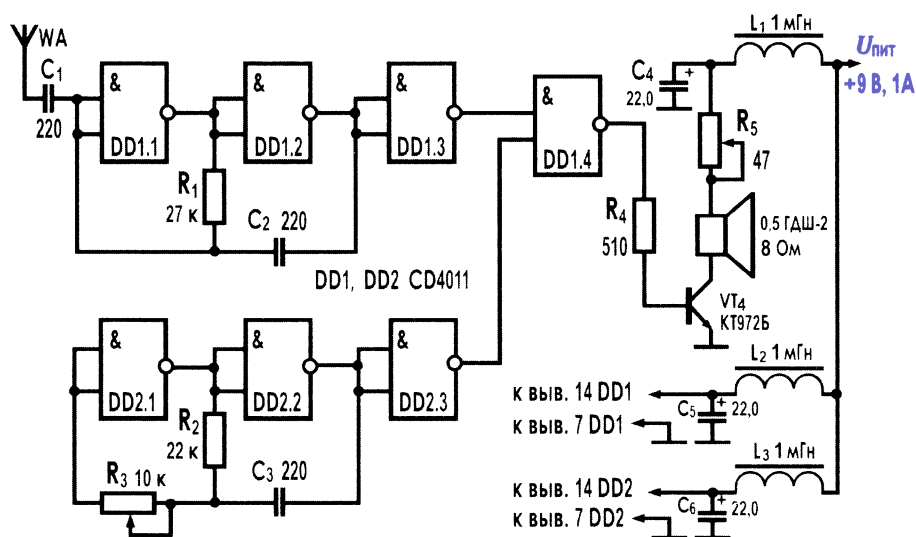


Рис. 14.7. Принципиальная схема модели терменвокса

В разводке питания схемы есть одна особенность, несоблюдение которой может привести к неработоспособности устройства. Если на одной плате размещены два генератора близкой частоты, имеющие общее питание, то в большинстве случаев можно наблюдать явление, известное как «захват частоты» – генераторы начинают работать на одной частоте и не поддаются регулировкам. Во избежание этого явления цепи питания обоих генераторов, а также усилителя должны быть очень хорошо изолированы друг от друга по частоте – развязаны. Обычных в таких случаях простых емкостных фильтров недостаточно – в данной схеме используются LC-фильтры. Дроссели L_1 – L_3 покупные герметизированные, их индуктивность можно менять в пределах от долей до единиц миллигенри.

В качестве электролитических конденсаторов фильтров C_4 – C_6 (на схеме указана емкость 22 мкФ, но ее также можно менять от 10 до 100 мкФ) лучше применить танталовые; они дороже обычных алюминиевых, но имеют лучшие частотные свойства. Если танталовых конденсаторов не имеется, то параллельно алюминиевым лучше дополнительно поставить неполярные керамические емкостью 1 мкФ.

Вместо транзистора КТ972Б можно применить любой составной средней и высокой мощности типа n - p - n (например, КТ8116А, импортный BC517 и т. п.) или просто составить такой транзистор самостоятельно из любой имеющейся под рукой пары маломощный–мощный (КТ3102 + КТ815 или КТ817, например). Схема показана на рис. 12.8, только дополнительно необходимо точку соединения эмиттера первого (маломощного) транзистора с базой второго соединить с эмиттером второго (мощного) транзистора через резистор 1–10 кОм.

Отметим, что в таком простом варианте схемы есть много недостатков – например, при совпадении фаз генераторов на базу транзистора будет поступать высокочастотный меандр, который половину времени будет держать транзистор открытым. То есть выходной сигнал будет содержать существенную постоянную составляющую, которая приведет к излишнему расходу энергии и нагреву динамика. Есть и другие недостатки, очевидные и не очень, но избавляться от них – значит усложнять схему, что для простой модели не имеет смысла. Главную функцию – иллюстрировать принцип работы терменвокса – она вполне выполняет.



ГЛАВА 15

Доверено автоматам

1. Управление многими процессами доверяют автоматам, они часто работают быстрее и лучше человека-оператора. Свое знакомство с электроникой мы начали с того, что назвали главные задачи, которые решаются с ее помощью, – это сбор, хранение, передача и переработка информации (гл. 7; 19).

С первыми тремя профессиями электроники мы уже много раз встречались в линиях радиосвязи, радиовещания, устройствах звукозаписи, телевизионных системах. Что же касается переработки информации, то в большинстве случаев нам нужно было не перерабатывать, не изменять ее, а, наоборот, по возможности сохранить неизменной: на экране телевизора получить как можно более точную копию того, что видит передающая телевизионная камера, от громкоговорителей приемника или магнитофона получить как можно более точную копию речи или музыки, которые звучали перед микрофоном. А вот в устройствах автоматики, автоматического управления переработка информации – основной процесс, основная задача всех операций с электрическими сигналами.

Среди информационных процессов в живой природе, в машинах, в самой нашей жизни (гл. 7; 1) управление – один из самых распространенных. Примеры долго искать не нужно, куда ни глянешь – повсюду идут процессы управления. Определенные центры нервной системы должны точно управлять многими тысячами мышечных волокон, чтобы человек мог бегать, ходить или даже просто стоять на месте, не теряя равновесия. Пилот управляет работой двигателей, рулями высоты и поворота, чтобы самолет аккуратно взлетел, по заданному маршруту прибыл в нужный аэропорт и точно совершил посадку. Управлением занимается оператор подъемного крана, регулировщик уличного движения, директор завода, машинист электровоза, контролер кинотеатра, руководитель запуска космического корабля.

Из нескольких этих примеров можно увидеть, из чего складывается типичный процесс управления. Это сбор информации («Машина подвезла контейнер кирпичей»; «На Садовой улице скопилось много автомобилей»; «Второй цех не выполняет план»; «Идем со скоростью 500 километ-

ров в час»; «Это билет на следующий сеанс»; «Время предварительной готовности исчерпано, все системы ракеты в норме»), сравнение собранной информации с тем, что хранится в памяти или записано в планах, расписаниях, проектах, и, наконец, выработка новой информации, выдача команд управления («Повернуть стрелу крана, опустить трос»; «Включить на Садовой улице зеленый свет»; «Ввести двухсменную работу»; «Увеличить скорость»; «Посоветовать прийти через два часа»; «Ключ на старт»). Какой бы пример управления мы ни рассматривали, всегда в том или ином виде в нем можно найти эти три элемента – сбор информации, ее переработку и выдачу команд управления.

С давних пор человек стремится создать системы, которые без него, то есть автоматически, управляли бы тем или иным процессом. Первыми автоматами, наверное, были капканы, которые освободили первобытного охотника от огромных затрат времени, увеличили, как мы сейчас говорим, производительность его труда, позволили сразу охотиться в нескольких местах. Вместо того чтобы самому сидеть и ждать зверя, а заметив его, дернуть за веревку, привести в действие ловушку, какой-то изобретательный охотник поручил эту работу автомату. Нехитрое приспособление, по нынешней терминологии «датчик», получив информацию о том, что зверь попал в ловушку, само приводило капкан в действие.

Эта замечательная способность автоматов беречь наше время, внимание, освобождать человека от тоскливой примитивной работы и сегодня оказывается одной из главных движущих сил автоматизации. До 1959 года на станциях метро работали сотни девушек-контролеров, которые только то и делали, что отрывали корешки билетов и пропускали пассажиров. Сегодня со всей этой однообразной и гигантской по объему работой (через контрольные пункты московского метро ежедневно проходит 5–6 млн пассажиров¹) справляются довольно простые электронные автоматы. Или возьмите другой пример – автомобильный стеклоочиститель. Если бы не простейший автомат, то водителю пришлось бы каким-то образом самому непрерывно менять направление движения «щетки», заставляя ее двигаться туда-обратно.

В автомобиле можно встретить и другие автоматы. Один из них управляет системой охлаждения, поддерживает на постоянном уровне температуру двигателя, второй регулирует напряжение генератора, в нужный момент подключает к нему для зарядки аккумулятор, третий поддерживает необходимый уровень бензина в карбюраторе. Если бы не эти автоматы, то шоферу, наверное, нужно было бы иметь ассистента, иначе ему просто некогда было бы следить за дорогой. В современных машинах столько раз-

¹ Удивительно, но за три с половиной десятилетия после выхода книги эта цифра увеличилась мало: в 2018 году среднее число пассажиров в сутки составило 7 млн человек. Хотя число станций увеличилось с начала 1980-х по 2018 год вдвое (со 115 до 232, без учета МЦК), а общая длина путей выросла со 194 км до 330 км.

ных автоматов, что все они, наверное, в тысячи раз увеличивают возможности работающего человечества². Кроме того, автоматы прекрасно работают в условиях, просто непереносимых для человека, скажем, в атомных реакторах, на далеких планетах, во вредных агрегатах химических заводов. Автоматам часто поручают такие процессы, которыми человек вообще управлять не может: ему не хватает на это скорости реакций или объема внимания. У автоматических регистраторов ядерных частиц порой есть лишь несколько миллиардных долей секунды на то, чтобы заметить частицу и привести в действие аппаратуру для фотографирования ее полета. Автоматы, управляющие запуском гигантской ракеты, за тысячные доли секунды улавливают малейшее ее отклонение от расчетного курса и дают необходимые команды на реактивные рули.

А вот пример иных масштабов из совсем другой области: автомат, заворачивающий конфеты на кондитерской фабрике, за секунду выполняет десятков сложных операций, причем безотказно повторяет их двадцать-тридцать тысяч раз за смену.

2. В системах автоматического управления и контроля широко используются электрические и электронные автоматы. Разнообразных автоматов существует огромное множество. Они различаются и по своему назначению, и по устройству, и по своим взаимоотношениям с оператором-человеком. Иногда автомату доверяют управление всем процессом полностью, иногда ему поручают часть работы, а иногда автомат лишь собирает сведения о том, как идет процесс, ведет автоматический контроль, а решения принимает человек.

Различаются автоматы и по тому, в каком виде представлена в них информация. Есть автоматы чисто механические, как, например, часы, где механическое перемещение маятника управляет работой сложного механизма, а вся программа действий записана в конфигурации шестерен и их взаимном расположении. Бывают автоматы гидравлические и пневматические, в них информация тем или иным способом записана в потоках жидкости или газа. Есть автоматы и электрические, в них главные действующие лица – это токи и напряжения, электрические сигналы.

Во многих случаях электрические автоматы управляют электрическими же процессами. К таким электрическим автоматам для электрических систем нужно отнести и многочисленные элементы «малой автоматизации» в электронных схемах, например автоматическую стабилизацию режима транзистора (гл. 10; 21), автоматическую подстройку частоты или автоматическую регулировку усиления. Но очень часто электрический автомат

² Современные автомобили дошли в этом отношении до логического конца: число регуляторов возросло настолько, что управиться со всем этим хозяйством может только бортовой компьютер со своей операционной системой, нередко снабженной элементами искусственного интеллекта, без такого компьютера машина даже не сможет сдвинуться с места.

приглашают на работу в совершенно чуждую для него область: он управляет температурой, ходом химических реакций, скоростью движения, процессами, не имеющими никакого отношения к электричеству.

Использование электричества для управления неэлектрическими процессами связано с замечательными особенностями электрических сигналов – их легко перерабатывать: складывать, вычитать, сравнивать, разделять по определенным признакам. Их можно легко и быстро передавать на большие расстояния, распределять между многими потребителями, собирать с многих источников. И наконец, разнообразные датчики позволяют легко перевести на электрический язык, отобразить в электрических сигналах самые разные неэлектрические характеристики – температуру, скорость движения, освещенность, давление, химический состав.

Возможности электрических автоматов резко расширяются, когда они становятся электронными, когда появляется возможность усиливать сигналы, менять их форму, умножать и делить частоту, записывать в память и считывать – словом, производить разнообразные преобразования сигнала, которые умеет делать электроника.

3. Датчики – органы чувств автоматов, они переводят информацию на электрический язык. Помимо уже знакомых нам датчиков (термоэлемента, терморезистора, фотоэлемента, фоторезистора, пьезокристалла, угольного и электродинамического микрофонов, см. рис. 8.2), имеется огромное множество других приборов для сбора информации о самых различных процессах, описания их в виде электрических сигналов. Датчиком перемещения, например, может быть резистор с переменным сопротивлением, если его подвижной контакт связать с движущимся предметом. Датчиком деформации – проволочка с высоким сопротивлением, изогнутая зигзагом и оклеенная бумагой (рис. 15.1; 3). Такой датчик (тензометр) наклеивается на поверхность детали, и когда деталь деформируется, проволока тоже изгибается и несколько растягивается, сопротивление ее меняется. На изменении сопротивления может также основываться действие датчика уровня (см. рис. 15.3; 1 далее), хотя часто в таких датчиках используются другие принципы. Например, изменение индуктивности катушки по мере перемещения в ней ферромагнитного сердечника (рис. 15.1; 1), или изменение емкости конденсатора по мере того, как между его пластинами появляется вещество с иной диэлектрической проницаемостью (рис. 15.1; 2). А если датчик-индуктивность или датчик-емкость включить в цепь переменного тока, то напряжение, которое появится на датчике, покажет, в каком он находится состоянии и какова контролируемая величина, в данном случае уровень жидкости. Потому что напряжение на участке цепи пропорционально его сопротивлению, а индуктивное сопротивление катушки x_L зависит от ее индуктивности L , емкостное сопротивление конденсатора x_C – от его емкости C . На том же принципе работают емкост-

ные датчики влажности, перемещения металлических предметов, расхода жидкостей или газов, скорости потоков.

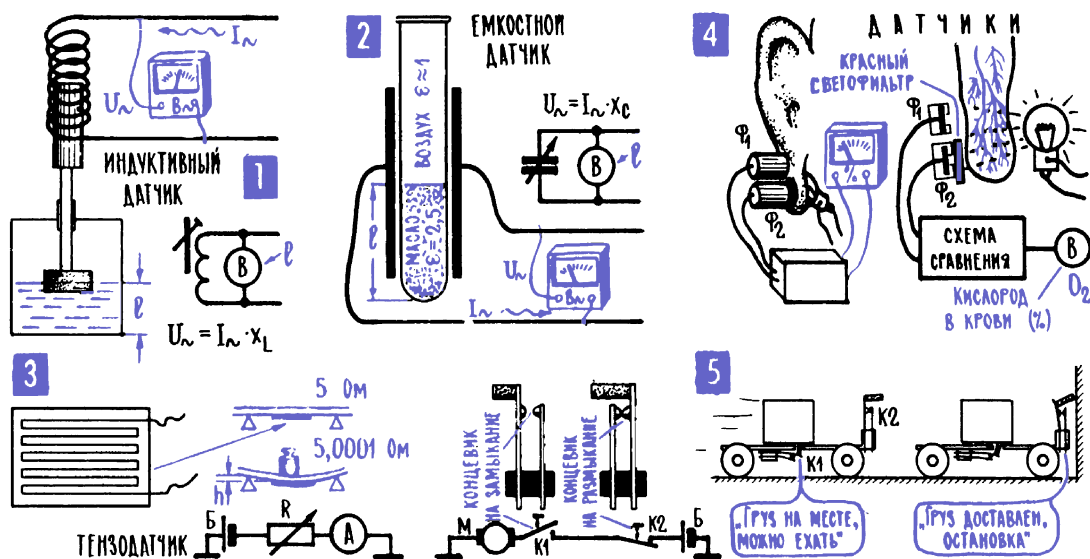


Рис. 15.1. Датчики

Существуют датчики, позволяющие оценить химический состав вещества, например по электрическому сопротивлению пробной его порции, по спектру поглощения или оптической плотности. В качестве примера – один из датчиков для определения процентного содержания кислорода в крови (рис. 15.1; 4). В него входят источник света и два фотозлемента, один из которых закрыт красным светофильтром и воспринимает только красный свет. Датчик подвешивается к мочке уха, сквозь нее проходит свет и падает на фотозлемента. Луч света просвечивает тонкие кровеносные сосуды в мочке уха, и уровень света, попадающего на «красный» фотозлемемент Φ_2 , зависит от того, насколько кровь в этих сосудах насыщена кислородом. Электронная схема сравнивает напряжение на этом фотозлемента с общей освещенностью, которая отражена в напряжении фотозлемента Φ_1 , и такое сравнение позволяет судить о процентном содержании кислорода в крови.

В датчиках можно встретить много остроумных решений, использующих тонкие физические, химические и биологические процессы. Ну, а самый простой датчик – это концевой выключатель (рис. 15.1; 5), который замыкает или размыкает электрическую цепь и тем самым сообщает, что какая-либо деталь заняла определенное положение, пришла на свое место или, наоборот, ушла с него. Такие датчики можно встретить в лифте, где они сигнализируют управляющему автомату, что дверь пока не закрыта и двигаться еще нельзя.

4. **Исполнительные механизмы автоматов – двигатели, электромагниты, реле.** События во всех автоматах разворачиваются примерно по одному и тому же сценарию. Сначала собирается информация или извлекается программа из собственной памяти, или и то, и другое одновременно. Затем информация как-то преобразуется, перерабатывается, автомат принимает решение о том, что нужно делать при тех или иных сочетаниях сигналов, вырабатывает сигналы управления. И наконец, начинается само действие, само управление – по разным адресам рассылаются команды: «повернуть», «открыть», «передвинуть», «нагреть», «погасить», и, подчиняясь этим сигналам-командам, начинают действовать исполнительные механизмы и приборы (рис. 15.2): электродвигатель поднимает кабину лифта на заданный этаж; железные сердечники втягиваются в катушки с током и на заданное время открывают краны, через которые в стакан наливаются сироп и вода; включается электрический подогреватель холодильника, усиливается испарение теплоносителя, и в холодильной камере до заданного уровня понижается температура; электромагнит передвигает контакты мощных выключателей, и они сразу зажигают сотни фонарей уличного освещения.

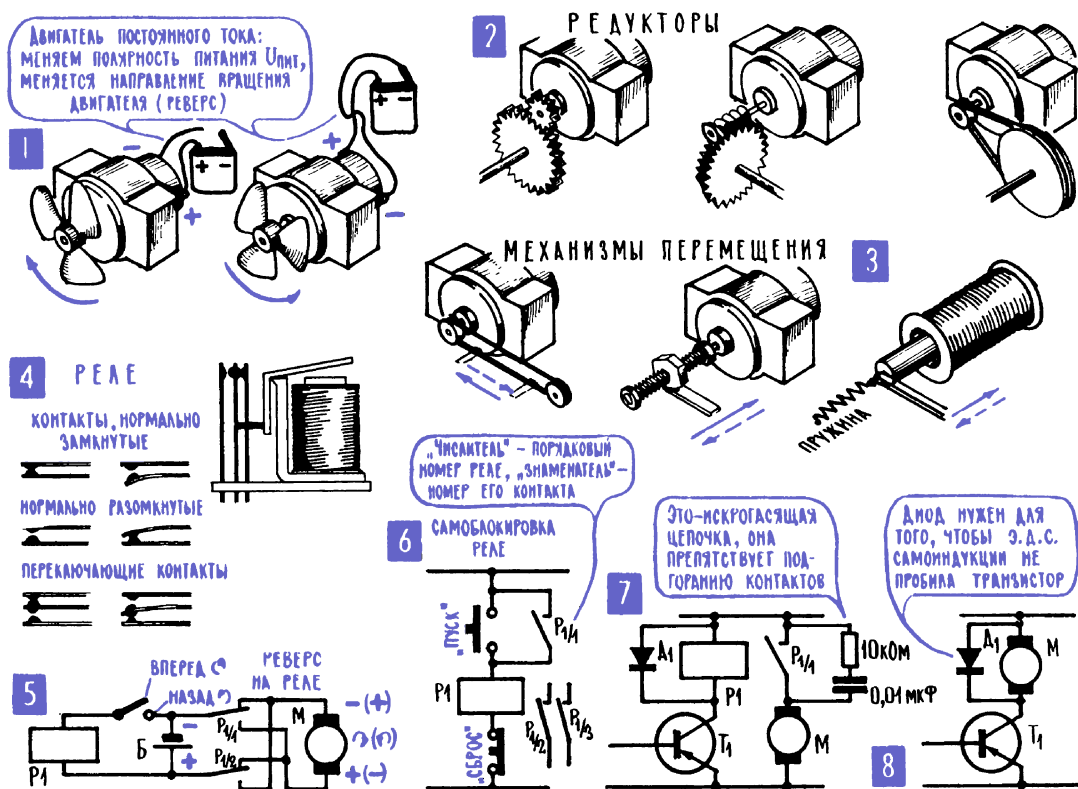


Рис. 15.2. Исполнительные механизмы и электромагнитные реле

Там, где исполнительные механизмы потребляют небольшую мощность, они органически входят в схему автомата, их приводят в действие сами сигналы управления. Но во многих случаях мощности этих сигналов не хватает, и тогда в устройствах автоматического управления появляются разного рода усилители.

Там, где нужно плавно регулировать работу исполнительного механизма (например, плавно менять обороты двигателя), часто используются транзисторные и ламповые усилители постоянного тока. Их главная особенность, как говорит само название, связана с тем, что сигнал управления может меняться очень медленно, и, чтобы усиливать такие очень медленно меняющиеся сигналы (их для образности называют постоянным током), из схемы исключают переходные конденсаторы (гл. 12; 11). Там, где на исполнительный механизм подаются дискретные, ступенчатые команды, такие, например, как «включить», «выключить», «сменить направление тока», в качестве усилителя сигналов чаще всего используют реле. Их существует несколько разных типов, а в радиолюбительских схемах автоматики чаще всего используются электромагнитные нейтральные реле постоянного тока³ (рис. 15.2; 4). Основа такого реле – электромагнит, катушка которого расположена на стальном сердечнике с почти замкнутой магнитной цепью. Когда по обмотке реле идет ток, то стальной якорь под действием магнитного поля притягивается к сердечнику, когда же ток прекращается, пружина отводит якорь обратно. Притягиваясь к сердечнику, якорь нажимает на пружинящие контакты и замыкает их или размыкает, в зависимости от устройства контактной группы реле.

У разных типов реле разное количество контактов. Есть контакты нормально замкнутые, при срабатывании реле они размыкаются, есть контакты нормально разомкнутые, при срабатывании реле они замыкаются, а есть и такие контактные группы, в которых происходит переключение контактов. Таким образом, реле, особенно многоконтактное, кроме того что оно усиливает сигнал, может еще и производить его определенную переработку (рис. 15.2: 5, 6) – перебрасывать ток из одной цепи в другую, направлять в общую цепь разные сигналы, распределять управляющие сигналы между разными исполнительными механизмами. Бывает так, что реле вводят в систему автоматического управления только для того, чтобы производить сложные переключения⁴, хотя, конечно, чаще используется основная профессия реле – их умение усиливать сигналы.

Усилительные возможности реле объясняются очень просто: для притягивания якоря, то есть для срабатывания реле, нужно направить в его

³ Название «реле постоянного тока» означает, что обмотка реле питается постоянным током (в отличие от реле переменного тока), «нейтральное» – что реле нейтрально к направлению тока в обмотке, то есть срабатывает одинаково, независимо от полярности приложенного напряжения (в отличие от поляризованного реле).

⁴ Именно в таком качестве реле использовались в традиционных телефонных сетях (гл. 8; 5). Некоторые исторически первые компьютеры (американские Mark I и Mark II) также были построены на основе электромагнитных реле.

обмотку сравнительно малую электрическую мощность, и в то же время контакты реле могут управлять работой источников и потребителей большой электрической мощности. За словами «малая мощность» и «большая мощность» в данном случае стоят вполне конкретные цифры. Для каждого реле известен ток срабатывания; якорь заставляют притягиваться ампер-витки (гл. 5; 9), и, зная сопротивление реле, легко определить напряжение, которое нужно подвести к обмотке, чтобы получить необходимый ток срабатывания, а значит, и электрическую мощность, нужную для срабатывания (гл. 4; 7, 11). Что же касается мощности, которой может управлять реле, то она главным образом ограничена конструкцией его контактной группы – начальным расстоянием между контактами, площадью их соприкосновения. Если заставить реле переключать слишком большие токи и напряжения, то оно может выйти из строя из-за подгорания контактов. Во всех случаях параллельно контактам полезно включать искрогасящую RC-цепочку, через нее замыкаются опасные высокочастотные составляющие тока искры, из-за которых главным образом и подгорают контакты.

Когда мощности сигнала не хватает для срабатывания реле, его можно объединить с транзисторным усилителем (рис. 15.2; 7), а в некоторых случаях функции реле выполняет сам этот усилитель, работая в ключевом режиме: на входе одно из двух состояний «есть сигнал» или «нет сигнала», и на выходе соответственно «максимальный коллекторный ток» (режим насыщения) или «нет коллекторного тока» (режим отсечки). Транзистор, работающий в таком режиме, часто называют электронным реле (рис. 15.2; 8).

Примечание редактора. Подобный режим транзистора называют ключевым, а сам транзистор – электронным ключом (см. также *Практикум* в гл. 10). В качестве ключей, особенно для управления мощной нагрузкой, сейчас чаще применяют полевые транзисторы с изолированным затвором (MOSFET), чем обычные биполярные. Что касается «электронных реле», то в настоящее время существует особая разновидность компонентов, которые имеют такое название, – по функциональности они идентичны обычным электромагнитным реле с замыкающими или переключающими контактами, но вместо механических контактов, имеющих свойство окисляться и подгорать со временем, снабжены электронными коммутаторами, как правило, на основе управляемых диодов – тиристоров. Электронные реле намного превосходят электромагнитные по параметрам усиления сигналов: они могут переключать мощность в сотни киловатт переменного тока, управляясь током 10–20 мА при напряжении не более 3–5 В прямо от вывода микроконтроллера; при этом цепи управления полностью гальванически развязаны с силовыми цепями. Так как электронные реле не подвержены искрообразованию на контактах, то они более надежны и пригодны для применения, например, в условиях взрывоопасной атмосферы химических производств. Кроме того, в силу особого устройства, отслеживающего момент включения в течение полупериода сигнала, такие реле создают намного меньше помех остальной аппаратуре. Применение электронных реле см. *Практикум* в конце этой главы.

5. В электронных автоматах переработка информации сводится к преобразованию электрических сигналов. Есть автоматы, от которых ничего иного не требуется, как следить за сигналом, поступающим с датчика, и пропорционально изменениям этого сигнала воздействовать на исполнительный механизм. Это так называемые следящие системы, типичные представители которых – системы автоматической регулировки усиления (АРУ) и подстройки частоты (АПЧ) в приемниках, или система, поддерживающая постоянный уровень жидкости в каком-либо резервуаре (рис. 15.3; 1). Следящие автоматы – это пока еще просто исполнительные работники (подобно микрофону или громкоговорителю, которые дословно переводят звук в ток и ток в звук), информация в них никакой переработке не подвергается: что велел датчик, то и делается. К числу таких простых систем относятся и некоторые пороговые автоматы, они даже не интересуются уровнем сигнала все время, а знают лишь одно: достиг этот уровень определенного порога – надо действовать⁵. Именно так, например, поступает автомат уличного освещения (рис. 15.3; 2); вечером, лишь только естественный свет уменьшится до определенного порога, как автомат производит одно из двух действий, которым его научили, – включает уличные фонари; а с рассветом, когда освещенность поднимется выше заданного порога, автомат выполнит вторую из заученных операций – выключит фонари. Потом освещенность может увеличиваться как угодно, автомат на это реагировать не будет.

В автомате уличного освещения, правда, можно уже заметить элемент памяти: установив определенный порог срабатывания, мы заставили автомат запомнить, при каком уровне освещенности нужно включать и выключать фонари. В более явном виде память присутствует в системе установки экспозиции (выдержки) в фотоаппарате с автоматикой (рис. 15.3; 4). Выдержка устанавливается обратно пропорционально току, который дает фотоэлемент: чем больше освещенность, тем больше этот ток и меньше выдержка. Но в систему введены два переменных резистора. Один из них устанавливают в зависимости от чувствительности пленки, второй в зависимости от выбранной диафрагмы. Сопротивление этих резисторов определяет ту часть тока, которая достанется исполнительному механизму, и, значит, при одной и той же освещенности он будет устанавливать разную выдержку в зависимости от сопротивления резисторов. Образно говоря, резисторы всегда напоминают автомату о том, что, устанавливая экспозицию, нужно ввести поправки на пленку и диафрагму, и, оперируя электрическим сигналом (ток через исполнительный механизм), корректируют информацию, поступающую в автомат.

⁵ Подобные автоматы называются релейными (или позиционными) регуляторами (см. Практикум в конце этой главы), в противоположность регуляторам, у которых выходная величина пропорциональна входному сигналу (П-регуляторы – см. далее пример с фотоавтоматом) или зависит от входной по более сложному непрерывному закону.

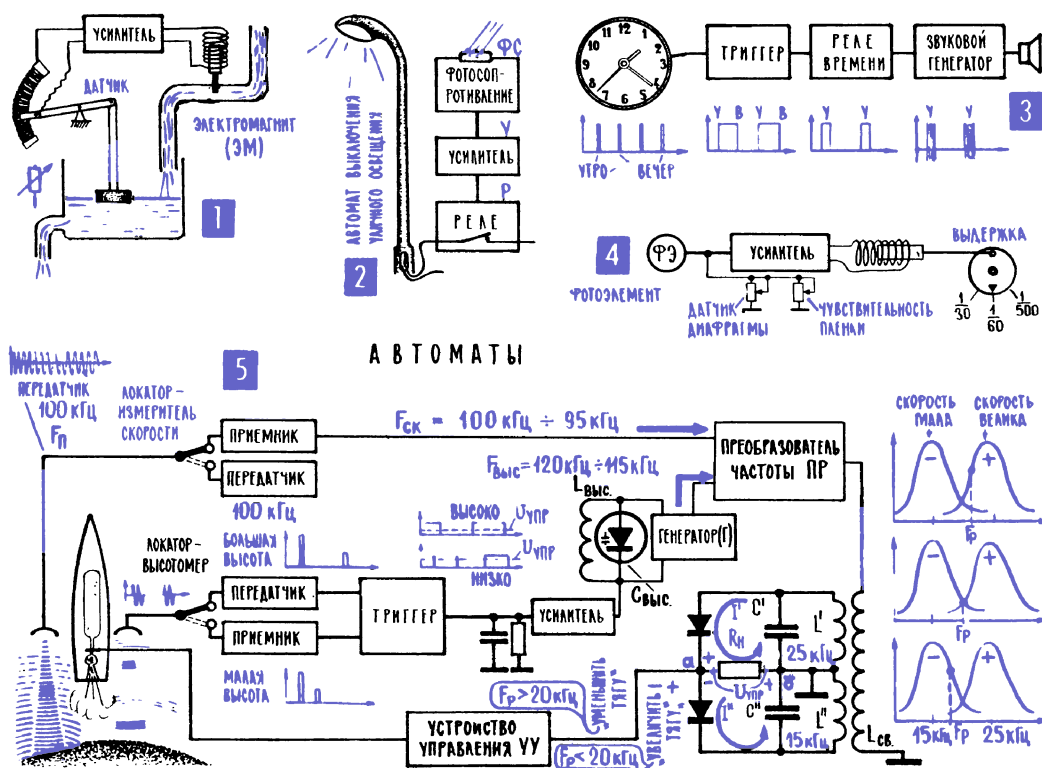


Рис. 15.3. Автоматические регуляторы

Другой пример переработки информации: будильник с электрическим сигнализатором, который включается только через такт, например в 8 часов утра работает, а в 8 вечера нет (рис. 15.3; 3). Для этого в систему просто введен триггер, он делит на два число импульсов от датчика. В будильнике имеется еще один элемент обработки сигналов – реле времени: по короткому импульсу тока от датчика оно заставляет сигнал звучать достаточно долго.

Интересную обработку проходит сигнал в показанном на рис. 15.3; 5 автомате управления ракетным двигателем (эта схема так же, как предыдущие и последующие, не более чем учебная модель, в реальных автоматах все может решаться по-иному). Основа автомата – два радиолокатора: один – измеряющий высоту ракеты, другой – ее скорость. Локаторам, конечно, нужно было бы посвятить особый рассказ, но, поскольку в радиолюбительской практике они встречаются редко, ограничимся лишь коротким упоминанием о них здесь, в разделе электронной автоматики, «придравшись» к тому, что радиолокаторы можно считать особым видом датчиков.

6. Радиолокаторы – датчики расстояния, положения в пространстве, скорости. Локатор, определяющий расстояние, в принципе, устроен очень просто. Передатчик радиолокационной станции посылает короткие им-

пульсы радиосигналов, а приемник регистрирует импульсы, отраженные от объекта. Затем за дело берется точный измеритель времени, он определяет, сколько прошло с момента посылки импульса до момента, когда вернулось его отражение. Скорость радиоволн известна – 300 000 км/с, и по времени путешествия сигнала точно вычисляется расстояние до объекта. Так, например, если сигнал путешествовал 0,1 с, то объект, от которого он отразился, находится на расстоянии 15 000 км (туда-обратно – 30 000 км).

В большинстве локаторов основа измерителя времени – электронно-лучевая трубка⁶. Электронный луч быстро движется по экрану, и одновременно к трубке подводятся дубликаты обоих импульсов – посланного передатчиком и отраженного. Импульсы дважды отклоняют луч вверх, и, таким образом, на экране появляются два ярких выброса. Расстояние между ними как раз и зависит от времени путешествия сигнала: чем больше запаздывает отраженный сигнал, тем позже появится второй выброс на экране. В итоге расстояние между выбросами в определенном масштабе отображает расстояние до объекта. На этом же принципе работают и локаторы кругового обзора: их антенна точку за точкой прочерчивает пространство, и синхронно с ней движется луч на индикаторе, яркими пятнами отмечая все объекты, от которых отражается радиоволна.

Особая группа локаторов – доплеровские измерители скорости, их принцип действия легко понять, вспомнив, как меняется тон паровозного гудка, если поезд проносится мимо вас. Когда поезд приближается, тон высокий, затем он становится все ниже и совсем уже сильно понижается после того, как поезд прошел мимо и удаляется. Такое изменение тона как раз и называется эффектом Доплера, оно связано с тем, что приближающийся излучатель как бы сжимает звуковые волны впереди себя, расстояние между соседними «гребнями» уменьшается, они чаще попадают в ухо, и звук слышится более высоким. А когда поезд уходит, звуковые волны как бы растягиваются, расстояние между «гребнями» становится больше, а значит, частота слышимого звука ниже. Чем быстрее подходит или уходит поезд, тем больше изменяется частота в сравнении с частотой, какую давал бы неподвижный излучатель. А это значит, что по изменению частоты можно судить о скорости движения излучателя. В том числе, регистрируя частоту радиосигнала, отраженного от Земли, и сравнивая ее с истинной частотой передатчика, бортовая аппаратура может определить скорость удаления космического аппарата. На этом же принципе, кстати, работают и радиолокационные измерители скорости автомобиля, которыми пользуются автоинспекторы.

⁶ Что интересно, индикаторная электронно-лучевая трубка (подобная телевизионному кинескопу, но попроще устройством и с круговой разверткой луча), с характерным желто-зеленым свечением была неотъемлемым атрибутом радиолокаторов до самого последнего времени – всем, наверное, подобный дисплей знаком по фильмам, где действие разворачивается на морских судах. И сейчас еще в мире действует огромное количество РЛС с электронно-лучевыми дисплеями, хотя новые, конечно, снабжаются ЖК-экранами.

7. В электрических цепях легко выполняются логические операции И, ИЛИ, НЕ. На рис. 15.4; 1, 2 показана упрощенная учебная схема (опять-таки «упрощенная учебная» и не более) автомата для продажи газированной воды с сиропом⁷. Схема эта довольно проста. Монета «1 копейка» замыкает контакты 6, 7, и если при этом еще замкнуты контакты 8, 9 (они размыкаются, когда в резервуаре нет воды), то электромагнит ЭМ_в откроет кран КВ и нальет в стакан воду. Монета «3 копейки» замыкает сразу три контакта. Это контакты 2, 3, которые дублируют контакты 6, 7 и в итоге наливают в стакан воду. Кроме того, монета замыкает контакты 1, 3, которые подают питание на электромагнит ЭМ_с, открывающий кран сиропа. Электромагниты, сработав, не только открывают краны КВ или КС, но еще включают механизм, забирающий монету. Если ни один из электромагнитов не сработает, то монету можно получить обратно.

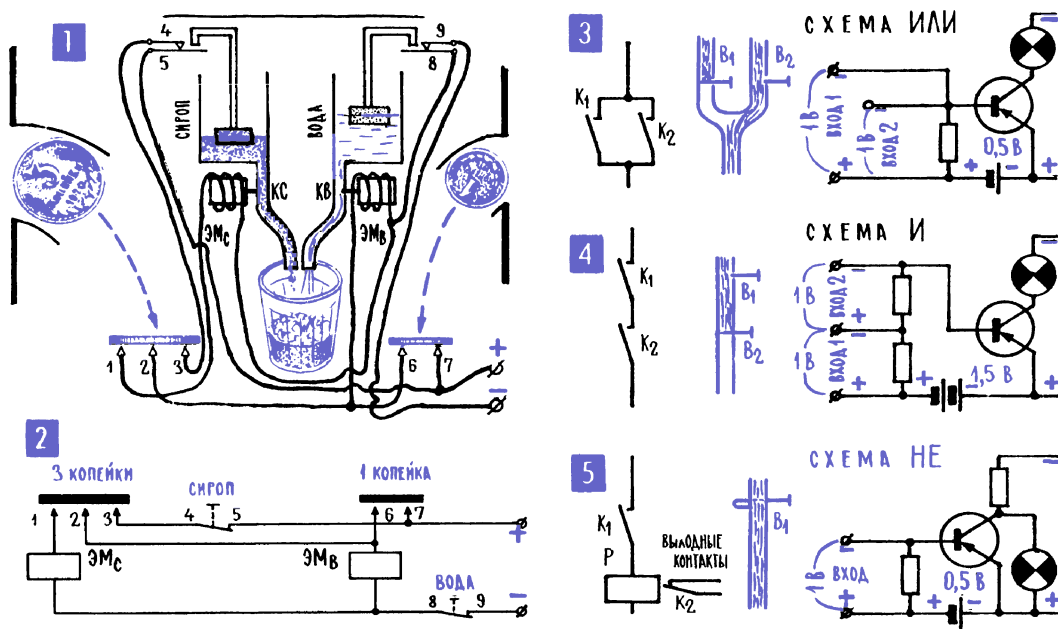


Рис. 15.4. Работа автомата для продажи воды с сиропом

В этой схеме мы встречаемся с чрезвычайно распространенными элементами электронных автоматов – схемами, которые выполняют логические операции И, ИЛИ и НЕ. Схема И (рис. 15.4; 4) дает возможность электрическому сигналу произвести свою работу, если замкнуты и первый контакт К₁, и второй К₂. В принципе, контактов может быть сколько угодно, от этого повадки схемы И не меняются – она требует, чтобы были замкнуты все контакты одновременно. А вот схема ИЛИ (рис. 15.4; 3) дает

⁷ Во времена написания книги такие автоматы были установлены повсеместно и знакомы каждому школьнику; цены на просто газированную воду (1 копейка) и на воду с сиропом (3 копейки) не менялись до самого исчезновения таких автоматов в середине-конце 1980-х годов.

возможность сигналу сработать, если замкнут любой из двух контактов, или первый, или второй, – все они параллельны, и замыкание любого открывает путь сигналу. Схема НЕ (рис. 15.4; 5) просто делает все наоборот: при замыкании контакта K_1 она с помощью реле разрывает цепь, а при размыкании контакта K_1 замыкает цепь.

На рис. 15.4; 3, 4, 5 показаны также гидравлические аналогии операции И, ИЛИ и НЕ и простейшие транзисторные схемы, где могут выполняться эти логические операции. В схеме И на базу транзистора подано запирающее напряжение $-1,5$ В, и ни один из сигналов с напряжением 1 В сам по себе не может отпереть транзистор. Транзистор отпирается, только если на базу одновременно попадают и первый, и второй сигналы. А в схеме ИЛИ запирающее напряжение уменьшено до $-0,5$ В, транзистор с одинаковым успехом откроет или первый одновольтный сигнал, или второй. В схеме НЕ лампочка (она везде отображает нагрузку) включена не в коллекторную цепь, а параллельно транзистору; открывшись, транзистор шунтирует нагрузку, и ток в нее не идет (можно пояснить иначе: у открытого транзистора напряжение на коллекторе, а значит, на лампочке, резко падает).

Примечание редактора. Для подачи запирающего смещения на транзистор, конечно, не приходится в каждом случае включать батарейку в базовую цепь – достаточно между эмиттером и общим проводом включить диод в прямом направлении (для схемы И – два таких диода, или больше, в зависимости от числа входов). Неудобство подобного устройства логических элементов (оно носило название РТЛ – резисторно-транзисторная логика, или в несколько видоизмененном виде – ДТЛ, диодно-транзисторная логика) очевидно: не очень четко фиксированные пороги срабатывания, и притом разные для разных случаев. Подобные элементы применялись в ранних гибридных интегральных схемах – в них миниатюрные бескорпусные транзисторы и диоды изготавливались отдельно и затем под микроскопом припаивались к контактным площадкам на общей подложке из керамики. На подложку с помощью напыления заранее наносились соединительные проводники и резисторы. При переходе к привычным ныне твердотельным интегральным схемам поменялась и схемотехника логических элементов: вместо РТЛ и ДТЛ появилась ТТЛ (транзисторно-транзисторная логика), в которой сигналы переключают от минуса к плюсу не базы транзисторов, а эмиттеры в т. н. многоэмиттерном транзисторе. Это позволило унифицировать элементы по входным и выходным параметрам, независимо от выполняемой логической операции.

С помощью элементов И, ИЛИ, НЕ автоматы проводят целые цепочки логических рассуждений. Один из примеров – на рис. 15.4; 1, 2. Автомат наливает воду, когда брошена *или* 1 копейка, *или* 3 копейки, а сироп – только в том случае, когда брошены 3 копейки и одновременно замкнуты *и* контакты 1, 3, *и* 4, 5, *и* 8, 9. В реальных автоматах этой последней пары контактов, возможно, нет: когда кончается сироп, автомат наливает чистую воду, забрав при этом монету.

Другой пример – обычный лифт. Мотор подъемника будет включен только в том случае, если несколько контактов, выполняя операцию И, замкнуты одновременно: *и* закрыта дверь шахты, *и* закрыта дверь кабины, *и* нажата одна из кнопок этажа на пульте управления, *и* в кабине имеется пассажир – об этом сообщают контакты под полом. Эти контакты, кстати, выполняя операцию НЕ, также отключают систему вызова лифта с того или иного этажа, если в кабине есть пассажир. А контакты кнопок на пульте управления входят в цепь мотора по схеме ИЛИ – лифт пойдет, если будет нажата кнопка *или* второго этажа, *или* третьего этажа, *или* десятого.

Как видите, элементы логики И, ИЛИ, НЕ дают возможность строить рассуждающие автоматы, и мы еще встретимся с ними в электронных счетных машинах, в которых автоматизирован процесс вычислений (см. гл. 16).

8. Вспомогательные элементы электронных автоматов – ждущий мультивибратор, триггер Шмитта, реле времени, ограничитель. Бывают электронные автоматы аналоговые, в них действуют непрерывные и постепенно меняющиеся сигналы, и автоматы импульсные, в которых живут и работают электрические сигналы в виде коротких толчков тока, импульсов. Не будем разбирать достоинства и недостатки, а тем более очерчивать область применения каждого вида автоматов. Отметим лишь, что часто между ними нет непреодолимой границы: вспомните, например, как непрерывный сигнал – электрическая копия звука превращался в сигнал импульсный в процессе амплитудно-импульсной модуляции. И еще заметим, что если считать автоматы «по штукам», то импульсных, наверное, окажется больше, и, в частности, потому, что системы управления чаще всего работают по схеме: «узнал – решил – сделал – жду дальнейших указаний».

Сейчас, кстати, в системы автоматического управления встраивают миниатюрные вычисляющие блоки – микропроцессоры. В них и производятся почти все операции, связанные с обработкой информации, представленной в виде импульсных сигналов.

Примечание редактора. Под импульсными в данном случае автор понимает автоматы, которые управляются или управляют сигналом, имеющим вид последовательности импульсов. То есть сюда можно отнести и релейные (позиционные) регуляторы (см. сноску 5 в этой главе), и те, что управляются сигналами с широтно-импульсной или, как указывает автор, амплитудно-импульсной модуляцией. Напомним, что при широтно-импульсной модуляции (ШИМ) величина сигнала закодирована в относительной ширине прямоугольных импульсов одинаковой амплитуды, при амплитудно-импульсной (АИМ) – наоборот, в амплитуде прямоугольных импульсов одинаковой относительной ширины (обычно равной ровно половине периода, но необязательно). Все подобные автоматы относятся к аналоговым системам, потому что изменение определяющего параметра у них носит непрерывный, аналоговый характер – в случае позиционных регуляторов это непрерывное изменение отслеживаемой величины (например, у автомата включения освещения – освещенно-

сти фоторезистора), в случае ШИМ – непрерывное изменение ширины, а в случае АИМ – амплитуды импульсов.

Двухуровневый («да»-«нет») характер выходного сигнала у релейных регуляторов, как и импульсный вид ШИМ- или АИМ-сигналов, еще не переводит их в класс цифровых систем, к которым принадлежат упомянутые автором микропроцессоры (как и триггеры или схемы И, ИЛИ, НЕ, описанные выше). Хотя цифровые системы, безусловно, также являются импульсными, не этот факт является определяющим для отличия дискретных (цифровых) систем от аналоговых. Для цифровых систем определяющим является понятие количества (числа) из определенного конечного набора значений, а для аналоговых – уровня какой-либо физической величины, который может принимать любое значение из непрерывного их множества. С этой точки зрения триггеры или логические элементы И, ИЛИ, НЕ – цифровые системы, так как у них и входные, и выходные сигналы могут принимать только два значения: 0 или 1 («да»-«нет», «замкнуто»-«разомкнуто», «включено»-«выключено», «высокий уровень напряжения»-«низкий уровень напряжения» – это все разные словесные обозначения одного и того же двоичного числа размером в один двоичный разряд). А вот описываемый далее ждущий мультивибратор – хотя и импульсное, но аналоговое устройство, потому что у него выходная величина – аналоговое значение времени в непрерывной шкале.

У нас уже есть довольно широкий ассортимент элементов для построения импульсных автоматов – это датчики, электронные реле, элементы логики, триггеры, которые умеют делить частоту, то есть делить число поступивших импульсов на 2, на 4, на 8 и т. д. Теперь к этому набору добавим еще одну интересную электронную схему – ждущий мультивибратор, или, как его еще называют, одновибратор. Его задача – получив на вход любой импульс, выдать на выходе аккуратный прямоугольный импульс такой длительности, которая в данном автомате считается стандартной.

Ждущий мультивибратор оказывается совершенно необходимым в импульсных системах, где из линий связи или с датчиков могут поступать самые причудливые импульсы⁸. А в то же время многие элементы автоматики очень разборчивы в части длительности и формы импульса, особенно крутизны его переднего фронта. Так, например, триггер (ТГ) может не прореагировать на сигнал, который нарастает постепенно, медленно. Чтобы триггер перебрался из одного устойчивого состояния в другое, чтобы в нем начался лавинообразный процесс переброски, сигнал на входе триггера должен нарастать очень резко, то есть у входного импульса должен быть крутой передний фронт. Ждущий мультивибратор (рис. 15.5; 1) – это, по сути, обычный мультивибратор (гл. 11; 12), но только, если можно так сказать, перекошенный, с непосредственной связью одного из коллекторов с базой соседа, как у триггера. Поэтому здесь нет привычного поочередного открывания транзисторов: в ждущем мультивибраторе из-за «перекоса» один транзистор всегда закрыт (на нашей схеме T_1), а второй (T_2) всегда

⁸ А также в качестве устройства устранения дребезга контактов, абсолютно необходимого при работе кнопок или реле совместно с быстродействующими импульсными или цифровыми устройствами.

открыт. И только с приходом входного сигнала первый транзистор получает помощь со стороны и открывается, причем открывается резко, лавинообразно, как всегда бывает в мультивибраторах. Второй транзистор при этом, конечно, закрывается. Но счастье длится недолго: как только второй транзистор в порядке очереди перехватывает инициативу (в мультивибраторе все так и должно быть, транзисторы должны открываться поочередно; гл. 11; 12), он уже не отдает ее до конца: схема из-за несимметричности, из-за «перекоса» опять попадает в свое первоначальное состояние. И остается в этом состоянии навсегда, точнее, до следующего входного импульса, который опять на мгновение создаст условия равноправия транзисторов и позволит «вечному узнику» – постоянно закрытому транзистору – на мгновение открыться и выдать кратковременный импульс. Кстати, тот самый кратковременный стандартный импульс⁹, который требуется от ждущего мультивибратора. Так из подпорченного импульса получают новенький, абсолютно исправный.

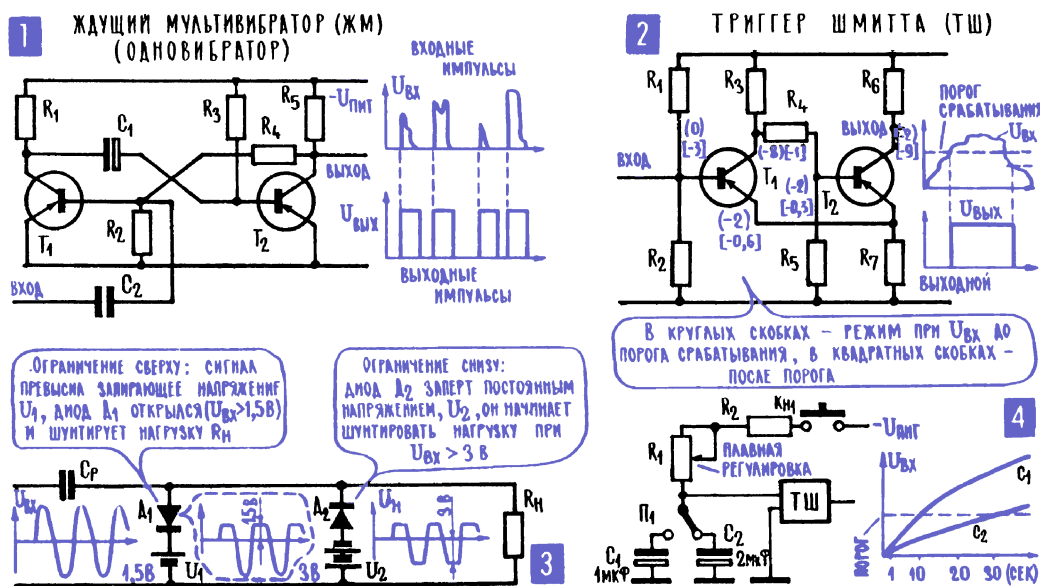


Рис. 15.5. Схемы для устройств автоматики

Другой полезный элемент для импульсных схем – триггер Шмитта (рис. 15.5; 2). Это пороговое устройство: когда входной сигнал достигает определенного уровня, триггер Шмитта быстро срабатывает, и на его выходе начинается прямоугольный импульс. Этот импульс будет продолжаться до тех пор, пока сигнал не станет меньше установленного порога.

⁹ Необязательно кратковременный – из одновибратора на транзисторах получить достаточно длительный импульс действительно сложно, но на основе ждущего мультивибратора на микросхеме таймера 555 или на микросхемах КМОП-логики (см. Практикум в гл. 11) вполне можно соорудить настоящий таймер с временами выдержки порядка десятков минут.

Примечание редактора. Триггер Шмитта отличается от простой пороговой переключающей схемы тем, что, как и всякий уважающий себя триггер, имеет элемент положительной обратной связи (резистор R_7). Изначально транзистор T_1 закрыт, T_2 открыт, на выходе уровень, близкий к нулю. У триггера Шмитта два порога срабатывания: при возрастании сигнала в момент пересечения первого, более высокого порога триггер лавинообразно перебрасывается в противоположное состояние, на выходе оказывается уровень, близкий к напряжению питания. При снижении входного сигнала ниже второго порога триггер возвращается в исходное состояние. Так как второй порог ниже первого, небольшие колебания сигнала после пересечения порога на выходном уровне не сказываются. Разницу между первым и вторым уровнями называют шириной петли гистерезиса; она зависит от соотношения резисторов и в данной схеме рассчитывается довольно сложно, а пороги смещены близко к напряжению общего провода. Имеются триггеры Шмита в интегральном исполнении (например, микросхема 74C14 с напряжением питания от 3 до 15 В), у которых ширина петли гистерезиса достигает трети напряжения питания и расположена симметрично относительно питания. Популярная микросхема таймера 555, по сути, также представляет собой высокоточный (прецизионный) триггер Шмита.

Некоторые элементы, которые можно встретить в импульсных схемах, нам уже знакомы. Это, например, дифференцирующие цепочки, они фиксируют не сам импульс, а только момент его появления или исчезновения. Это интегрирующие цепочки, которые реагируют не на отдельные импульсы, а на их «густоту» или продолжительность¹⁰. Легко можно представить себе и диодный ограничитель уровня импульсов. Его основа – диод, закрытый определенным напряжением; диод открывается и начинает пропускать ток или, наоборот, шунтировать нагрузку после того, как напряжение импульса превысит определенную величину, тем самым диод ограничивает, срезает верхушку импульса (рис. 15.5; 3). Наконец, много разных интересных операций можно производить в импульсных схемах, объединяя несколько разных элементов. Так, например, объединив триггер Шмитта с обычной зарядной RC-цепочкой, мы получим реле времени (рис. 15.5; 4), устройство, которое будет выдавать импульсы определенной длительности, включая или выключая какое-либо устройство на нужное время.

9. Если управляющий автомат и объект управления находятся на большом расстоянии, им на помощь приходит телеуправление и телеметрия. Слова «телеметрия» и «телеуправление» (рис. 15.6; рис. 15.7) особенно часто приходится слышать в последнее время, когда в широких масштабах осуществляются полеты самых разных космических кораблей. На этих кораблях всегда есть собственные, или, как их называют, автономные,

¹⁰ Дифференцирующие и интегрирующие цепочки аналогичны фильтрам верхних и нижних частот (названия зависят от характера подаваемого сигнала – импульсный или синусоидальный соответственно). Схемы показаны на рис. 14.5; 3, где $R_{\phi 1}$, $C_{\phi 1}$ образуют фильтр верхних частот (дифференцирующую цепочку), $R_{\phi 2}$, $C_{\phi 2}$ – фильтр нижних частот (интегрирующую цепочку).

системы автоматического управления, но их, как правило, дублируют наземные управляющие комплексы. А есть такие операции, которые требуют огромных расчетов, их выполняют наземные комплексы управления полетом и уже в готовом виде передают свои решения на борт аппарата – это называется управлением на расстоянии, или, иначе, телеуправлением.

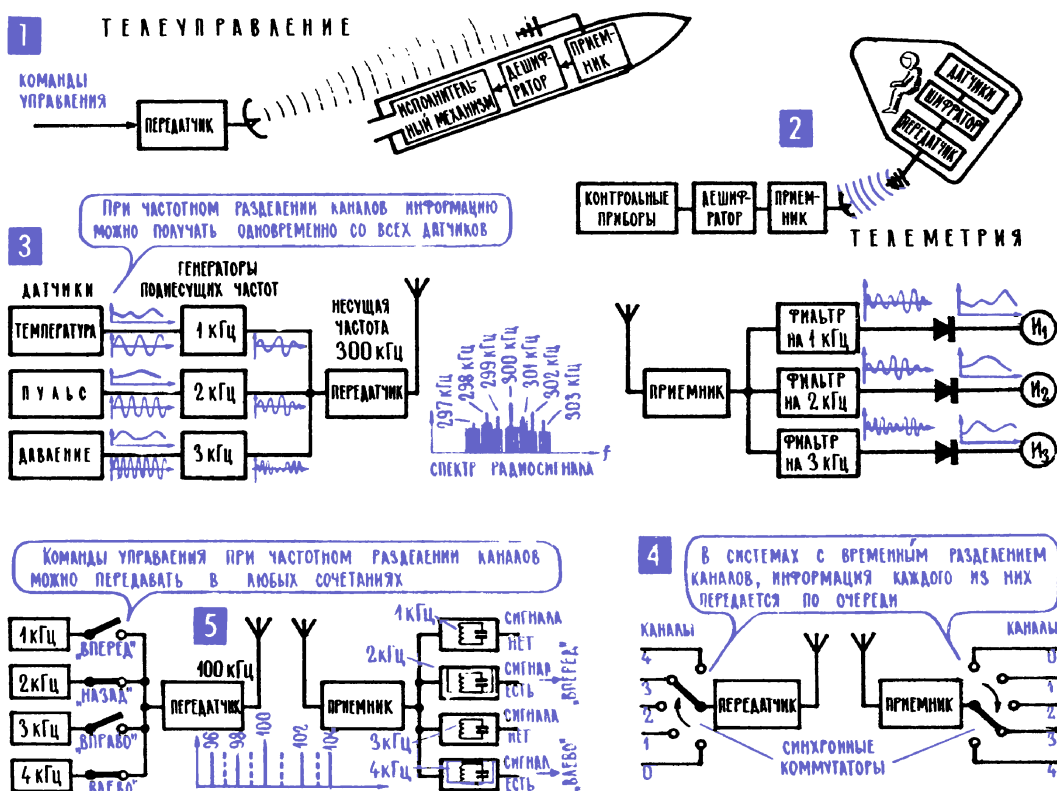


Рис. 15.6. Телеуправление

Чтобы почувствовать, какого высокого совершенства достигла техника телеуправления, достаточно вспомнить, как, повинаясь воле работающих на Земле операторов, путешествовали по Луне наши луноходы. С телеуправлением тесно связана и телеметрия – передача с борта корабля на Землю самой разной информации о работе бортовых систем, режиме полета, а если корабль пилотируемый, то и о состоянии космонавтов. Телеметрия и телеуправление нужны, конечно, не только в космических исследованиях, сбор информации и управление на расстоянии производятся во многих областях техники и научных исследованиях (телеуправление нефтедобывающими установками по проводам, радиотелеуправление зенитными ракетами, радиотелеметрия состояния спортсмена во время тренировок, радиотелеметрия метеорологических данных с шаров-зондов), не говоря уже о телеуправляемых моделях и игрушках.

Системы телеуправления и телеметрии почти всегда многоканальны: информацию приходится собирать от многих источников и команд управления, как правило, тоже приходится передавать много. Все такие многоканальные системы можно разделить на две большие группы – с частотным и временным разделением каналов. В системе с частотным разделением информация по всем каналам может передаваться одновременно – каждому каналу отводится своя поднесущая частота, а в месте приема фильтры отделяют один канал от другого (рис. 15.6; 3, 5). Если передача ведется по проводам, то на этом дело и ограничивается, а если по радио, то все поднесущие частоты вместе со своими боковыми модулируют высокочастотный ток в радиопередатчике, и таким образом в эфир передача идет с двойной, «двухэтажной» модуляцией.

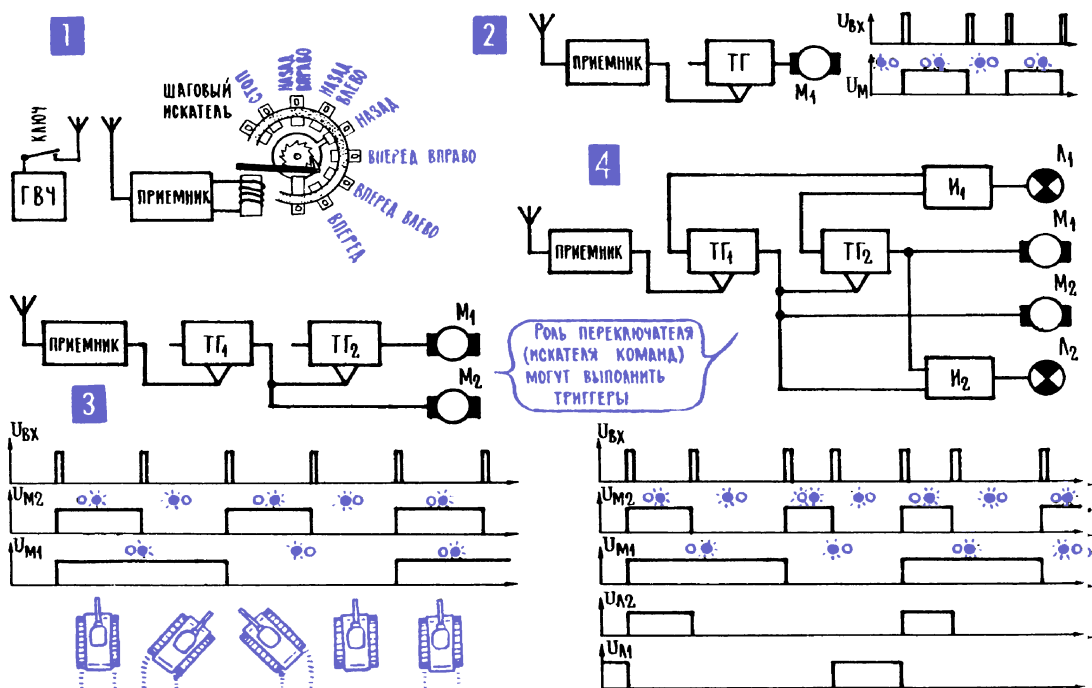


Рис. 15.7. Телеметрия

При временном разделении каналов информация в каждом из них передается поочередно, а на передающей и приемной сторонах есть быстродействующие синхронные коммутаторы, которые подключают нужный комплект аппаратуры поочередно к линии связи (рис. 15.6; 4). В радиоуправляемых моделях часто используют упрощенную разновидность временного разделения – кодирование числом импульсов (рис. 15.7; 1). На самой модели устанавливают шаговый искатель или некоторое его подобие, а с передатчика направляют строго определенное число импульсов. Если

известно, в каком положении стоит шаговый искатель, то, передав нужное число импульсов, можно его заставить сделать нужное число шагов и включить желаемую команду. А после того как команда будет выполнена, определенным числом импульсов вернуть шаговый искатель в исходное положение. Чтобы шаговый искатель «по дороге» не запускал другие исполнительные механизмы, можно сделать так, что он будет отключаться от них на время движения подвижного контакта. Используя триггеры и логические элементы И, ИЛИ и НЕ, можно собирать и электронные переключатели команд для систем импульсного телеуправления. Простейшие из них показаны на рис. 15.7; 2, 3, 4.

Кстати, электронные коммутаторы так же, как и логические элементы И, ИЛИ, НЕ и другие встречавшиеся нам здесь элементы автоматики, широко применяются в электронных вычислительных машинах, которые, по сути дела, представляют собой сложные импульсные автоматы.

Практикум. Автоматические регуляторы

Основные детали, которые понадобятся для этих экспериментов, такие:

- компаратор LM311 (или его аналоги, например 521СА3, 554СА3);
- NTC-термистор (терморезистор с отрицательной зависимостью сопротивления от температуры), номинальное сопротивление 10 кОм при 25 °С (например, B57861-S);
- фоторезистор GL5516, GL5528 или аналогичный (световое сопротивление около 10 кОм при 10 люксах);
- электронное бесконтактное реле с возможностью коммутации сетевого переменного напряжения с током до 3–5 А (например, типа ESR2002400300);
- электромеханическое реле с управляющим напряжением 12 В и возможностью коммутации сетевого переменного напряжения с током до 10–12 А (например, TRV-12VDC);
- источники питания 12 В;
- наборы резисторов, конденсаторов, переменные резисторы, светодиоды и т. п. (см. схемы далее).

Предупреждение: некоторые элементы приведенных далее схем работают при высоком сетевом переменном напряжении 220 В. Для безопасной работы с такими схемами нужно соблюдать определенные правила:

- никогда не оставляйте оголенные (неизолированные) фрагменты проводов, которые могут оказаться под высоким напряжением. Все подключения выполняются на обесточенной схеме с помощью специально предназначенных

для работы с сетевым напряжением разъемов, розеток и вилок, в которых случайное касание неизолированных проводов исключено;

- не проводите измерений напряжений и токов в схеме при включенном сетевом напряжении. Измерения в низковольтной части схемы производятся при отключенном высоком напряжении. Для контроля работы высоковольтной части используются имитаторы нагрузки, работающие при безопасном напряжении, временно заменяющим сетевое (например, удобно применять автомобильные лампочки на напряжение 12 В).

Напомним также общее правило отладки любых схем, которое в данном случае соблюдать абсолютно обязательно: никогда не вносите изменений в схему, не отключив ее от всех источников питания!

Эксперимент 1. Регулятор температуры (термостат)

Регулятор температуры – простейшее устройство автоматического управления. Его простота обусловлена исключительно удобными свойствами объекта регулирования, в качестве которого выступает обыкновенная вода. Вода имеет большую теплоемкость и высокие способности теплообмена с различными материалами. Масса воды имеет большую тепловую инерцию; с ней не надо бояться сильного перегрева или переохлаждения.

Сначала несколько слов про электронное бесконтактное реле, которое в этой схеме выступает в качестве исполнительного устройства для включения и выключения объектов регулирования. Обычные электромагнитные реле с механическими контактами также пригодны для этой цели (см. следующий эксперимент), и притом гораздо дешевле, но электронное реле во многих случаях удобнее по следующим причинам:

- широкий диапазон управляющих напряжений без необходимости точной подгонки (например, 3–15 или 4–32 В);
- идеальная изоляция управляющей цепи от цепи нагрузки. Управление происходит через оптический канал; цепь управления – это светодиод с добавленным к нему токоограничивающим резистором;
- небольшая величина управляющего тока (максимум 10–15 мА), что позволяет управлять включением реле непосредственно от выхода микросхем без промежуточного усилителя;
- наличие т. н. зего-контроля: замыкание и размыкание цепи происходят не в произвольный момент времени, а всегда приходится на момент паузы переменного напряжения, отчего резко снижается уровень помех;
- электронное реле не боится дребезга контактов; они не изнашиваются от многократных включений-выключений и не создают при этом

помех. В схеме термостата реле включается и выключается довольно часто, не реже нескольких раз в час, поэтому отсутствие помех – в данном случае важный фактор.

Назначение выводов мощных электронных реле, как правило, нарисовано прямо на корпусе, так что не приходится искать документацию, и ошибиться невозможно.

К числу недостатков электронных реле относится довольно большой ток утечки в разомкнутом состоянии цепи, достигающий у мощных реле единиц миллиампер. На работе при мощной нагрузке это не сказывается, но маленькую нагрузку (например, светодиод) к таким «контактам» подключить не получится. Обычным мультиметром в режиме «прозвонки» определить момент замыкания и размыкания таких «контактов» также может быть затруднительно, приходится использовать имитаторы нагрузки. Кроме того, на электронных «контактах» имеется некоторое падение напряжения, и при больших коммутируемых токах реле ощутимо нагревается.

По всем этим причинам электронные реле также нужно тщательно подбирать в зависимости от мощности нагрузки и характера коммутируемой цепи: переменный или постоянный ток, высокое напряжение или низкое и т. д. Выбранное реле ESR2002400300 допускает ток всего в 3 А, то есть может управлять сетевой нагрузкой не более 650 Вт, и при увеличении нагрузки придется выбирать более мощное, а значит, и более дорогое реле.

В качестве регулирующего элемента мы будем использовать микросхему компаратора. Компаратор – специализированный операционный усилитель, предназначенный для сравнения сигналов на входах и выдающий в зависимости от результата высокий или низкий уровень напряжения на выходе. Микросхема LM311, которую мы используем, имеет ту особенность, что у нее внутри на выходе установлен ключевой транзистор с открытым коллектором. Работает она следующим образом: при превышении величины напряжения на отрицательном входе (помеченном знаком «минус») величины напряжения на положительном (помеченном знаком «плюс») транзистор откроется. Наоборот, при превышении величины напряжения на положительном входе напряжения на отрицательном транзистор будет заперт. Если эмиттер транзистора, выведенный отдельно, соединить с общим проводом, то нагрузка, подключенная к коллектору, будет, соответственно, либо замыкаться на общий провод, либо отключаться от него.

Схема термостата, реализующая эти свойства, приведена на рис. 15.8; 1. Нагрузкой компаратора здесь служит управляющая цепь электронного реле, описанного выше. Выходная цепь реле управляет нагревателем, в качестве которого можно использовать обычный кипятильник не очень

высокой мощности, в данном случае 0,5 кВт. Для удобства отладки схемы, а также для сигнализации о ее состоянии в рабочем режиме в коллекторную цепь выходного транзистора компаратора, кроме электронного реле, включен светодиод Led1.

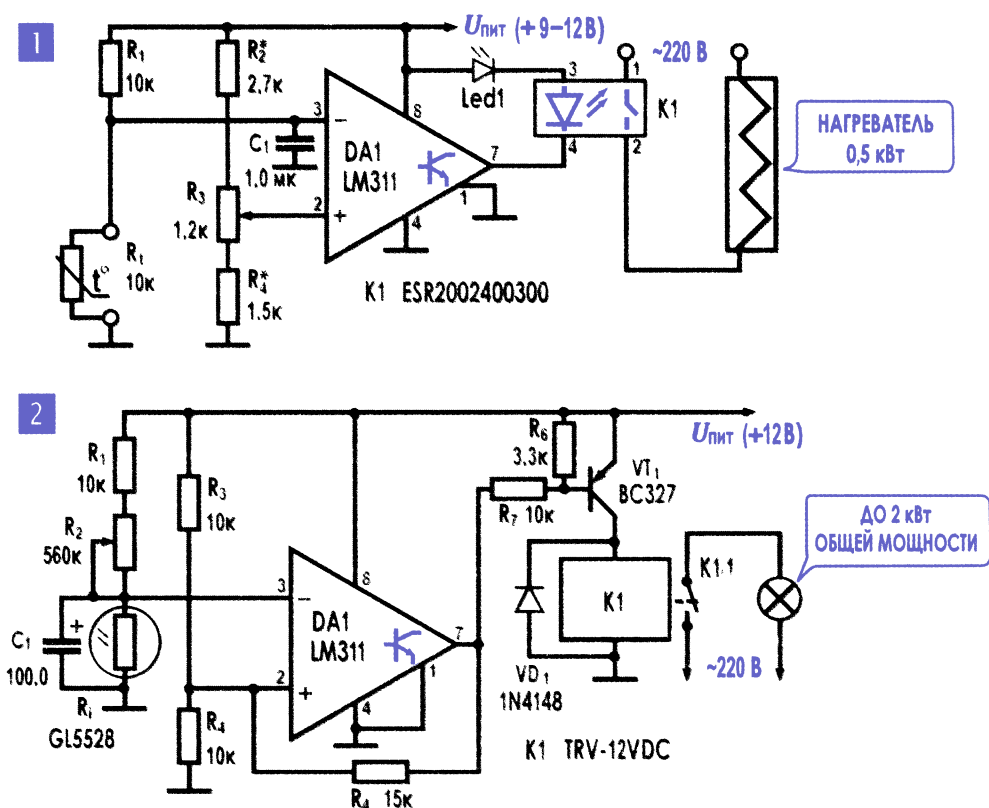


Рис. 15.8. Автоматические регуляторы:
 1 – термостат; 2 – автомат включения освещения

В качестве чувствительного элемента (датчика температуры, R_t на схеме) здесь применяется термистор: резистор из специальной керамики, сопротивление которой с увеличением температуры быстро уменьшается, то есть температурный коэффициент у него отрицательный (*negative temperature coefficient*, NTC). Внешне термистор типа B57861-S похож на застывшую каплю. Можно приспособить любой другой NTC-термистор, но изолировать от воды его может тогда быть сложнее, а специальные термисторные датчики в металлическом или пластиковом корпусе намного дороже простого термистора. Подробности о термисторах см. [7, стр. 85]. При указанных на схеме величинах сопротивлений резисторов с таким типом термистора диапазон регулировки температуры с по-

мощью переменного резистора R_3 будет находиться в пределах примерно от 25 до 40°. Подстроить диапазон можно, изменяя сопротивления резисторов R_2 и R_4 .

Не забывайте о приведенных выше правилах обращения с подобными схемами! При наличии светодиода Led1 всю отладку можно выполнить, вообще не подключаясь к сетевому напряжению. Для окончательной проверки вместо сетевого напряжения на реле подается невысокое напряжение от отдельного источника, например 12 В, а вместо нагревателя включается автомобильная лампочка. Соединения с сетью можно выполнить, установив рядом со схемой обычную сетевую розетку (в нее будет включаться нагреватель), а к ней подвести провод с вилкой, контактные выводы реле включаются в его разрыв. После этого можно провести окончательные испытания.

Схему можно применять, например, как регулятор температуры в подогревателе воды на даче. Для экономии энергии целесообразно бак с водой укутать теплоизоляционным материалом. Если емкость с водой достаточно большая, то кипятильник 0,5 кВт может нагревать ее слишком долго. При увеличении мощности нагревателя ничего не изменится, кроме того что, вероятно, придется применить более мощное реле.

Эксперимент 2. Автомат включения освещения

Автомат включения освещения, или фотореле, – одно из самых распространенных устройств. В быту такие автоматы применяются относительно редко, зато в городском хозяйстве они встречаются буквально на каждом углу: именно с помощью подобных автоматов уличное освещение, декоративная подсветка зданий и свет в подъездах жилых домов включаются вечером и выключаются утром. И кстати, работа автоматических турникетов в метро по принципу устройства мало чем отличается от автоматов включения освещения. И там, и там датчик реагирует на изменение уровня освещенности, разве что автомат для турникетов спроектировать существенно проще, чем фотореле для срабатывания на изменение естественного освещения.

Почему же это сложно? А потому, что естественное освещение – величина, которая меняется очень медленно и в очень больших пределах. И около установленного порога срабатывания она может еще и колебаться от случайных причин – облака на небе, проехавшая машина, отразившая зайчик от ветрового стекла, рядом расположенные предметы, проходящие люди могут менять освещенность и заставлять фотореле срабатывать много раз, прежде чем его состояние успокоится. При этом влияние обычных электрических помех из-за медленно меняющегося сигнала также возрастает многократно. А устройства, которыми такое реле обычно управляет, многократного переключения туда-сюда не тер-

пят абсолютно: например, лампы уличного освещения могут выйти из строя в первый же вечер, если их заставить включиться и выключиться пару сотен раз за короткое время.

По этим причинам схема автомата включения освещения существенно отличается от термостата. В основе лежит тот же самый компаратор LM311, а вот включен он иначе. В качестве исполнительного устройства здесь выбирается электромагнитное реле: автомат срабатывает достаточно редко (для уличного освещения – вообще, по идее, дважды в сутки), потому помехи здесь нас волнуют не слишком. Зато при гораздо меньшей цене такое реле может управлять более мощной нагрузкой. Управляющий ток обмотки таких реле больше, чем у электронных, потому тут требуется усиленный ключевой транзистор.

Одно обстоятельство облегчает задачу: в фотореле точность установки порога включения и выключения не имеет особого значения. Поэтому здесь можно установить максимально большую зону гистерезиса и конденсатор большой емкости для сглаживания помех. В качестве датчика мы используем недорогой фоторезистор типа GL5516 или GL5528 (они продаются в интернет-магазинах, торгующих аксессуарами для Arduino). Такой фоторезистор изменяет свое сопротивление примерно в 4 раза при увеличении освещенности в 10 раз; вблизи необходимого порога срабатывания на включение (около 50 люкс – как освещенная автостоянка ночью) его сопротивление будет составлять несколько десятков килоом.

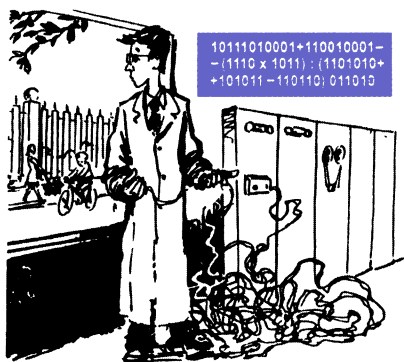
Ключевая особенность схемы, приведенной на рис. 15.6; 2, состоит в очень большой зоне гистерезиса, то есть различии порогов срабатывания на включение и выключение. При указанных на схеме величинах резисторов R_3 – R_5 она будет составлять не менее 3 В, то есть примерно 25 % от напряжения питания. То есть автомат будет включаться при гораздо меньшей освещенности, чем выключаться, что гарантирует нас от срабатываний при случайных колебаниях освещенности. Дополнительную защиту вносит конденсатор C_1 , фильтрующий наведенные помехи, – кроме простой фильтрации, он вместе с резисторами R_1 и R_2 еще и обеспечивает задержку срабатывания порядка нескольких секунд. Все эти меры вместе обеспечивают надежную фиксацию включенного или выключенного состояния реле и предотвращают его дребезг.

Регулирование порога срабатывания производится переменным резистором R_2 , который также имеет необычно большую величину сопротивления. Это связано с тем, что освещенность в месте установки датчика может быть очень разной. Наладка правильно собранной схемы состоит только в установке порога срабатывания с помощью резистора R_2 по реальному уровню освещенности в месте установки. Если в процессе настройки порога обнаруживается, что ползунок переменного резистора R_2 находится в крайнем верхнем положении (по схеме), а нужный уровень срабатывания все-таки не достигнут, придется заменить резистор R_1 на резистор меньше-

го сопротивления. И наоборот, если ползунок R_2 дошел до нижнего по схеме положения, то величину резистора R_1 нужно увеличить в несколько раз.

Фоторезистор выносить за пределы схемы не следует, от этого только увеличится количество наведенных помех и вероятность загрязнения окна датчика. Всю конструкцию устанавливают в корпусе, к которому делается отверстие, пропускающее свет, и выносят за пределы воздействия включаемых с ее помощью источников света. Отверстие заклеивают прозрачным скотчем или загораживают кусочком оргстекла. Это одна из причин, по которой окончательную настройку порога срабатывания следует делать на готовой конструкции: размеры отверстия, расположение окна фоторезистора относительно него, степень прозрачности заклейки и другие факторы будут сильно влиять на освещенность датчика.

В заключение следует заметить, что оба рассмотренных автомата представляют собой самый простой тип автоматического регулятора: его называют двухпозиционным, или, иначе, релейным, регулятором. Это название обусловлено тем, что регулятор может находиться только в двух состояниях: либо включен, либо выключен. В случае термостата для емкости с водой сама среда вследствие своей высокой теплоемкости сглаживает колебания, и температура находится примерно на одном уровне, испытывая лишь незначительные изменения. Но вот для потока воздуха, например, плавное управление его температурой таким способом уже не сделаешь. Не получится подобным образом и плавно управлять освещением, скажем, в задаче плавного изменения яркости дисплея в зависимости от внешней освещенности. Такие задачи, как многие другие задачи регулирования, требуют более сложных подходов к управлению: например, они реализуются в пропорциональных регуляторах, когда состояние регулятора меняется не скачком, а плавно, пропорционально входному сигналу. Есть и другие, еще более сложные принципы регулирования, о которых вы можете прочесть в [2].



ГЛАВА 16

Компьютер – вычисляющий автомат

1. Моделирование широко используется для решения самых разных задач в живой природе, в технике и науке. Когда школьник строит модель автомобиля или парусной яхты, он приобщается к одному из величайших достижений человеческого разума, которое, как ничто другое, сделало человека великаном. Речь идет о моделировании. Живая природа взяла патент на моделирование очень давно, задолго до появления человека. Не будем касаться самых первых успехов на этом пути. Фантазируя и упрощая, попробуем представить, как появилась одна из моделирующих систем у некоторого вида рыб. Предки этих рыб гонялись за пищей, за быстрыми инфузориями самым простым способом: в каком месте увидит рыба инфузорию, туда и кидается. Охота завершалась успешно, если инфузория оставалась на месте или уходила просто вперед – скорости у рыбы хватало. Но когда инфузория уходила в сторону – рыба промахивалась, она должна была останавливаться и вновь искать глазами добычу, а та тем временем успевала уйти. И вот на каком-то этапе рыбы научились моделировать движение инфузории, «включая» разные нейроны (нервные клетки) своего мозга. Научились быстро «прокручивать» на модели весь процесс погони и выбирать направление своего броска так, чтобы в нужный момент прийти в «точку встречи».

На рис. 16.1; 1 система такого моделирования показана крайне упрощенно, примитивно, хотя, впрочем, изобразить ее точно и нельзя было бы: конкретные механизмы моделирования в нервных сетях пока неизвестны.

Огромна роль моделирования в организации поведения (здесь «поведение» в самом широком смысле, а не в том, в котором оно фигурирует в школьном дневнике) живых организмов и особенно человека. Играем ли мы в волейбол, отрезаем ли кусок хлеба, вытаскиваем ли на токарном станке сложную деталь или просто прогуливаемся по саду, мозг непрерывно строит подробные модели, куда входит и внешняя обстановка, и состояние организма. На этих моделях с огромной скоростью отрабатываются варианты действия, в соответствии с конкретной задачей выбирается один

из них, а затем уже выдаются соответствующие команды и начинают действовать многие тысячи больших и малых мускулов. В этой гигантской работе, которую мы, в общем-то, даже и не замечаем, участвуют миллиарды нейронов, а каждый из них сам по себе представляет собой сложнейшую машину.

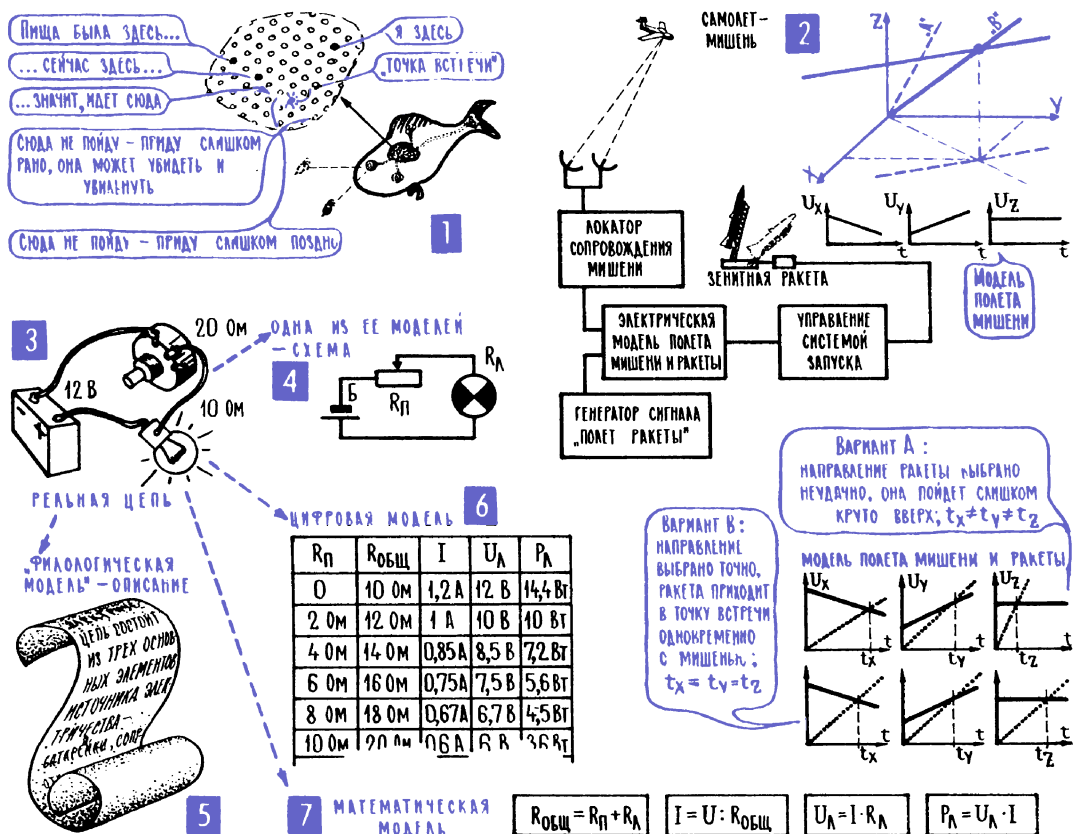


Рис. 16.1. Построение моделей

Значение моделирования во всей человеческой деятельности огромно. Понять что-либо – значит построить в своем сознании модель этого самого «что-либо». Что-нибудь изобрести – значит поработать с определенной мысленной моделью и извлечь из этой работы новую полезную информацию. А если мы совершили неверное действие, значит, плохо проработали задачу на модели или, что бывает значительно чаще, ошибочно построили саму модель.

Есть реальный мир, мир реальных вещей и явлений, мир звезд, атомов, табуреток, желтых осенних листьев, соседей по дому. А есть отображающий эту реальность мир моделей, с которыми работает наша мысль. Так вот, мир моделей должен соответствовать реальному миру, именно соответствие модели и реальности стоит за этим коротким и хрупким словом

«правда». Бывает, человек говорит громким, уверенным голосом, что все, мол, обстоит так-то и так-то, но проходит некоторое время, и оказывается, что во всем он был не прав, что вся его красивая модель не отображала реальную действительность.

Модель всегда беднее реального объекта, она отображает лишь некоторые его черты. Причем в разных случаях – разные, все зависит от задачи, для решения которой создается модель. Так, например, чтобы оценить летные качества самолета, в аэродинамической трубе обдувают его модель, которая повторяет лишь внешние черты оригинала. Занимаясь размещением пассажирских кресел, строят модель салона, не обращая внимания на внешние формы машины. А когда диспетчер аэропорта организует последовательную посадку нескольких приближающихся самолетов, он представляет их себе просто движущимися точками, занимающими определенное место в пространстве.

Модели могут быть сделаны из самых разных материалов, описание реальности в них осуществляется на самых разных языках. Модели самолетов бывают из дерева, металла или пластмассы, а бывают из бумаги и туши: чертеж – это ведь тоже модель. И рисунок тоже. И фотография. В нейронных сетях рыбы (рис. 16.1; 1) модель строилась с помощью сложных электрохимических процессов в нервных клетках, а в системе управления ракетой (рис. 15.3; 5) – с помощью электрических токов. Еще один пример электрического моделирования – на рис. 16.1; 2, здесь «задача встречи» решается для зенитной ракеты и самолета-мишени. Движение самолета в этой модели отображается тремя меняющимися напряжениями – это координаты мишени по трем перпендикулярным осям x , y , z . Напряжение, отображающее координату z , остается постоянным, это значит, что самолет летит на постоянной высоте. Три меняющихся напряжения отображена возможная траектория зенитной ракеты, причем система управления пробует несколько разных троек, выбирая такое направление, которое приведет ракету в «точку встречи» одновременно по всем координатам. Электрическое моделирование используют во многих системах управления, работать с электрическими сигналами очень удобно. Их легко менять, проверяя на модели самые разные ситуации. Не так-то просто изменить размеры какой-нибудь детали на механической модели или даже на чертеже, а изменить тот или иной ток в электрической модели довольно просто.

Нынешнего своего могущества человек добился, подчинив себе энергию несравнимо большую, чем могут дать мускулы, и создав машины, которые стали продолжением человеческой руки. Но началось все это с другого, с того, что, взаимодействуя с природой, сражаясь за существование, человек научился мыслить, научился создавать очень совершенные мысленные модели и работать с ними так, как не умеет никакой другой представитель животного мира. А потом пошел дальше – научился соз-

давать искусственные модели и на них отрабатывать свои практические задачи. Такими моделями стали рисунки, слова устной речи, иероглифы, а затем и буквенное письмо, географические карты, чертежи, графики. И еще, конечно, математические модели, которые начались с простого счета и пришли к современной математике, умеющей моделировать самые сложные процессы в природе и машинах. Рисунок 16.1; 3, 4, 5, 6, 7 иллюстрирует создание разных моделей простой электрической цепи, и уже из этого примера видно, насколько удобна и экономична математическая модель, в данном случае описание схемы с помощью нескольких формул закона Ома (рис. 16.1; 7).

Возможности математического моделирования резко расширились в последние десятилетия после появления электронных вычислительных машин, ЭВМ. Эти машины умеют быстро перерабатывать огромные объемы информации, создавать и исследовать модели, выполненные не «в металле», а в виде чисел, прекрасно отражающих самую сложную реальность.

Примечание редактора. Слово компьютер (в переводе с английского – *вычислитель*) в настоящее время полностью заменило длинное название «электронная вычислительная машина» (ЭВМ), принятое в советское время. Следует понимать, что под этими названиями имеются в виду именно цифровые электронные вычислительные машины (ЦЭВМ), так как существовали еще и «аналоговые электронные вычислительные машины» (АЭВМ, их принципы работы показаны на рис. 16.1; 2), а еще до них – и просто «аналоговые вычислительные машины» (АВМ) на механических принципах. Именно от этих машин ведет свое происхождение термин «аналоговый» применительно к электронной технике, оперирующей непрерывными значениями напряжений и токов. Автор далее употребляет названия «компьютер», «вычислительная машина» и ЭВМ вперемешку, как синонимы. Интересно, что слово «компьютер» в доцифровую эпоху было обозначением профессии: так называли сотрудников учреждений, специализировавшихся на проведении громоздких вычислений вручную или с помощью электромеханических калькуляторов.

2. Для электронных вычислительных машин очень удобна двоичная система счисления. Почему мы пользуемся именно десятичной системой счисления, а не другой? Почему, добравшись до 9, следующим шагом, добавляя к девятке единицу, считаем разряд полностью укомплектованным, пишем в нем 0, а перед нулем единицу (это значит, «есть одна полная десятка, один полный комплект») и переводим счет в самое начало следующей десятки? Почему именно 10, а не какое-нибудь другое число, не 6 и не 8, стало в нашем счете границей для перехода в следующий разряд? Наверное, потому, что на руках у наших предков, изобретателей десятичного счета, было 10 пальцев и им просто удобно было сделать число 10 основой системы счисления. А было бы у них 8 пальцев на руках, система получилась бы, наверное, восьмеричной: досчитав до 7, мы переходили

ли бы в следующий разряд и записывали бы нынешнюю нашу восьмерку как 10 (первый разряд полностью укомплектован, там полная восьмерка, пишем 0 и переходим во второй разряд, поставим там 1); девятку записывали бы как 11 (то есть $8 + 1$); десятку – как 12 (то есть $8 + 2$); 16 – как 20 (два полных комплекта восьмерок); а восемь восьмерок, то есть наше десятичное 64 в восьмеричной системе записывалось бы как 100 (укомплектованы полностью и первый разряд, и второй, переходим в третий).

В принципе, основанием для системы счисления можно выбрать любое число – какое удобнее, такое и выбирай. Для большинства электронных вычислительных машин выбрана двоичная система счисления (рис. 16.2), в ней всего две цифры – 1 и 0. И если после единицы нужно считать дальше, то есть если к единице надо прибавить следующую единицу, то нужно уже переходить в следующий разряд: $1 + 1 = 10$ (это наше десятичное 2); $10 + 1 = 11$ (а это 3); $11 + 1 = 100$ (десятичное 4); $100 + 1 = 101$ (десятичное 5) и т. д. (рис. 16.2; 2).

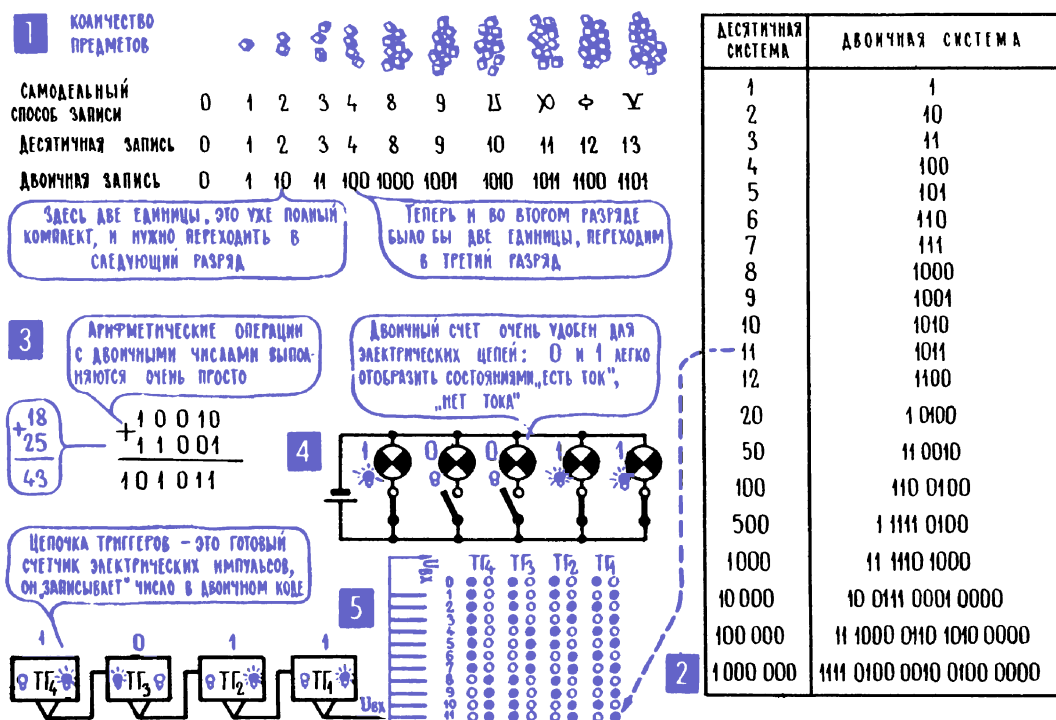


Рис. 16.2. Двоичная система счисления

На рис. 16.2; 2 приведены таблицы пересчета некоторых чисел, записанных в привычной системе десятичного счета, в числа двоичной системы. А рядом на рис. 16.2; 3 приводится простой пример сложения двоичных чисел. Нетрудно заметить, что правила арифметики для двоичных чисел очень просты, но вот запись этих чисел получается довольно громоздкой.

Например, если для записи числа «миллион» в десятичной системе нужно всего семь знаков, то в двоичной системе для этого уже понадобится двадцать знаков.

Но зато у двоичной системы есть другое достоинство – для нее нужно всего два разных типа знаков – 0 и 1, в то время как для десятичной системы нужно 10 разных типов знаков – 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9. Возможность пользоваться всего двумя знаками оказалась решающей для того, чтобы использовать двоичную систему в электронных вычислительных машинах. Потому что огромное множество электронных схем – выключатели, триггеры, электронные реле, логические элементы И, ИЛИ, НЕ, мультивибраторы – работают в ключевом режиме, то есть находятся в одном из двух устойчивых состояний: «включено – выключено», или «пропускаю ток – не пропускаю ток», или «даю напряжение – не даю напряжение». Одним из таких устойчивых состояний можно выразить единицу двоичной системы счисления, а вторым – ноль и таким образом использовать названные электронные элементы, как и многие другие, для выполнения операций с двоичными числами.

3. В машину двоичные числа вводятся в виде комбинаций электрических уровней. Чтобы подробно рассказать об устройстве самолета, о том, как работают отдельные его агрегаты и системы, понадобилась бы, наверное, толстая книга, а то и многотомник. Но можно обойтись и несколькими страницами, если не вдаваться в подробности, назвать лишь самое важное, что позволяет многотонной машине подниматься в воздух, летать и маневрировать на большой высоте. Если изложить то, что принято называть принципом действия, и при этом, конечно, не бояться упрощений. Прежде всего, наверное, нужно будет рассказать о крыльях: если крыло определенной формы находится в потоке воздуха, то у него появляется подъемная сила. Вспомните о таком летательном аппарате, как планер, который держится в воздухе только благодаря подъемной силе крыла. Здесь необходимо будет пояснить главное – подъемная сила появляется, когда относительно крыла движется воздушный поток (или, наоборот, крыло движется относительно воздушного потока). А отсюда уже останется один шаг до двигателя, который создает движение самолета и тем самым обеспечивает появление подъемной силы. В заключение можно будет рассказать о том, как работают рули высоты и поворота.

Конечно, в такой ультракороткий рассказ не войдут многие интересные и важные подробности, например описание системы навигации или различных типов двигателей, не говоря уже об электропитании или автоматике тормозов, благодаря которой самолет с огромной скоростью (до 300 км/ч) ровно бежит по взлетно-посадочной полосе. Что поделаешь, пытаясь коротко рассказать о главном, о принципах, приходится жертвовать деталями, даже интересными и важными.

Нам предстоит познакомиться с принципом работы цифровых вычислительных машин, и с самого начала отметим, что ограничимся только одним основным их типом – тактовыми ЭВМ (иногда пишут ЭЦВМ – электронная цифровая вычислительная машина), работающими в двоичном коде. В такой машине имеется генератор тактовых импульсов ГТИ, который выдает непрерывную очередь ровных прямоугольных импульсов, размеренно следующих друг за другом. Тактовый генератор – это метроном, отбивающий ритм всей работы ЭВМ. По тактам генератора отсчитываются последовательности двоичных чисел: высокий уровень (наличие напряжения, например, около 5 В) означает «единицу», а низкий уровень (отсутствие напряжения, около 0 В) означает «ноль».

На рис. 16.3; 1, 2 показан процесс ввода в простейшую условную машину некоторого числа. Все начинается с того, что оператор, получив десятичные числа, которые нужно сложить, превращает их в двоичные числа, которые переносят на бумажную ленту, определенным образом пробивая в ней отверстия. Получается перфорированная, то есть дырчатая, лента, а сокращенно – перфолента; дырка в ней соответствует «единице», а отсутствие дырки, точнее ее пропуск, соответствует «нулю». Все это внешне делается очень просто: оператор нажимает клавиши перфоратора, набирая заданное десятичное число, а из аппарата сразу же выходит перфолента с дырками и пропусками, которые соответствуют нужному двоичному числу.

Теперь нужно с перфоленты ввести число в машину, превратить его из определенной последовательности отверстий в такую же последовательность уровней напряжения. Эту задачу выполняет устройство ввода, используя в качестве сырья тактовые импульсы. В нашем устройстве ввода есть игольчатый контакт, который, замыкаясь, открывает дорогу току. Контакт этот, как видно по рис. 16.3; 2, замкнут только в том случае, когда под иглой оказывается отверстие в перфоленте. Поэтому последовательность импульсов и пауз в точности повторяет последовательность дырок и пропусков в перфоленте, то есть отображает двоичное число, которое как раз и нужно было ввести в машину, протягивая ленту.

4. Электронная схема «сумматор», манипулируя электрическими сигналами, может выполнять сложение двоичных чисел. Ввод чисел в машину, превращение их в комбинации электрических импульсов, конечно, не самоцель. С числами нужно работать, производить с ними различные математические операции. И сейчас мы посмотрим, как можно произвести одну из них – сложение. Чтобы сразу же не утонуть в подробностях, сделаем то, что реально никогда не делается: пристроим к ЭВМ сразу два устройства ввода (рис. 16.3; 3) и через каждое из них введем в машину одно из двух слагаемых. Причем ввод начнем одновременно, как по выстрелу стартового пистолета. И начнем вводить числа с конца, с последнего раз-

ряда, – здесь нет ничего удивительного, сложение «в столбик» мы тоже начинаем с конца, с последних цифр, и от них постепенно движемся влево, в сторону старших разрядов. Обе серии импульсов, то есть оба наших слагаемых, одновременно будем подавать на сумматор, который и выполнит операцию сложения. В попытке кратчайшим путем пояснить принцип работы ЭВМ мы все время идем на неслыханные упрощения, но вот сумматор будет представлен в истинном своем виде. Во-первых, потому, что сумматор – один из основных элементов настоящих вычислительных машин. Ну а во-вторых, сумматор – прекрасный пример того, как с помощью электронных схем остроумно решаются конкретные задачи переработки цифровой информации.

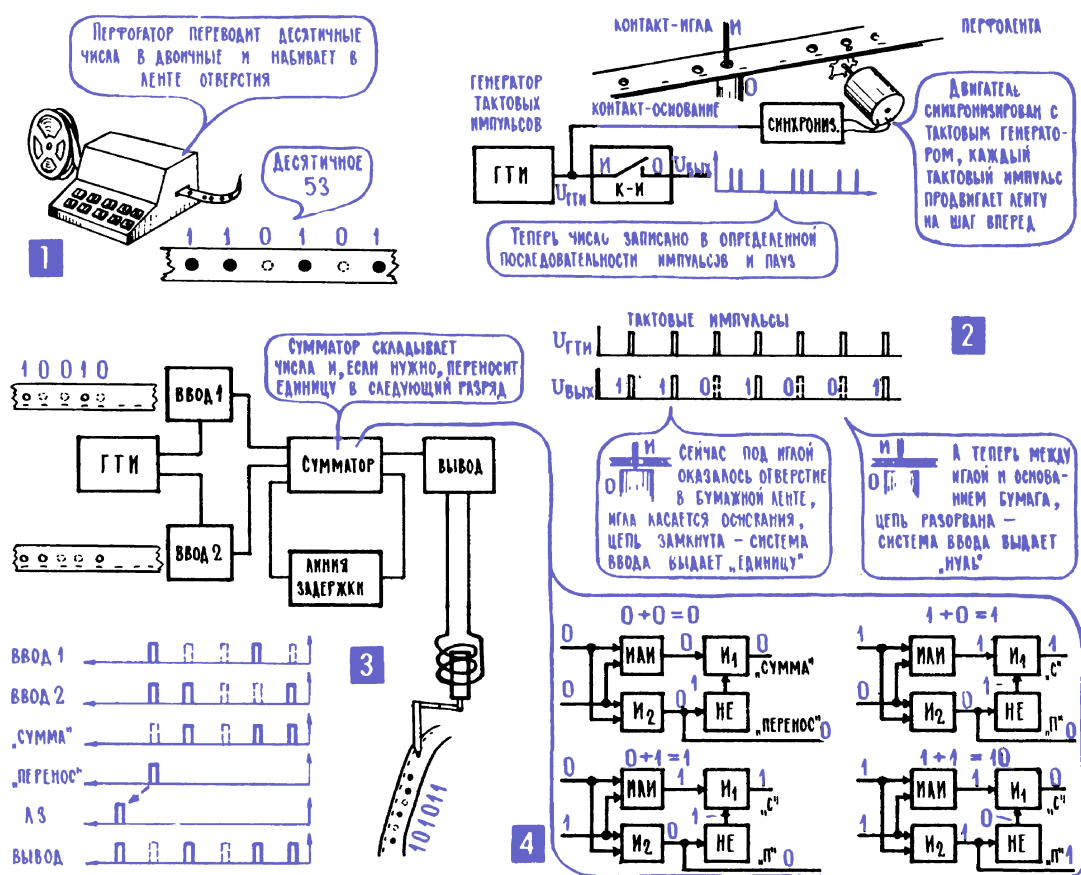


Рис. 16.3. Обработка двоичных цифр в электронной вычислительной машине

Что должен делать сумматор? Он должен последовательно, разряд за разрядом (начиная с конца) складывать «единицы» и «нули» первого и второго слагаемых. Причем здесь возможны такие четыре варианта: $0 + 0$, $1 + 0$, $0 + 1$ и $1 + 1$. Первые три операции прекрасно выполнила бы одна схе-

ма ИЛИ: в первом случае на ее выходе не было бы сигнала, а во втором и третьем на выходе появлялся бы высокий уровень. И это как раз соответствовало бы известным правилам сложения $0 + 0 = 0$; $1 + 0 = 1$ и $0 + 1 = 1$. Что же касается четвертого сочетания слагаемых, $1 + 1$, то схема ИЛИ, конечно, не годится: под действием двух одновременных «единиц» на ее входах она дает «единицу» на выходе, то есть выполняет операцию $1 + 1 = 1$. А нам нужно, чтобы получилось $1 + 1 = 0$ с переносом «единицы» в следующий разряд (рис. 16.3; 3).

Вот этот перенос «единицы» в следующий разряд оказывается довольно сложной задачей. И решается она с помощью нескольких логических элементов, собранных по схеме рис. 16.3; 4.

Здесь тоже все начинается со схемы ИЛИ – именно на ее вход одновременно подаются «единицы» обоих слагаемых. Но с выхода ИЛИ они идут на выход «сумма» не сразу, а через элемент I_1 . Как известно, схема И срабатывает только в том случае, если у нее на входе есть одновременно две «единицы» (гл. 15; 6). Это значит, что «единица» пройдет из ИЛИ через I_1 на выход сумматора только в том случае, если на вход I_1 вместе с этой «единицей» придет второй сигнал, в данном случае от логического элемента НЕ.

Посмотрим, в каких случаях это происходит.

Оба слагаемых подаются не только на ИЛИ, но одновременно еще и на элемент I_2 , а с него сигнал поступает как раз на интересующий нас элемент НЕ. На рис. 16.3; 4 показаны все возможные варианты суммирования двух одноразрядных чисел. В первых трех случаях $0 + 0$, $1 + 0$ и $0 + 1$ элемент I_2 не срабатывает, так как на его входе нет необходимых для этого двух – именно двух и только двух! – одновременных «единиц». А значит, в этих случаях с I_2 на элемент НЕ ничего не поступает, этот элемент не срабатывает, и на его выходе действует нормальное выходное напряжение. Не забывайте, что элемент НЕ делает все наоборот: сигнал на его выходе существует, когда на вход элемента ничего не подается (рис. 15.4; 5). А когда на вход сигнал подается – на выходе элемента НЕ сигнал исчезает. В итоге получается:

- если на входах сумматора «нули» ($0 + 0$), то на его выходе тоже «ноль» – в этом случае на входе I_1 действует лишь сигнал, поступающий с НЕ, а его одного недостаточно для срабатывания I_1 ; элемент I_2 пока не срабатывает, на его вход тоже поступает «ноль»;
- если на входах сумматора появляется только одна «единица» ($1 + 0$ или $0 + 1$), то на выходе «сумма» импульс появится – теперь на входе I_1 , кроме высокого уровня напряжения, как и прежде поступающего с НЕ, появляется еще одна «единица» – с ИЛИ, этих двух «единиц», с ИЛИ и с НЕ, уже достаточно для того, чтобы сработал

элемент I_1 , и на его выходе, то есть на выходе «сумма», появилась «единица» ($1 + 0 = 1$; $0 + 1 = 1$); элемент I_2 все еще не срабатывает: на его входе одна «единица», а этого мало;

- если на входах сумматора одновременно появятся два импульса ($1 + 1$), то на выходе «сумма» будет «ноль»: хотя к I_1 , как и раньше, пройдет сигнал с ИЛИ, но исчезнет сигнал с НЕ. Потому что под действием двух одновременных входных «единиц» ($1 + 1$) срабатывает наконец I_2 , и при этом на входе НЕ появится сигнал, а на выходе исчезнет. И таким образом из-за исчезновения сигнала на выходе НЕ не сработает I_1 , а значит, на выходе «сумма» окажется «ноль»¹.

Вот этого как раз мы и добивались, чтобы при появлении «единиц» одновременно на обоих входах сумматора на его выходе «сумма» был «ноль». Потому что $1 + 1 = 10$, то есть в первом разряде при сложении должен появиться «ноль», а во второй нужно перенести «единицу». «Ноль» на нужном месте у нас уже появился, что же касается «единицы», то ее снимают с выхода «перенос», то есть с выхода I_2 , и направляют в линию задержки ЛЗ. Там эта «единица» ждет, пока на входах сумматора появятся «единицы» или «нули» следующего разряда («...ноль пишем, один в уме...»), и в нужный момент добавляется к ним. Чтобы решить эту задачу до конца, приходится собирать несколько более сложную схему, но это уже, как говорится, детали. Принцип действия сумматора остается без изменений: выполняя определенные логические операции, он складывает любые двоичные числа, перенося при необходимости «единицу» в следующий разряд и безошибочно формируя последовательность уровней напряжения, в которых отображен результат сложения, записана сумма двух чисел. Если добавить к сумматору простейшее устройство вывода информации, например перо с электромагнитным приводом, то получится законченная электронная счетная машина для выполнения операции «сложение».

Эта условная машина введена в наш рассказ с той же целью, с какой вводился планер в рассказ о самолете, – «для выяснения некоторых принципов». Но если честно, то наша примитивная машина в сравнении с настоящими ЭВМ – это даже не планер, а, наверное, не больше чем бумажный голубь. И главное, принципиальное отличие нашего учебного компьютера от настоящих современных ЭВМ состоит в том, что в этих машинах имеется совершенная система автоматизации счета. Именно эта автоматизация работы с числами придает электронным счетным машинам совершенно новые качества, позволяет им самостоятельно решать чрезвычайно сложные задачи.

¹ Комбинация логических элементов, действующих по правилам $0 + 0 = 0$, $1 + 0 = 1$, $0 + 1 = 1$ и $1 + 1 = 0$, носит специальное название «исключающее ИЛИ» (чтобы было проще запомнить: такой элемент можно называть «элементом несовпадения» – единица на выходе тогда, когда на входах сигналы не совпадают).

5. *Оперативная память, введенная для того, чтобы упростить выполнение арифметических операций, радикально меняет возможности компьютера.* Счетная машина с сумматорами может производить не только сложение, но и вычитание, пользуясь для этого так называемыми обратными числами. Обратное число получают из обычного двоичного числа, заменив все «нули» на «единицы», а «единицы» на «нули». Математики научились заменять вычитание прибавлением обратного числа с некоторыми дополнительными операциями, которые легко может выполнить суммирующая машина.

С помощью сумматора, в принципе, можно и умножать. В нашей простейшей машине для этого нужно вместо электромагнитного пера (устройство вывода информации) установить перфоратор. Теперь полученная сумма будет представлена новой перфолентой (рис. 16.4; 1), и для умножения эту перфоленту нужно будет запускать на вход машины и свести умножение к последовательному сложению. Применительно к десятичной системе это, например, может выглядеть так: $4 \cdot 6 = 6 + 6 + 6 + 6 = 24$; последовательность действий: $6 + 6 = 12$, результат вновь подаем на вход машины и производим операцию $12 + 6 = 18$; результат снова подаем на вход машины и производим операцию $18 + 6 = 24$. Подобным же образом легко выполнить суммирование нескольких чисел, например суммирование $2 + 7 + 4 + 5 + 1$ произвести так: $2 + 7 = 9$; $9 + 4 = 13$; $13 + 5 = 18$ и, наконец, $18 + 1 = 19$.

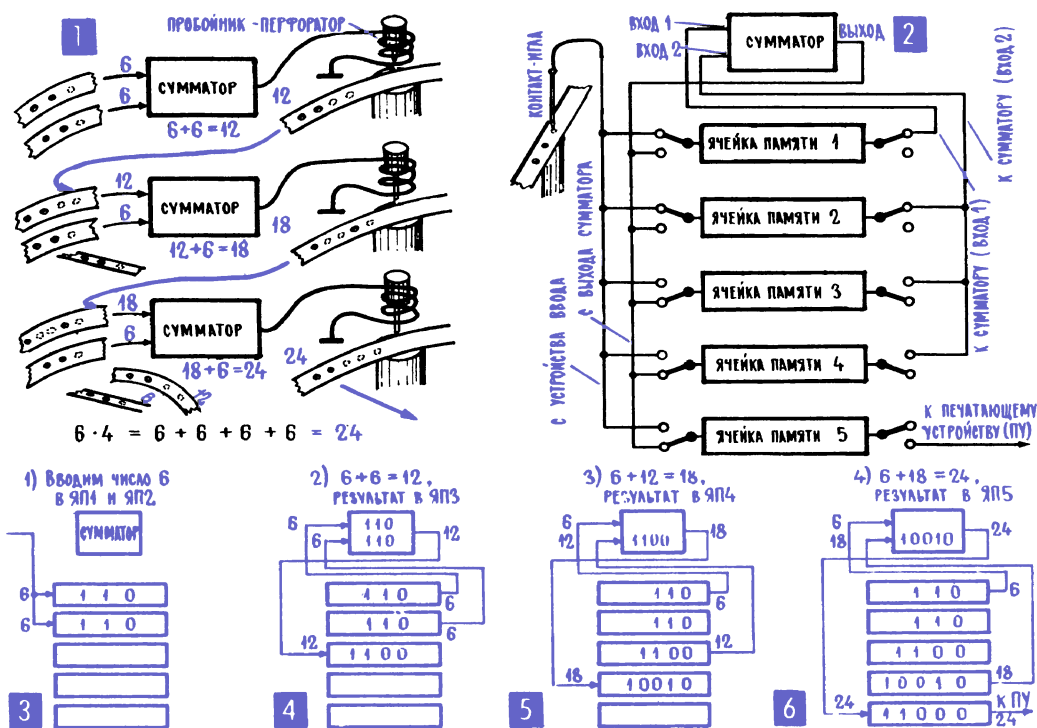


Рис. 16.4. Принцип функционирования памяти

Конечно, суммировать несколько слагаемых или умножать таким способом довольно сложно, нужно каждый раз получать перфоленту с промежуточным результатом, перебрасывать ее с выхода на вход и начинать повторное считывание. В попытке упростить операцию умножения или многократного сложения мы сейчас введем еще один элемент, который, как потом выяснится, может вообще в корне изменить принцип работы машины, резко поднять ее математическую квалификацию. Мы введем в машину память. Память вычислительной машины – это устройство, в котором можно записать определенную последовательность уровней напряжения, а затем в нужный момент воспроизвести эту последовательность, то есть извлечь число из памяти. Перфолента, вообще-то говоря, тоже память, но память очень неудобная для оперативной работы с числами; мы сейчас придумаем что-нибудь получше.

Во-первых, для создания памяти ЭВМ можно использовать уже знакомую нам систему запоминания электрических сигналов – магнитную запись. И нужно сказать, что магнитная память, магнитная запись сигналов, широко используется в ЭВМ. Сигналы записывают на широкой магнитной ленте, на магнитных барабанах или дисках, а в некоторых случаях даже на ленте в стандартных магнитофонных кассетах. Во всех этих случаях устройство памяти, в принципе, очень напоминает обычный магнитофон. Кроме того, в ЭВМ встречается память на магнитных элементах, она совсем не похожа на магнитную запись звука в магнитофонах, хотя в обоих случаях для запоминания электрических сигналов используется одно и то же явление – остаточная намагниченность. Одна из разновидностей «запоминающих магнитиков» – цилиндрические магнитные домены, ЦМД. Это микроскопические области внутри кристалла, их намагничивают и перемещают к считывающему устройству внешними магнитными полями, подобно тому как электрическими полями перемещают дырки внутри полупроводникового кристалла.

Память электронной вычислительной машины выполняют и на триггерах (гл. 11; 17). Триггер может находиться в одном из двух устойчивых состояний, одно из них можно использовать для запоминания «единицы», второе – для запоминания «нуля». Широко применяется и так называемая динамическая память. Здесь запоминающий элемент – просто конденсатор. Когда конденсатор заряжен, в нем записана «единица», когда разряжен – «ноль». А поскольку конденсатор постепенно разряжается, его все время подзаряжают. В принципе, это несложно: машина тактовая, и можно сделать так, что каждый тактовый импульс будет подбавлять немного энергии конденсаторам. Но конечно, только уже заряженным, то есть только тем, которые помнят «единицу».

Примечание редактора. Магнитная запись в устройствах компьютерной памяти (в виде жестких дисков и даже ленточных накопителей – стриммеров, см. гл. 13; 23)

широко распространена и в наше время, несмотря на победное шествие твердотельных накопителей на основе флеш-памяти, так как гораздо дешевле в расчете на 1 мегабайт и потому удобна для хранения больших массивов информации. А вот почти все остальные многочисленные попытки придумать альтернативу этим разновидностям постепенно или вовсе ушли в прошлое либо остались в каких-то очень специальных применениях. Судьбу таких попыток можно проиллюстрировать на примере упоминаемой выше памяти на цилиндрических магнитных доменах: идея памяти на ЦМД действительно была популярна в 1970–1980-е годы, но так и не превратилась в коммерческий продукт из-за малого выхода годных и множества сопутствующих проблем. Направление окончательно было закрыто в конце 1980-х, хотя до этого в Intel, крупнейшей мировой компании по интегральным технологиям, по этой теме работало целое подразделение. На сегодняшний день, кроме устройств магнитной записи и твердотельных устройств (флеш-дисков и флеш-накопителей), в качестве внешней памяти остаются распространенными оптические накопители (компакт-диски и DVD). А вот внутренняя, оперативная память (ОЗУ, см. далее) в компьютерных устройствах и сегодня остается в принципе такой же, как упомянутые автором разновидности динамической памяти (DRAM) и памяти на триггерах (статической, SRAM).

Прежде чем говорить об устройстве памяти, несколько слов о том, что вообще может дать память счетной машине. Во-первых, она может избавить от необходимости одновременно и синхронно вводить в машину оба слагаемых при их суммировании (рис. 16.4) – слагаемые можно поочередно и не торопясь записать в память, а затем в момент их складывания одновременно направить из памяти прямо в сумматор. При умножении можно записывать в память промежуточные суммы и для повторного суммирования извлекать их оттуда одновременно с нужным сомножителем. Точно так же можно хранить и любые другие результаты промежуточных вычислений и исходные данные, условия задачи, разного рода справочные сведения, например число «пи» или основание натуральных логарифмов. В нужный момент все это можно вводить в вычисления или выдавать в виде справки.

И наконец, самое главное: в память в закодированном виде можно ввести программу вычислений и доверить самой машине всю последовательность математических действий, то есть управление машиной можно доверить самой машине, автоматизировать вычисления.

На рис. 16.5; 1 очень упрощенно показана схема, которая может запомнить четырехразрядное двоичное число. Элементы памяти в ней – триггеры; увеличив их количество, можно запоминать любые большие числа; блок триггеров для запоминания одного числа образует ячейку памяти ЯП. В процессе записи быстродействующий синхронный коммутатор СК₁ во время каждого тактового импульса поочередно подключает к триггерам устройство ввода информации, в данном случае контакт-иглу, под которой движется перфорированная лента. В исходном состоянии во всех триггерах правый транзистор открыт, и на его коллекторе напряжение равно

нулю – все остается на нагрузке; левый транзистор закрыт, и на его коллекторе почти полное напряжение питания – на рисунках это отображено светящейся лампочкой. Такое состояние триггера – правый транзистор открыт, левый закрыт – будем считать нулем (триггер запомнил 0), а второе его состояние – правый транзистор закрыт, левый открыт – будем считать единицей (триггер запомнил 1). Если с иглы поступит импульс на вход триггера, то он перейдет в другое устойчивое состояние; а если импульс не поступит, триггер останется в прежнем состоянии.

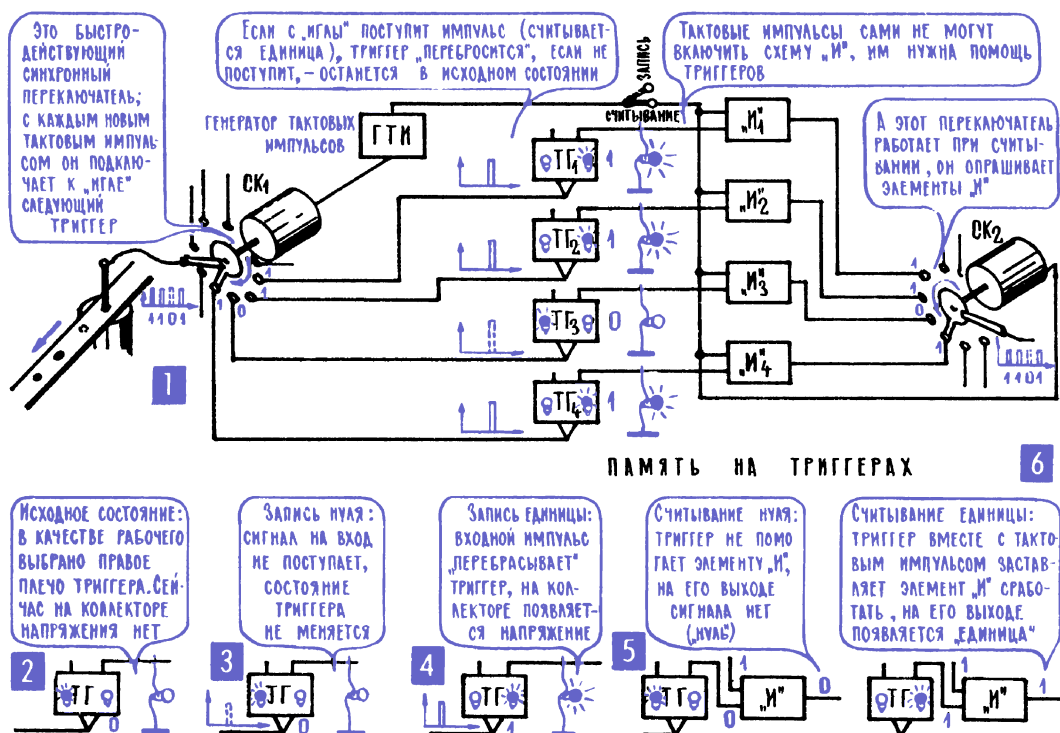


Рис. 16.5. Принцип работы памяти на триггерах

Вот так каждый триггер запоминает «единицу» или «ноль», запоминает один из разрядов числа, которое вводится в память.

Теперь о том, как вспоминается нужное число.

Извлечение числа из памяти происходит с помощью элемента И, на один из входов которого подаются тактовые импульсы, причем одного лишь тактового импульса недостаточно для срабатывания элемента И. Другой вход элемента И подключен к «своему» триггеру. Если правый транзистор закрыт (триггер помнит 1), то с его коллектора снимается «минус» – второе напряжение, необходимое для срабатывания элемента И (рис. 16.5; 4, 6). В этом случае из блока памяти выдается импульс – «единица». А если правый транзистор триггера открыт (триггер помнит 0), то на

его коллекторе напряжения нет, элемент И не срабатывает, и из памяти никакой импульс не выдается, что, как мы договаривались, соответствует «нулю» (рис. 16.5; 3, 5).

Считывание информации из памяти не меняет режима триггеров, они будут как угодно долго помнить число, которое в них записано. Чтобы стереть информацию, нужно все триггеры каким-то внешним воздействием вернуть в исходное состояние. Кроме того, конечно, триггеры все забудут, если снять с них питание, например отключить вычислительную машину от электросети. Когда вы вновь включите машину, то ничто не заставит триггер вернуться именно в то состояние, в котором он был перед выключением. В этом состоит основной недостаток памяти на триггерах, в частности в сравнении с магнитной памятью.

Машинную память, оперативно участвующую в вычислениях, например хранящую промежуточные результаты или числа, которые нужно вводить в сумматор, называют оперативной памятью. А блок такой памяти – это оперативное запоминающее устройство, ОЗУ, как правило, оно сделано на триггерах². Кроме того, в вычислительной машине есть ПЗУ, постоянное запоминающее устройство. В него, в отличие от ОЗУ, ничего записать нельзя – все, что должно помнить ПЗУ (например, стандартные последовательности действий сумматора при умножении или вычитании), в него записано, «зашито» при изготовлении машины³. Запись какого-нибудь числа в ОЗУ и его считывание из ОЗУ и ПЗУ происходят очень быстро, на это уходят миллионные доли секунды. Есть в машинах еще и внешняя долговременная память, чаще всего на магнитной ленте или на магнитном диске⁴. В долговременной памяти может храниться очень много информации, но, чтобы найти ее и считать из памяти, нужны уже не миллионные доли секунды, а секунды и минуты.

Элементы оперативной памяти объединяют в ячейки, в каждой ячейке столько элементов памяти, сколько разрядов может быть в числе, на которое рассчитана машина. Так, например, для машины, рассчитанной на работу с двадцатиразрядными двоичными числами (в десятичной системе это могут быть числа до миллиона), нужны ячейки памяти, в каждой из которых 20 запоминающих элементов, например 20 триггеров.

6. Скромные труженики компьютера – электронные переключатели и дешифраторы – выполняют гигантский объем работ, обеспечивают четкое взаимодействие всех узлов ЭВМ, а в итоге саму возможность

² Как правило, ОЗУ компьютерных устройств сделано на основе динамической памяти, на основе относительно сложной и дорогой триггерной (статической) памяти выполняются сверхоперативные рабочие ячейки памяти – например, регистры микропроцессора, или небольшие объемы ОЗУ в однокристальных компьютерах (микроконтроллерах).

³ Сейчас ПЗУ делают на основе флеш-памяти, которая допускает возможность перезаписи – именно таким образом производится «перепрошивка» смартфонов и других компьютерных устройств.

⁴ См. «Примечание редактора» выше.

автоматизированных вычислений. Итак, в нашем распоряжении есть оперативная память на триггерах, но для введения ее в счетную машину нужно еще создать реальный синхронный коммутатор. Нужно, чтобы первый импульс попадал в первый элемент памяти и к моменту появления второго импульса контакт-игла уже была бы подключена ко второму элементу памяти. И при считывании информации нужно обеспечить своевременное переключение элементов памяти, причем очень быстрое, с частотой тактовых импульсов. В современных ЭВМ частота тактовых генераторов – это мегагерцы, то есть миллионы импульсов в секунду⁵. При такой частоте синхронный коммутатор должен производить переключения за миллионные доли секунды, что совершенно неприемлемо для механических систем, таких, например, как телефонный шаговый искатель (гл. 8; 5). К счастью, были созданы чисто электронные схемы коммутаторов, которые, как и другие электронные схемы, могут работать очень быстро.

Одна из таких коммутирующих схем в упрощенном виде показана на рис. 16.6. Ее основа – счетчик из двух триггеров, $ТГ_1$ и $ТГ_2$, и четыре элемента И, каждый из которых работает на свой элемент памяти: $ЭП_1$, $ЭП_2$, $ЭП_3$ и $ЭП_4$. При этом у каждой схемы И четыре входа, она срабатывает только в том случае, если на эти входы одновременно приходит четыре сигнала высокого уровня – и первый, и второй, и третий, и четвертый. Один из этих сигналов – импульсы тактового генератора, они передаются на все И одновременно и синхронизируют их работу: что бы там ни произошло, любое И будет срабатывать только в момент существования тактового импульса.

Итак, элементу И для срабатывания нужно четыре отпирающих сигнала, и один уже есть. Два из трех оставшихся сигналов идут от триггеров, причем в такой комбинации, что на разные элементы И приходят разные пары отпирающих сигналов, разные комбинации напряжений, получаемых от четырех разных транзисторов. В итоге получается, что к каждому из четырех И такие пары сигналов от триггеров приходят в разное время. А это значит, что наши четыре схемы И поочередно готовы сработать и записать сигнал, каждая в свою ячейку памяти. Но, конечно, для такого срабатывания, для записи сигнала в память, нужен сам этот сигнал – нужен четвертый по счету импульс на входе схемы И; он приходит с контакт-иглы, с устройства ввода, когда происходит считывание «единицы».

Когда этот импульс-единица появится, то тут же произойдет запись «единицы» в элемент памяти. Именно в тот элемент, на входе которого в данный момент действует «великолепная тройка»: тактовый импульс и две

⁵ Самый знаменитый советский компьютер под названием БЭСМ-6 (1966 год) имел тактовую частоту 10 МГц. Первые «персоналки» конца 1970-х – начала 1980-х и того меньше: Apple II (1977), например, 1 МГц, IBM PC (1981) – 4,77 МГц. Привычные ныне тактовые частоты в гигагерцы были достигнуты лишь в начале 2000-х.

«единицы» с триггеров. Ну, а если в устройстве ввода в данный момент считывается «ноль», то в элемент памяти ничего не попадает, то есть в него и будет записан «ноль»⁶. А схема быстро подключит к устройству ввода следующий элемент памяти: ведь это основная ее задача – поочередно подключать к устройству ввода элементы памяти, чтобы на них записывались «единицы» или «нули».

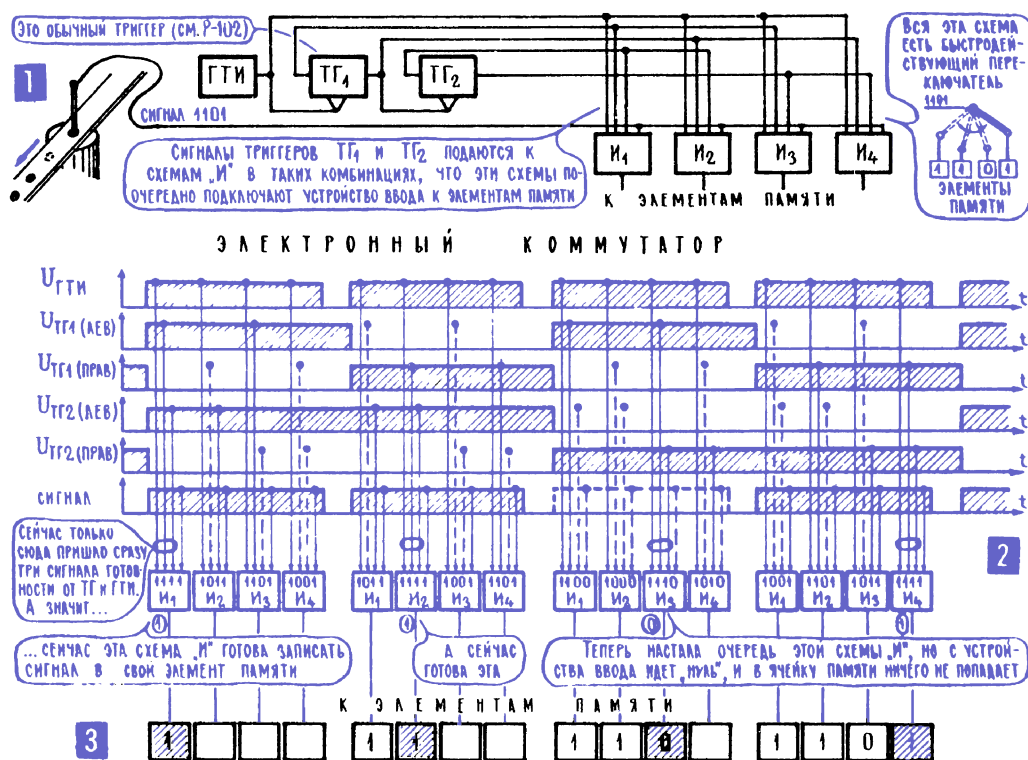


Рис. 16.6. Электронный коммутатор

Сумматор, оперативная память, быстродействующие коммутаторы – это, к сожалению, еще не все, что жизненно необходимо для электронной счетной машины. Нужно еще научиться писать и читать адреса, которые исключают путаницу при пересылке чисел. По этим адресам данное число будет записано в строго определенную ячейку памяти, а затем при считывании число будет безошибочно извлекаться только из той ячейки, из которой нужно, а не из какой-либо другой. Для этого в память будет направлен запрос – адрес того числа, которое понадобилось в данный момент для вычислений. Адрес записывают тем же способом, что и сами числа, то

⁶ Точнее, в память ничего записано не будет – при такой организации памяти перед записью ее необходимо полностью очищать, т. е. в данном случае записывать «нули» во все ячейки. Многие реальные устройства памяти именно так и устроены – в первую очередь к ним относится флеш-память, только в полностью очищенной флеш-памяти содержатся «единицы», а при записи в нужные места записываются «нули».

есть в виде определенной комбинации «нулей» и «единиц», а получатели чисел – сумматоры, ячейки памяти и другие – знают, что, скажем, первые четыре знака – это адрес числа, а само оно начинается только после этих четырех знаков (рис. 16.7). Поэтому в таких случаях в арифметических действиях первые четыре знака не учитываются: сделать это нетрудно, например выключив сумматор на первые четыре такта с помощью триггерного счетчика. Запись адреса предназначена только для специальной схемы – дешифратора, задача которого – разобраться в этой записи и направить число адресату.

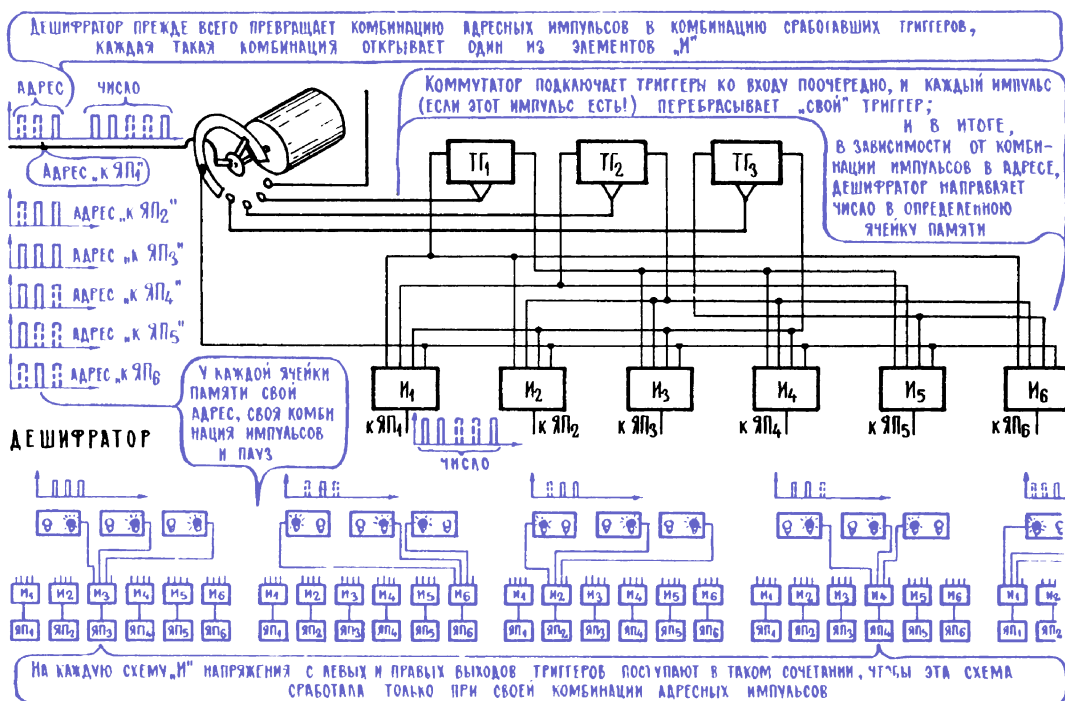


Рис. 16.7. Формирование и дешифрация адреса в памяти

В принципе, дешифраторы работают просто, лишний раз демонстрируя, как красиво электроника умеет решать очень сложные, казалось бы, задачи. На рис. 16.7 показан дешифратор, который может сортировать шесть разных четырехзначных адресов и рассылать их шести адресатам. Основа дешифратора – хорошо уже знакомые нам элементы И, каждый из них срабатывает только в том случае, если на его входе одновременно действуют два сигнала. А сигналы эти поступают на вход элементов И с трех триггеров, на которые через синхронный коммутатор подаются импульсы адреса. В зависимости от комбинации этих импульсов адрес в разных сочетаниях устанавливает режимы триггеров, и эти сочетания как раз и определяют, какой элемент И сработает и куда пойдет число.

Настал момент подвести некоторые итоги. Пытаясь упростить операцию последовательного сложения в суммирующей машине, мы ввели в нее оперативную память, быстродействующий коммутатор и систему адресов с дешифраторами. И оказывается, что именно эти наши нововведения не только делают более удобной простейшую суммирующую машину, но и позволяют автоматизировать весь процесс вычислений, создать принципиально новый вид автоматов для переработки информации.

А сейчас от нашего «бумажного голубя», от условного компьютера, с элементами которого мы только что познакомились, попробуем перейти к реальной ЭВМ. Но для этого нам предстоит провести еще одну подготовительную операцию.

7. Вычислительная машина может работать с числами, со словами и с рисунками. Как говорит само название, работа вычислительной машины состоит в том, что она вычисляет, производит различные математические операции с числами. Но часто приходится решать задачи, которые удобнее или, во всяком случае, привычнее формулировать словами, хотя потом можно решать эти задачи, превратив слова в числа, то есть комбинации букв превратив в комбинации цифр. Вот очень простые примеры, хотя, может быть, не самые удачные: когда вы хотите по телефону узнать время, то набираете цифру «100»⁷; нетрудно представить себе телефонный аппарат с клавиатурой, как в буквопечатающем телеграфном аппарате (рис. 6.21; 4), – вы набираете на этой клавиатуре слова «Который час?», в результате чего появляются определенные комбинации электрических сигналов (рис. 8.1; 5, 6), а не очень сложная электронная схема формирует из них сигналы, соответствующие цифре «100» в обычном телефоне. Другой пример: по заданной вами программе ЭВМ суммирует массу всех деталей автомобиля и определяет его общую массу; результат появляется на бумажной ленте, его выдает особый цифропечатающий аппарат; мы запомнили, что в машину вводилась масса деталей в килограммах, и, значит, суммарная масса тоже получится в килограммах; но можно было бы не обременять свою память, подключив к компьютеру аппарат, печатающий не только цифры, но и буквы; у каждой буквы свой код из «единиц» и «нулей», то есть из импульсов и пауз; в нужный момент машина 9 раз извлечет из памяти соответствующий код и рядом с цифрой ответа отпечатает слово «килограмм».

Итак, кодируя буквы комбинациями импульсов и пауз, в ряде случаев для удобства можно вводить в машину слова или получать слова в ее ответах.

Теперь о рисунках.

⁷ В Москве и ряде других регионов России номер 100 – бесплатная (при звонке со стационарного городского телефона; с мобильного – как правило, платная) служба точного времени, работает с 1937 года и по сей день.

Рассмотрим случай, когда машина решает уже знакомую нам задачу – подсчитывает массу многоступенчатой ракеты, по мере того как она набирает высоту (рис. 6.3; 3): масса уменьшается потому, что постепенно выгорает топливо и поочередно «отстреливаются» отработавшие ступени. Машина выдает результат в виде двух колонок чисел: в одной колонке высота, в другой – соответствующая ей масса ракеты. Теперь введем в вычислительную машину загадочный пока электронный блок КД, который свяжет ее с телевизором.

В исходном состоянии электронный луч, который «зажигает» экран телевизора, «задавлен» большим запирающим напряжением, и поэтому экран не светится. Снять это запирающее напряжение может электрический импульс, поступивший из блока КД, – в момент появления этого импульса электронный луч ударит по экрану, и на нем появится светящаяся точка. В каком месте? В телевизоре генераторы развертки непрерывно двигают луч, и он строку за строкой прочерчивает весь экран (гл. 13; 13). Поэтому место появления светящейся точки зависит от того, в какой момент будет подан в телевизор отпирающий импульс из блока КД.

А теперь представьте себе, что в блок КД поступают результаты вычислений, те самые две колонки чисел «высота» – «масса». И каждое число, как некий код, управляет задержкой отпирающего импульса, а значит, местом появления светящейся точки. Причем управляет так, что числа из колонки «высота» определяют положение светящейся точки в горизонтальном направлении, а числа из колонки «масса» – в вертикальном. Так каждая пара чисел в определенном месте ставит светящуюся точку, точки сливаются в сплошную линию, и в итоге весь результат вычислений предстает на экране в виде графика. Точно так же, управляя «зажиганием» точек на экране телевизора, числа, поступающие из компьютера, могут рисовать схемы, чертежи, писать цифры и буквы. Ведь что такое, скажем, написать букву «Т»? Для этого нужно одну под другой зажечь точки на нескольких соседних строках (вертикальная палочка буквы «Т») и зажечь несколько соседних точек на одной строке (горизонтальная палочка). Аналогично из сливающихся точек образуется и любая другая буква. Порядок действий здесь может быть таким: дешифраторы по сочетанию импульсов и пауз распознают код буквы (так же, как они распознают адрес; см. раздел 6) и включают соответствующую этой букве систему выдачи импульсов, которые и зажгут необходимый набор точек на экране.

Точно найти момент выдачи импульса и зажечь таким образом точку в нужном месте экрана в принципе не так сложно: в телевизоре электронный луч прочерчивает строку примерно за 60 мкс, за это время тактовый генератор с частотой 10 МГц выдаст 600 импульсов, любой из них можно отсчитать с помощью триггерных цепочек, выделить и использовать в качестве отпирающего. Даже на сравнительно большом экране точка будет при этом иметь размеры меньше миллиметра.

Устройство с телевизионным экраном для вывода информации из ЭВМ – это дисплей (от английского «ту дисплей» – «показывать»), его роль может выполнять и обычный телевизор с несложной приставкой. Ну а блок КД – это контролер дисплея, система, управляющая им, целый специализированный компьютер, необходимый для того, чтобы сочетания импульсов и пауз на выходе ЭВМ мгновенно превращались в буквы и рисунки на экране дисплея. Ближайшие родственники дисплея – это так называемые графопостроители: по командам, полученным из машины, они перемещают по листу бумаги перо с электромагнитным управлением и вычерчивают графики, схемы или чертежи, вычисленные компьютером.

Примечание редактора. Дисплеи бывают векторными и растровыми. В предыдущем описании автор не провел между ними четкой границы, однако разница довольно велика. Векторный дисплей и сейчас можно встретить на аналоговом осциллографе или старой радиолокационной станции (см. гл. 15; 6). В наиболее распространенной разновидности векторных дисплеев луч движется по экрану слева направо (или по кругу, как в радиолокаторах) за счет равномерной горизонтальной (или, соответственно, круговой) развертки и управляется сигналами, в которых закодирована величина вертикального отклонения луча от некоторого нулевого уровня. Так как на векторных дисплеях, как правило, рисуется всего одна линия, то и объем компьютерной памяти для хранения картинки невелик: это набор величин отклонений луча на протяжении экрана. Поэтому такие дисплеи с управлением от компьютера были распространены в начальный период (по сути, графопостроитель, упомянутый автором, также представляет собой векторный дисплей).

В отличие от этого, в растровых дисплеях (типовой представитель – уже знакомый нам телевизионный экран, см. гл. 13; 9–18) горизонтальная и вертикальная развертки осуществляются автоматически, а задача контроллера – высветить или погасить луч в нужные моменты времени. Поэтому для растровых дисплеев необходимый объем памяти всегда должен соответствовать полному количеству точек на картинке, независимо от того, изображается там пустое место (все точки погашены), ровное белое поле (все точки горят) или сложная картинка (о необходимых объемах памяти см. в тексте далее). Контроллер такого дисплея (видеоконтроллер, видеокарта) устроен гораздо сложнее векторного и нередко работает гораздо быстрее, чем центральный процессор компьютера. Зато и возможности управления картинкой неизмеримо возрастают.

Вы, конечно, помните, что для того, чтобы не было мельканий картинки, все воспроизведенное на телевизионном экране нужно повторять 25 раз в секунду, с частотой кадров. Удобно хранить весь кадр в оперативной памяти ЭВМ – оттуда его можно брать сколько угодно раз и в любой момент. Но какой должна быть вместимость памяти для хранения кадра? Сколько в ней должно быть триггеров? И какой объем памяти нужно иметь для хранения в ней слов, закодированных двоичными числами?

Чтобы оценивать что-либо количественно, нужно, как всегда, договориться о единицах измерения (гл. 3; 9). Количество информации принято измерять в битах, и эту единицу нам проще всего определить как один разряд двоичного числа, то есть одну единицу или ноль, один импульс или паузу. Так, двоичное число 101 110 010 111 содержит 12 бит информации, число 1101 – 4 бита, двоичное число 1 – один бит. В компьютерной технике и электросвязи чаще пользуются более крупной единицей информации 1 байт = 8 бит, а также производными единицами 1 килобайт \approx 1000 байт; 1 мегабайт \approx 1000 килобайт; 1 гигабайт \approx 1000 мегабайт. Знак примерного равенства (\approx) понадобился потому, что каждая следующая единица не в 1000, а в $1024 (2^{10})$ раза больше предыдущей.

Чтобы определить количество информации, которую содержит газетная фотография, буква алфавита или книга, проще всего найти их эквивалент в виде двоичных чисел. Можно, например, представить себе экран дисплея состоящим из 520 000 точек (гл. 13; 16), каждая из которых может светиться (1) или быть темной (0). Чтобы точку за точкой описать состояние всего экрана, понадобится двоичное число, в котором 520 000 разрядов – цепочка из 520 000 единиц и нулей. То есть картинка на экране содержит информацию 520 000 бит \approx 65 000 байт \approx 65 килобайт. Заметьте, это в том случае, когда для описания каждой точки нужна информация всего один бит – «светится» или «не светится», 1 или 0. Если же у точки может быть несколько уровней яркости – «белый», «светло-светло-серый», «светло-серый», «серый» и т. д. – или несколько цветов, то объем информации одного кадра увеличится во много раз.

Двоичным кодом, как мы уже знаем, можно представить и буквы алфавита (рис. 8.1; 6), в компьютерах это делается в принципе так же, а в деталях несколько иначе, чем в телеграфии. Существует такое соотношение: двоичными числами, имеющими n разрядов, можно закодировать 2^n объектов. Так, скажем, трехразрядное двоичное число может иметь $2^3 = 2 \cdot 2 \cdot 2 = 8$ «модификаций»: 000, 001, 010, 011, 100, 101, 110, 111. Эти восемь троек могут быть кодами, «этикетками» для 8 объектов, и каждый из них, представленный трехразрядным числом, будет нести 3 бита информации. В нашем алфавите 33 буквы или 32, если смириться с тем, что буквы *е* и *ё* будут иметь одинаковый шифр, то есть будут неразличимы. Чтобы зашифровать, закодировать двоичными числами 32 буквы, нужны пятиразрядные двоичные числа, так как $2^5 = 32$. При этом, чтобы записать в ОЗУ слово, скажем, из 10 букв, нужно 50 триггеров – они запомнят 10 букв по 5 бит информации (пятиразрядное число) в каждой.

В большинстве компьютеров букву алфавита кодируют не пятиразрядным, а восьмиразрядным числом, то есть тратят на букву не 5 бит, а 8 бит = 1 байт. На первый взгляд это может показаться ненужной расточительностью – восьмиразрядными числами можно закодировать $2^8 = 256$ объектов, а букв всего 33. Но кроме строчных (маленьких) букв

есть еще прописные (большие), есть примерно десяток знаков препинания, как правило, нужен и латинский алфавит, знаки арифметических и алгебраических действий и ряд вспомогательных знаков, таких, например, как №, § и другие. Так что восьмибитового кода только-только и хватает. Вот несколько иллюстраций, которые помогут почувствовать, что стоит за появившимися у нас единицами бит, байт, килобайт, мегабайт, гигабайт.

В этой книге на странице без рисунков в тексте примерно 3500 букв, то есть около 3,5 килобайта (из расчета 1 буква – 8 бит, то есть 1 байт). В одном томе Большой советской энциклопедии 4–5 мегабайт, а во всей энциклопедии – более чем 200 мегабайт. Если человек будет всю свою жизнь непрерывно по 18 часов в сутки говорить, то в записи всего, что он скажет, окажется около 20 тысяч мегабайт, то есть 20 гигабайт информации. В каждом телевизионном кадре несколько сот килобайт, в часовой программе – несколько тысяч мегабайт, в небольшой газетной фотографии – сотня килобайт⁸.

Этими сведениями завершается наша подготовка, и мы переходим к знакомству с реальной ЭВМ (рис. 16.8).

8. Основные узлы ЭВМ: процессор, оперативная, постоянная и внешняя память, устройства ввода и вывода информации, линии внутренней связи. В нашей условной ЭВМ есть сумматор – схема, которая умеет складывать два двоичных числа (см. раздел 4 в этой главе). Кроме того, существуют схемы, которые могут выполнять и другие арифметические операции. Так, в сумматоре можно выполнить вычитание, если одно из чисел заменить на обратное (например, вместо 1010 взять 0101) и выполнить еще кое-какие процедуры. А обратное число легко получить с помощью элементов НЕ – они как раз и превращают 0 в 1 и 1 в 0. Если же записать двоичное число в цепочке триггеров, именуемой регистром, а затем управляющим импульсом сдвинуть это число на один разряд влево, то оно окажется умноженным на 2. Пример: число 110011 (десятичное 51) сдвигаем в регистре влево на один разряд и получаем 1100110 (десятичное 102). Два таких сдвига – это умножение на 4, три сдвига – умножение на 8 и т. д. Возможны и различные комбинированные действия, например два сдвига и прибавление первоначального числа дают умножение на 5; суммирование результатов умножения числа на 8 и на 2 – это умножение данного числа на 10. Пример: $4 \cdot 10 = 4 \cdot 8 + 4 \cdot 2 = 40$.

⁸ Несмотря на то что количества точек (пикселей) в современных представлениях изображений на экране намного возросли (сравните черно-белую SECAM-картинку 720×576 точек = 0,4 мегапиксела с цветной картинкой телевидения высокой четкости $1920 \times 1080 \times 3 = 6$ мегапикселей, см. гл. 13; 17), объемы памяти, указанные здесь, примерно соответствуют и сегодняшней действительности – все дело в том, что современные технологии хранения изображений, как правило, предполагают их сжатие с использованием разнообразных, иногда очень хитрых алгоритмов, эксплуатирующих особенности человеческого зрения.

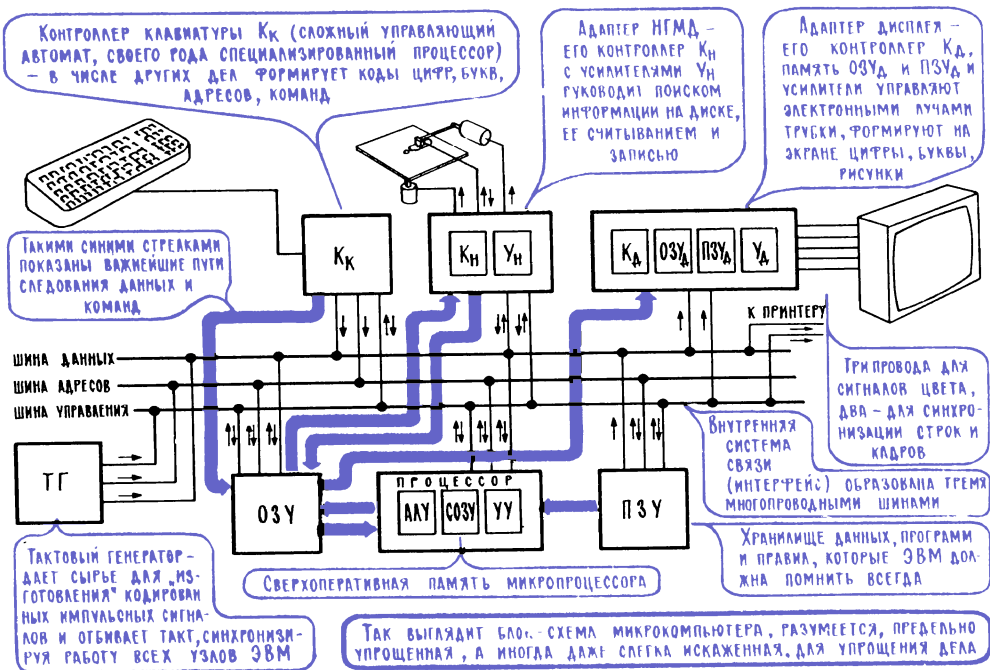
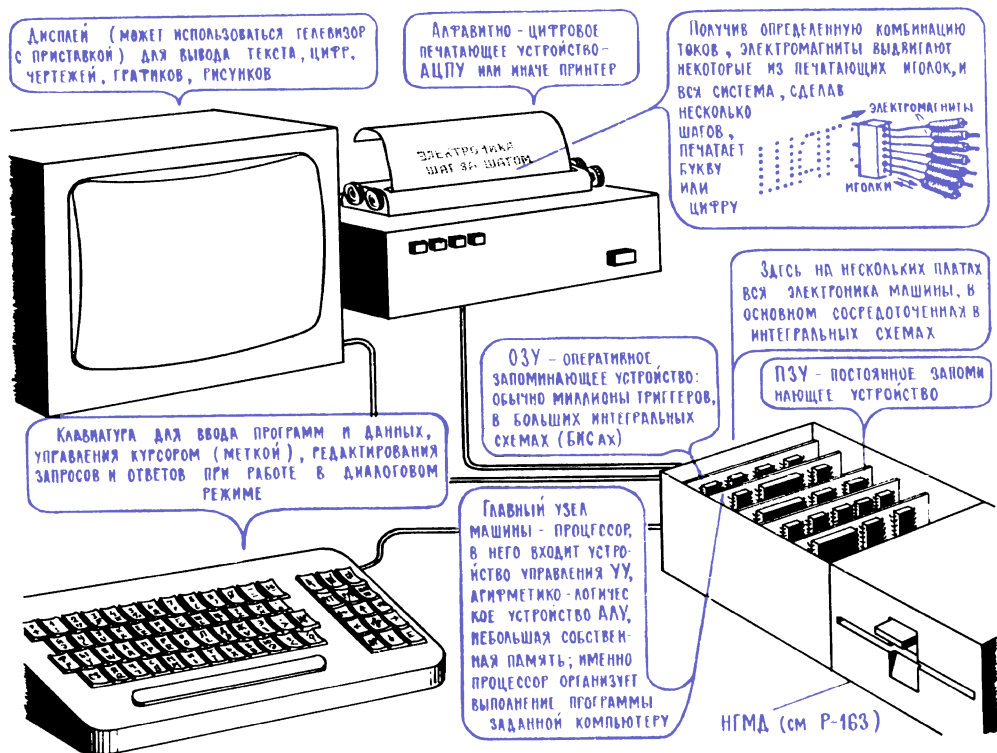


Рис. 16.8. Устройство ЭВМ

Все элементы компьютера, выполняющие арифметические операции и различные их сочетания, объединены в АЛУ – арифметико-логическое устройство. Быстродействующие коммутаторы производят в АЛУ переключения, необходимые для выполнения заданной операции, а управляет коммутаторами поступающий в АЛУ код операции – двоичное число, которое распознают дешифраторы. Командует всей этой системой устройство управления УУ, которое, в свою очередь, запрашивает из ОЗУ и получает оттуда, опять-таки в закодированном виде, программу вычислений. И здесь работают неустоимые труженики – коммутаторы и дешифраторы. Последние распознают поступающие из ОЗУ закодированные двоичными числами общие указания программы «...сложить полученный в предыдущем действии результат с первым введенным числом...», и УУ превращает эти общие указания в конкретные, направляемые в ОЗУ, ПЗУ и АЛУ команды «...переключить АЛУ на режим сложения...», «...извлечь число из ячейки 011 011 ОЗУ и направить его на вход 1 АЛУ...», «...извлечь число из ячейки 010 001 ОЗУ и направить его на вход 2 АЛУ...», «...произвести сложение...», «...результат направить в ячейки 101 101 ОЗУ...». Все, что сказано здесь словами «извлечь», «направить», «произвести», сводится в итоге к очень четким и согласованным последовательным переключениям по сигналам отбивающего такт метронома – тактового генератора. Руководит выполнением этих переключений безупречный диспетчер – устройство управления УУ.

Комплекс АЛУ – УУ есть главная действующая сила вычислительной машины. Этот комплекс шаг за шагом, такт за тактом продвигает вперед вычисления, он так и называется – продвигатель, процессор (от латинского слова «процессус» – «продвижение»). Ближайшие сотрудники процессора – ПЗУ и особенно ОЗУ. Отсюда процессор может запросить инструкции на очередные свои действия, из ОЗУ он получает исходные данные и программу вычислений, сюда же, в ОЗУ, процессор направляет промежуточные и окончательные результаты. Программа и исходные данные попадают в ОЗУ из устройства ввода, и отсюда же, из ОЗУ, окончательный результат уходит в устройство вывода.

Здесь, пожалуй, уместно сделать два важных сообщения.

Первое. Из всего многообразия современных вычислительных машин мы выбрали для знакомства самую небольшую – микроЭВМ. И даже более конкретно: выбрана одна из разновидностей микроЭВМ – персональный компьютер, ПК (рис. 16.8). В нем есть много такого, что можно встретить во всех других машинах, но есть, конечно, и свои особенности.

Второе. В нашей условной машине (рис. 16.3) «единицы» и «нули» какого-либо числа, так же как «единицы» и «нули» адресов и команд, шли последовательно, друг за другом, напоминая короткие пулеметные очереди. Но во всех современных машинах это, скорее, залпы из много-

ствольного миномета – «единицы» и «нули» какого-либо числа, адреса или команды рождаются, путешествуют и обрабатываются одновременно, параллельно, что, конечно, намного ускоряет все операции. Если, например, машина работает с восьмиразрядными числами, то все ее узлы соединены восьмипроводными линиями (проводами), по которым одновременно движутся все восемь электрических «единиц» и «нулей» данного числа. Более того, внутренняя система связи компьютера – это три линии, как говорят обычно, три шины: шина данных, шина адресов и шина управления. И все это многопроводные линии, по которым одновременно идет и все целиком обрабатываемое число, и весь адрес, и вся команда управления.

Естественно, что такая система требует сложнейшей диспетчеризации, и вместе с процессором работает несколько его помощников – контроллеров. В их числе, например, контроллер клавиатуры, с которой вводятся исходные данные и программа, контроллер печатающего устройства – принтера, контроллер устройства внешней памяти на магнитных дисках и уже знакомый нам контроллер дисплея, блок КД.

Важнейшая характеристика ЭВМ – объем ее оперативной памяти, и чем больше емкость ОЗУ, тем больше информации компьютер может «держать в уме», тем большими объемами данных может ворожить и более сложные задачи решать. Емкость ОЗУ типичного персонального компьютера – 60–200 килобайт⁹, а большой ЭВМ – в сотни раз больше, десятки мегабайт. Но как бы ни была велика собственная, внутренняя память ЭВМ, ею одной все равно обойтись нельзя.

Компьютер – универсальная вычислительная машина, ей обычно приходится решать сотни и тысячи разнообразных задач, работать по самым разным программам, для каждой из которых может быть множество конкретных частных условий. Все это в ОЗУ, конечно, поместить невозможно, да и не нужно. Память машины делают двухступенчатой – имеется библиотека программ, типовых решений, информационных текстов и т. п., и все это в стандартном виде, записано на магнитной ленте или на магнитных дисках. Когда нужно, определенный кусок этих записей (специалисты говорят «файл»), например конкретную программу для расчета мостов или программу игры в шахматы, переписывают в ОЗУ. Таким образом, хранившаяся на диске или ленте информация становится доступной процессору, он может свободно обращаться к ней, так же как если бы эта информация была введена в компьютер с клавиатуры.

⁹ Пусть читателя не удивляют эти цифры – объем ОЗУ персонального компьютера Apple II (1977) составлял 48 килобайт и только к 1984 году возрос до 128 килобайт. Одним из козырей появившейся в 1981 году IBM PC была возможность расширения памяти аж до 640 килобайт, хотя первые образцы могли поступать в продажу с 16 килобайтами памяти. Именно в то время Билл Гейтс заявлял, что «640 килобайт хватит надолго», что впоследствии послужило поводом для многочисленных насмешек.

В персональных компьютерах чаще всего используют гибкие магнитные диски небольших размеров – дискеты¹⁰. А «магнитофон», который их воспроизводит и записывает на дисках новую информацию, называется дисководом, или, официально, НГМД – накопителем на гибких магнитных дисках. Запись на диске ведется кольцами, чтобы быстро находить нужные куски и записи (файлы), каждый из них и имеет свой код. Он поступает в контроллер НГМД, и тот с помощью шагового двигателя (вращается он не непрерывно, а мелкими шажками) подводит магнитную головку сразу к нужной дорожке.

На небольшом магнитном диске диаметром 133 мм умещается 200–800 килобайт информации. Это немало, но есть твердые (жесткие) диски, на которых записывают десятки мегабайт, несколько томов энциклопедии. Гигабайты информации, то есть сотни и даже тысячи таких книжек, как эта, могут уместиться на видеодиске, где с помощью тончайшего лазерного луча оставлены микроскопические следы, читаемые потом фотодиодами¹¹.

Из приведенных на рис. 16.8 основных узлов персональной ЭВМ нам остается назвать еще два – устройство ввода информации с клавиатурой и матричное печатающее устройство, принтер. При нажатии на ту или иную клавишу в устройстве ввода электронные схемы – шифраторы – формируют и посылают в ОЗУ код соответствующей буквы, цифры или операции. А в контроллере принтера (официально АЦПУ – алфавитно-цифровое печатающее устройство) стандартные коды букв и цифр преобразуются в другой код, который приводит в действие электромагниты печатающих иголок, и они, ударив по бумаге, оставляют следы в виде точек. Из этих точек постепенно складываются буквы и цифры¹² (рис. 16.8).

В конце этой краткой экскурсии по реальной ЭВМ нужно признаться, что мы не обратили внимания на нечто чрезвычайно важное – на программы, по которым работает компьютер.

Попробуем исправить эту недоработку.

¹⁰ Довольно долгое время, почти до середины 1980-х, персоналки действительно имели внешнюю память только на дискетах. Возможность подключения жесткого диска (НЖМД) до 10 мегабайт объемом появилась впервые лишь в IBM PC XT, 1983 год, но ввиду дороговизны они не всегда входили в комплектацию. Так как в СССР жесткие диски долго не выпускались (первый малогабаритный отечественный жесткий диск был выпущен в 1986 году, и в дальнейшем они были очень дороги), то в бытовых моделях отечественных персоналок («Агат», «Вектор-06Ц», БК-0010/11, Микроша и пр.) имела возможность подключения бытового кассетного магнитофона в качестве устройства внешней памяти, хотя некоторые снабжались и приводом для дискет.

¹¹ Автор, вероятно, имеет в виду появившиеся в начале 1980-х компакт-диски, которые имеют объем около 700 мегабайт.

¹² Автор описывает матричные принтеры, которые в первое десятилетие существования персональных компьютеров доминировали среди дешевых печатающих устройств для них. В настоящее время матричный принцип печати используется для печати документов на бланках (железнодорожных и авиабилетов), так как единственный из распространенных принципов печати позволяет произвольно позиционировать бумагу относительно печатающей головки. Делается это с помощью поворачивающегося валика – подобно тому, как это было в пишущих машинках.

9. Наряду с «железом» – самой схемой и конструкцией ЭВМ – математические и интеллектуальные способности компьютера определяют созданные для него программы. Давайте посмотрим, как может решаться на машине какая-нибудь простая задача, скажем вычисление суммы десяти чисел типа $1/n$, где $n = 1, 2, 3, 4, \dots, 10$, то есть суммы ряда $1/1 + 1/2 + 1/3 + 1/4 + \dots + 1/10$. Ход решения этой задачи на ЭВМ иллюстрирует рис. 16.9. На нем для простоты вместо двоичных чисел, которыми оперирует машина, показаны десятичные числа.

В оперативную память машины вводим всего два числа: 1 и 10. Цифру 1 вводим сразу в две ячейки памяти – Я1 и Я2. При этом сразу же имеется в виду, что 1 в ячейке Я1 в дальнейшем будет числителем для любого члена ряда $1/n$, а 1, записанная в Я2 будет первым нашим знаменателем $n = 1$. Мы будем постепенно «наращивать» его, добавляя каждый раз по единице, пока не доберемся до последнего n , равного 10.

Теперь введем в машину команды, им отводятся последние четыре ячеек памяти – Я6, Я7, Я8, Я9. (Конечно же, в нашем примере все чрезвычайно упрощено, много важных подробностей опущено, все решение задачи показано очень схематично.) В ячейку Я1 вводим первую команду К1 – «Число из ячейки Я1 (то есть 1) разделить на число из ячейки Я2 (то есть на n ; пока у нас $n = 1$; получаем первый член ряда: $1/1$); результат направить в Я4; перейти к команде К2». Все эти указания извлекаются из Я6, где записана команда К1, и поступают в АЛУ – арифметико-логическое устройство, которое по указанным адресам извлекает из нужных ячеек числа и производит с ними заданные операции (на нашей схеме и это показано очень упрощенно). Кроме того, АЛУ посылает результат в заданную ячейку и включает следующую команду, предписанную программой. В действительности всю эту работу выполняет процессор, главным образом его устройство управления. Но для простоты весь процессор представлен на рис. 16.9 его вычисляющим блоком АЛУ.

Команда К1, сделав свое дело, передает эстафету команде К2, которая должна прибавить вновь появившийся член ряда (ячейка Я4) к сумме всех предыдущих членов ряда, а она находится в ячейке Я5. У нас пока в этой ячейке пусто, наше $1/1$ – пока единственное слагаемое ряда. Поэтому по команде К2 оно в одиночестве попадает в Я5 и будет ждать там следующих членов ряда. Потом к $1/1$ прибавится $1/2$, к их сумме $1/1 + 1/2 = 3/2$ прибавится $1/3$, к новой сумме $3/2 + 1/3 = 11/6$ прибавится $1/4$ и т. д. Но это будет потом, а пока, выполнив команду К2, программа действует дальше.

После К2 программа начинает формировать следующий член ряда $1/(n + 1)$. Прежде всего команда К3 формирует новый знаменатель, выполняя операцию: «Сложить число из ячейки Я2 (то есть n) с числом из ячейки Я1 (то есть с 1; получится $n + 1$, на первый раз это $1 + 1 = 2$), результат

направить снова в Я2, стерев предыдущее число ($n = 1$). Последняя часть команды – обычная экономия: число $n = 1$ уже не нужно, оно уже побывало знаменателем ($1/1$, команда К1), и, чтобы не занимать лишнюю ячейку памяти, 1 убираем из Я2 и помещаем туда 2; это к тому же упростит последующие действия, а именно выполнение последующей команды: она найдет нужное ей новое число по знакомому старому адресу Я2.

В ячейки оперативной памяти Я1, Я2, Я3 введены исходные числа. В ячейки Я6, Я7, Я8, Я9 – программа вычислений (команды К1, К2, К3, К4). А в ячейки Я4, Я5 будут вводиться результаты вычислений

Команда К1: найти $\frac{1}{n}$; для этого число из Я1 делим на число из Я2 (это n); результат записать в Я4; перейти к команде К2

Команда К2: найти новую сумму всех $\frac{1}{n}$; для этого к предыдущей сумме (она в Я5) прибавить $\frac{1}{n}$ (она в Я4); результат в Я5. Стереть предыдущую запись; перейти к команде К3

Команда К3: найти новый знаменатель $n' = n + 1$; для этого к n из Я2 прибавить 1 из Я1; результат (новое n') записать в Я2. Стереть предыдущее n

Команда К4: сравнить новый знаменатель n' с числом 10, записанным в Я9. Если $n' \leq 10$, перейти к К1; если $n' > 10$, печатать результат из Я5; остановить машины

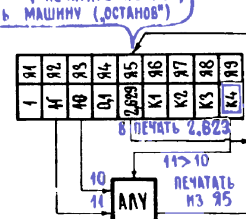
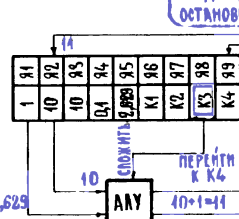
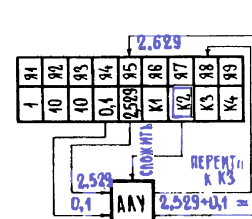
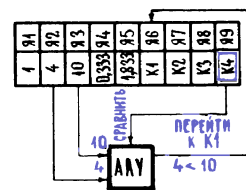
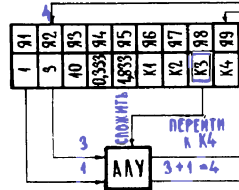
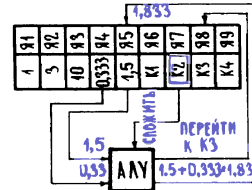
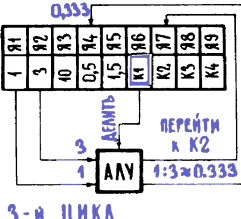
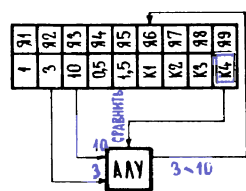
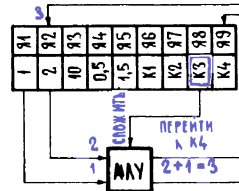
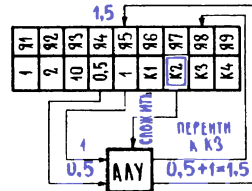
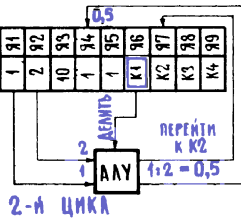
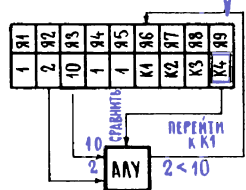
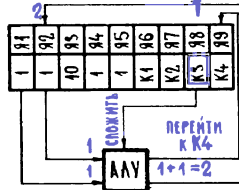
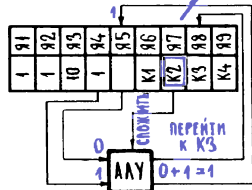
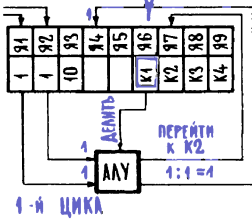


Рис. 16.9. Решение задачи суммирования ряда $1/n$

Теперь можно было бы начать все сначала, с команды K1: найти член ряда $1/2$ и прибавить его к предыдущей сумме. Однако до этого нужно проверить, не пора ли заканчивать вычисления. Поэтому после K3 следует команда K4: «Сравнить число из ячейки Я2 (то есть $n = 2$) с числом из ячейки Я3 (то есть с числом 10), если $n \leq 10$, продолжить вычисления и перейти к команде K1 (в этом случае как раз и начнется новый цикл вычислений); если $n > 10$ (это случится сразу же при $n = 11$), прекратить вычисления, результат из ячейки Я5 (там находится последняя сумма всех предыдущих членов ряда, включая $1/10$) направить в устройство вывода информации.

На рис. 16.9 показаны первые три цикла вычислений и самый последний цикл, когда знаменатель дроби, постепенно увеличиваясь, достигает 11. Как видите, порядок действий машины очень прост: выполняя деление, она находит очередной член ряда $1/n$, прибавляет его к сумме всех предыдущих членов ряда, затем находит новый знаменатель $n + 1$, потом опять находит новый член $1/(n + 1)$, опять прибавляет его к предыдущей сумме, опять вычисляет новый знаменатель $(n + 1) + 1$ и т. д. И всякий раз машина проверяет, а не стало ли очередное n больше 10, дальше которого считать не велено.

Найти сумму ряда до $n = 10$ несложно, буквально за несколько минут это можно сделать и «вручную». Но вот досчитать сумму ряда до $n = 100$ или тем более до $n = 1000$ не так-то просто, на это понадобились бы уже не минуты, а часы. А для машины посчитать наш ряд, например до $n = 1000$, просто пустяк.

Решая такую простейшую задачу, машина сама по заданной программе проведет довольно большой объем работ, проделав в общей сложности 4000 основных операций (1000 делений, 2000 сложений, 1000 сравнений) и массу вспомогательных. И на все это даже у очень небольшой современной ЭВМ ушли бы какие-то доли секунды. Вот что такое автоматизация вычислений, путь к которой открыли нам электронные схемы – сумматор и другие схемы процессора, быстродействующие коммутаторы, дешифраторы, устройства памяти.

Уже говорилось, что возможности ЭВМ во многом определяются объемом ее оперативной памяти (см. предыдущий раздел). Другая важнейшая характеристика компьютера – быстродействие. Еще, кажется, совсем недавно рекордом было несколько тысяч операций в секунду, а сегодня даже небольшая настольная ЭВМ выполняет в секунду 200–300 тысяч операций, средняя машина – несколько миллионов, а крупные суперЭВМ – сотни миллионов. Дело подходит к скорости счета миллиард операций в секунду. На машинах с высоким быстродействием можно одновременно решать десятки разных задач – каждый вычислитель или, как обычно говорят, пользователь, работает со своего пульта, своего терминала (дисплей, клавиатура, дисковод). Машина решает задачи по частям, молниеносно

переключаясь с одной задачи на другую, так что никто из пользователей и не замечает, что он не один.

Примечание редактора. Скорость в единицы тысяч операций в секунду (IPS, инструкций в секунду) была характерна для компьютеров 1-го поколения (на электронных лампах), разрабатывавшихся в первой половине 1950-х годов. Первые западные персоналки (IBM PC, Apple II, конец 70-х – начало 80-х) выполняли 330–500 тыс. инструкций в секунду. Миллион операций в секунду для персональных компьютеров был пройден уже в 1982 году на IBM PC AT.

В середине 1980-х осознали, что сравнивать процессоры по скорости выполнения элементарных операций (инструкций) стало бессмысленно – этот показатель совершенно не отвечает быstroдействию (производительности) в реальных задачах, уж очень процессоры стали разные по устройству. Появились т. н. синтетические тесты, оценивавшие быstroдействие по числу выполняемых операций «с плавающей запятой», т. е. над действительными числами. Эта единица получила название flops (флопс). Разумеется, обычные элементарные операции, о которых говорилось выше, выполняются существенно быстрее, чем операции над действительными числами, что надо учитывать при сравнении показателей IPS и flops.

На ноябрь 2018 года рекорд быstroдействия принадлежал суперкомпьютеру AC922 (Окриджская национальная лаборатория, США) с результатом $143,5 \cdot 10^{15}$ (миллионов миллиардов) флопс. Персональными компьютерами миллиард флопс был пройден около 1999–2000 года. Скорость процессоров для настольных компьютеров в середине 2010-х годов превысила 100 млрд флопс (что соответствует суперкомпьютерам-рекордсменам 1993–1994 годов).

Но главное, для чего нужно высокое быstroдействие, – это решение очень сложных задач, быстрая обработка больших массивов информации. Так, например, точность прогнозов погоды на 5–10 дней вперед заметно возрастает, если увеличить объем перерабатываемой информации о температуре, ветрах, давлении, влажности и т. п., которую по несколько раз в сутки собирают во многих тысячах точек земного шара. Без ЭВМ, вручную, такие задачи вообще нет смысла решать – прогноз на 10 дней вперед придется рассчитывать несколько месяцев. Даже нынешние быstroдействующие компьютеры не успевают переработать всю информацию, какую хотели бы метеорологи.

Высокое быstroдействие нужно для решения сложных научных и технических задач. Например, для того чтобы описать поведение плазмы в будущем термоядерном реакторе. Или за разумное время рассчитать, детально проанализировать несколько вариантов большого железнодорожного моста и выбрать лучший из них. Или оперативно и детально моделировать процессы в больших экономических системах¹³.

¹³ Добавим к этому одну из самых сложных вычислительных задач – моделирование ядерных взрывов, что стало одним из основных способов испытания ядерных боеприпасов после запрещения наземных и воздушных взрывов в начале 1960-х. Поэтому многие самые быstroдействующие суперкомпьютеры традиционно размещались в ядерных лабораториях США.

Принцип построения нашей учебной программы (рис. 16.9) примерно тот же, какой был на заре программирования, – это программа, как ее называют, в машинных кодах. В ней указываются конкретные адреса, говорится, откуда взять число и куда направить, называются конкретные арифметические действия, которые нужно поочередно выполнять.

По мере усложнения решаемых задач такая система программирования оказалась слишком громоздкой, и появилось средство, упрощающее общение с компьютером, – языки программирования. Сейчас таких языков сотни, если не тысячи: ФОРТРАН, АЛГОЛ, БЕЙСИК, ПАСКАЛЬ, КОБОЛ, СИ, ЛИСП, ЛОГО и другие¹⁴. Все это языки разные и даже совсем разные, но главная идея у них одна – в языке имеются слова, которые вводятся в машину, например, с клавиатуры; эти слова, как любые введенные в машину сочетания букв, превращаются в строго определенный код, определенные сочетания нулей-единиц; специальная вспомогательная программа превращает слова-коды в нужную последовательность конкретных команд и адресов; эта вспомогательная программа называется транслятором¹⁵, переводчиком, она переводит указания, которые вы даете компьютеру на языке программирования, в указания на языке машинных кодов. Если бы наша учебная программа была написана на каком-либо языке программирования, то мы не выписывали бы по десять раз номера ячеек и все последовательности арифметических действий, а изложили бы общую схему вычислений, приписав в конце: «Если $n > 10$, прекратить вычисления и отпечатать результат, если $n \leq 10$, вновь перейти к первому действию». В языках программирования пишут, правда, намного короче и в большинстве английскими словами или сокращениями: «GO TO A» – «перейти к действию A», «IF $n > 10$ THEN B» – «если 10, перейти к действию B», «PRINT SQR 100» – «извлечь квадратный корень из 100 и отпечатать результат», «DEL N5–N8» – «удалить из записи весь текст от 5-й строки до 8-й строки» и т. д.¹⁶

Язык программирования и компьютер – это не есть нечто независимое, существующее каждый сам по себе. Машины ориентируются на определенный язык или максимум на класс языков, для каждого из которых должен быть свой транслятор или интерпретатор – программа перехода с одного языка на другой. В принципе же различают две стратегии, два подхода к взаимодействию машины с программой, а значит, с пользователем. В пакетном режиме машина получает отлаженную программу и сама доводит вычисления до конца. Другой режим – диалоговый, когда, решая

¹⁴ Конечно, за десятилетия набор популярных языков изменился, и многие языки из этого перечня почти забыты. Список языков программирования ныне возглавляет упомянутый здесь язык СИ, созданный еще в начале 1970-х, большинство новых языков делается на его основе.

¹⁵ Трансляторы, в свою очередь, делятся на компиляторы (создающие отдельный исполняемый файл программы) и интерпретаторы (начинающие сразу выполнять программу команда за командой).

¹⁶ Все эти примеры автора – на языке БЕЙСИК.

задачу по частям, машина не только выполняет ваши указания, но и обращает внимание на ошибки или неудачные действия, задает уточняющие вопросы, предлагает варианты дальнейших действий. Именно в таком режиме работают ПК, персональные компьютеры, применительно к которым и появился термин «дружественное программирование». Общение с ПК может начинаться при самых начальных знаниях языка программирования. Можно использовать ПК как справочник, деловой календарь или большую записную книжку, с его помощью можно редактировать тексты, из табличных данных получать многоцветные графики и при этом, изменив какую-либо величину, мгновенно видеть, как из-за этого изменяются все другие, связанные с ней. Уже миллионы людей на собственном опыте почувствовали, как много рутинной, черновой работы берет на себя ПК и как просто и легко он находит точное наивыгоднейшее решение там, где раньше прикидывали на глазок. Нельзя, конечно, разбрасываться торжественным словом «мыслить», но то, что делают современные ЭВМ, даже небольшие, позволяет называть их думающими машинами. Однако, конечно, ЭВМ – это всего лишь машина. Общаясь с ПК на разговорном языке, мы, как уже упоминалось, всего лишь вводим в него слова, закодированные наборами двоичных цифр. При этом компьютер требует абсолютной четкости, он не додумает, не догадается, что вы имели в виду, если что-то сказано нечетко. Вплоть до того, что если, набирая свой вопрос, вы сделаете лишний пробел между словами, машина вас не поймет и, скорее всего, попросит повторить вопрос¹⁷.

Программирование в минимальных дозах, особенно для работы с ПК, доступно каждому человеку. И в то же время программирование – это большая наука и большое искусство, от него во многом зависит, что может сделать данный класс ЭВМ. Это можно увидеть даже на нашем простейшем примере для суммирования последовательности $1/1 + 1/2 + 1/3 + \dots$. В программе для этой задачи можно было написать, чтобы машина сначала нашла все дроби, все слагаемые ряда, а потом начала их складывать. Но при этом в памяти пришлось бы занять уйму ячеек, в то время как, работая по первой нашей программе, машина занимает всего 9 ячеек памяти. Зачастую от программиста зависят не только экономичность и быстрота решения задачи, но и вообще сама возможность такого решения.

Цифровые электронные вычислительные машины в большинстве своем универсальны; они строят цифровые, математические модели, в ко-

¹⁷ Это было характерно для эпохи доминирования командного (пакетного, по терминологии автора) режима управления компьютером – написание команд подчиняется определенным жестким правилам, напоминающим языки программирования. С развитием графических интерфейсов, рассчитанных на диалог с пользователем, управление компьютером все больше и больше «очеловечивалось» – вплоть до появления в современных мобильных компьютерах «голосовых помощников», с которыми можно общаться практически на обычном языке. Но это не значит, что командный стиль полностью отошел в прошлое: профессиональная работа с компьютерными средами основывается по-прежнему на командных языках.

торых можно отобразить самые разные процессы – от борьбы с микробами до рождения новых звезд. Решают машины и простые житейские задачи, связанные с классификацией или поиском информации в больших ее массивах. Можно, например, ввести в память машины, записать на магнитную пленку данные нескольких тысяч деталей, а потом в нужный момент по определенному запросу мгновенно получить от машины нужную классификацию. Скажем, перечень всех деталей из меди, или всех деталей стоимостью более 1 рубля, или всех деталей, которые проходят токарную обработку. При решении подобной задачи каждая характеристика детали так же, как и сама деталь, имеет определенный код. Машина, просматривая коды характеристик, сравнивает их с эталоном, например с кодом 10 110 111, что означает «деталь из меди». В случае совпадения кодов машина считывает код детали, переводит его в название детали и передает на устройство вывода.

Великолепные программы, написанные для машин с высоким быстродействием и большими объемами памяти, позволяют им неплохо играть в шахматы. Здесь каждая позиция и каждая фигура имеет свою количественную, цифровую оценку, свое число «баллов». И для машины игра – это обычная переработка цифровой информации. Просчитывая партию, машина должна выбрать для себя наилучший вариант, тот, который дает ей наибольшее число «баллов». Просмотреть всю партию до конца, все ее варианты, не может ни одна машина. И искусство программиста состоит в том, чтобы научить машину вместо бесстрастного перебора вариантов уже в самом начале оценивать и выбирать только те из них, над которыми стоит серьезно подумать. Нужно сказать, что мощные машины с хорошими программами играют в шахматы очень хорошо.

Создание игровых программ тесно связано с такими важными практическими задачами, как машинный перевод с одного языка на другой, медицинская диагностика или поиск полезных ископаемых с помощью ЭВМ. В этой последней области есть, кстати, немало замечательных достижений. Вот лишь один из примеров. Получив от геофизиков данные измерений, проведенных в разведочной скважине (естественная радиоактивность, плотность пород, их электропроводность и другие), и сопоставляя эти данные со своим опытом, машина иногда лучше самих геофизиков предсказывает, может ли быть в данном районе нефть.

И все это только начало. Компьютеры существуют всего несколько десятилетий, их совершенствование так же, как и совершенствование программ, продолжается очень быстрыми темпами. Так что ждите новых приятных сюрпризов от наших теперь уже незаменимых помощников – быстродействующих вычислительных машин, умеющих делать то, что еще недавно считалось монополией Человека Разумного.

Практикум. Счетчики

Для этих экспериментов нам понадобится:

- логическая микросхема CD4011 (отечественный аналог К561ЛА7);
- две кнопки, одна – переключающая, с тремя выводами, вторая – на простое замыкание;
- переключатель (тумблер);
- микросхемы различных счетчиков:
 - для эксперимента 1: MC14516 (отечественный аналог К561ИЕ11);
 - для эксперимента 2: CD4017 (отечественный аналог К561ИЕ8);
 - для эксперимента 3: CD4029 (отечественный аналог К561ИЕ14);
- светодиоды и резисторы.

Для эксперимента 3 еще понадобится:

- дешифратор CD4511 (отечественный аналог отсутствует);
- семисегментный индикатор с общим катодом (например, BL-S56A или аналогичный).

Во всех экспериментах для наглядности счетчик будет подсчитывать число нажатий кнопки. В такой задаче есть нюанс, который заключается в том, что любая кнопкадребезжит (ну, почти любая, но механические кнопки, которые мы используем, будутдребезжать обязательно). А это значит, что на каждое нажатие электронный счетчик, время срабатывания которого – микросекунды, будет считать не один импульс, а неопределенно случайное их количество. Простыми методами (вроде иногда рекомендуемой установки конденсатора параллельно контактам) от этого явления защититься невозможно. Есть несколько типовых решений, из которых мы здесь выберем не самый компактный, но зато простой и надежный – подключение кнопки к RS-триггеру. Здесь обязательно требуется переключающая кнопка с тремя выводами – ее центральный вывод в нормальном состоянии замкнут с одним из крайних, а при нажатии замыкается с другим. Неудобство этого метода в том, что таких кнопок выпускается гораздо меньше разновидностей, чем на простое замыкание двух контактов.

Схема простейшего RS-триггера с подключением кнопки таким способом одинакова для всех трех случаев и показана на схемах ниже (рис. 16.10, 16.11). Триггер образован двумя логическими элементами DD1 и DD2 типа «И-НЕ» из микросхемы CD4011. Кнопка нормально замкнута с верхним (по схеме) входом RS-триггера, на который через нее подается напряжение низкого уровня, второй вход при этом оказывается привязан к высокому уровню через резистор R_2 . В этом состоянии на выходе триггера (вывод 3 микросхемы) имеется низкий уровень (а на противоположном выходе, вывод 4 микросхемы – высокий уровень, в этой схеме мы его не используем).

При нажатии на этом входе кратковременно окажется напряжение высокого уровня через резистор R_1 , а низкий уровень через кнопку подастся на второй вход. В результате в момент перепада уровней на выходе триггера (вывод 3 микросхемы) окажется напряжение высокого уровня, которое переключится обратно только тогда, когда кнопка вернется в исходное состояние. Промежуточный дребезг контактов не окажет на состояние выходов никакого влияния, так как при дребезге подвижной контакт никогда не пролетает все расстояние туда и обратно целиком.

В результате мы получим на выходе ровно один импульс на каждое нажатие. Разумеется, счетчику все равно, от какого источника поступают импульсы (в пределах быстродействия счетчика, которое для серии CD4000 составляет примерно 1 МГц), кнопку с триггером мы здесь используем только для наглядности, в реальных конструкциях импульсы могут поступать от других источников.

Эксперимент 1. Счетчик с индикацией двоичного числа на светодиодах

Схема этого эксперимента представлена на рис. 16.10; 1. Микросхема MC14516 (отечественный аналог K561IE11) представляет собой 4-разрядный двоичный реверсивный счетчик. Название «реверсивный» означает, что счетчик может работать и на сложение, и на вычитание, направление счета переключается уровнем на выводе «+/-» (вывод 10 микросхемы) с помощью тумблера $K1$ – при высоком уровне счетчик работает на сложение. Подача высокого уровня на вход сброса R (вывод 9) с помощью кнопки $Kn2$ устанавливает все разряды счетчика в нулевые значения.

Входные импульсы подаются на вход счета C (тактовый вход, вывод 15). Четыре выхода счетчика $Q0$ – $Q3$ (выводы 6, 11, 14 и 2) подключены к светодиодам, отображающим состояние четырех разрядов счетчика: нулевое состояние (низкий уровень) – светодиод не горит, состояние единицы (высокий уровень) – светодиод загорается. На этих светодиодах будет отображаться 4-разрядное двоичное число (см. рис. 16.2; 2), соответствующее состоянию счетчика на текущий момент времени. После того как счетчик досчитает до 15 (двоичное число 1111), он опять начнет считать с нуля во всех разрядах. То есть у 4-разрядного счетчика ровно 16 (2^4) состояний, представляющих одну шестнадцатеричную цифру.

У счетчика MC14516 (K561IE11) имеется также возможность предварительной записи заданного числа во все разряды одновременно – 4-разрядное двоичное число подается на входы $S0$ – $S3$ (выводы 4, 12, 13, 3), а запись производится подачей импульса высокого уровня на вход SE (вывод 1). Наличие функции предварительной записи позволяет с помощью таких счетчиков выполнять арифметические операции сложения и вычитания, а также деления входной частоты в заданное число раз. В нашей схеме эта

возможность не используется, поэтому все упомянутые входы подключены к низкому уровню.

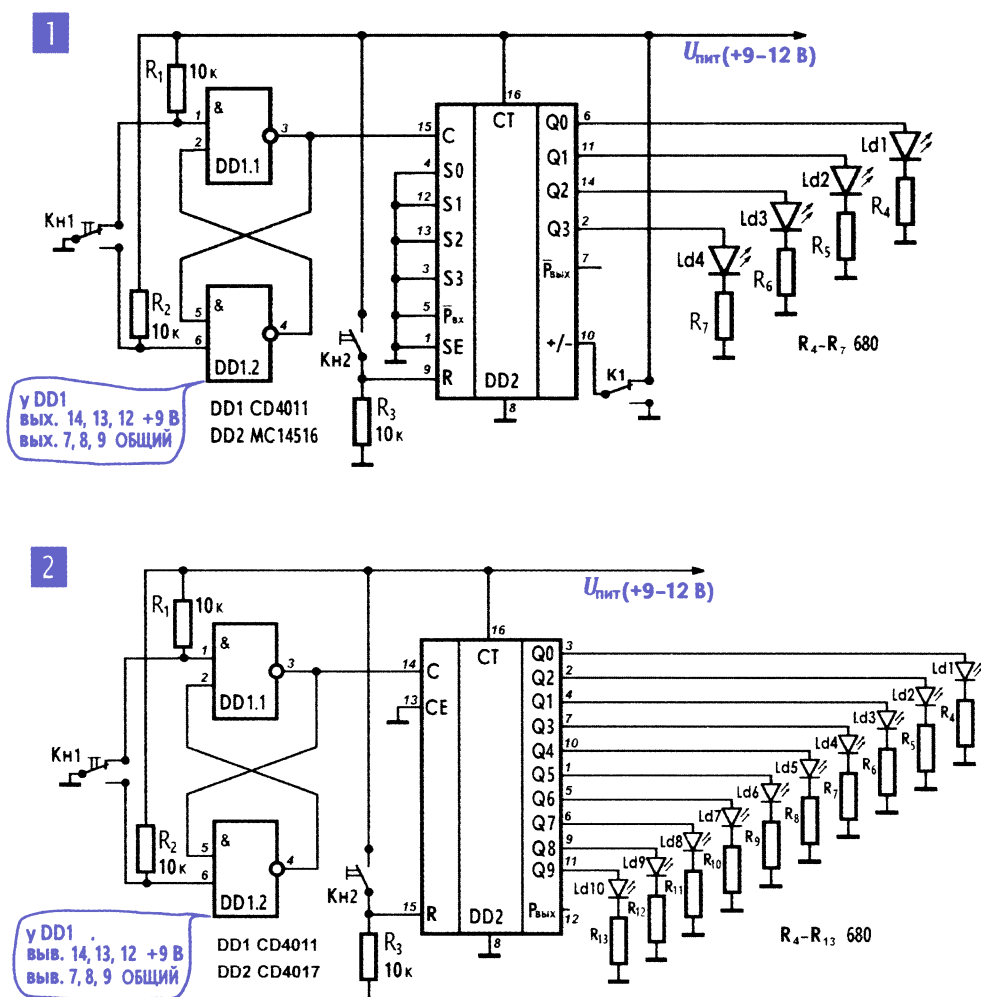


Рис. 16.10. Двоичный и десятичный счетчики с индикацией на светодиодах

Счетчик MC14516 (K561IE11) в этой схеме может быть заменен на CD4520 (K561IE10). Эта микросхема содержит два подобных 4-разрядных счетчика, отличающихся отсутствием выводов S0–S3 и SE для загрузки заданного числа и вывода «+/-» для реверсии счета (поэтому в такой же 16-выводной корпус и влезает сразу два счетчика). Зато с помощью одной такой микросхемы можно получить сразу 8-разрядный двоичный счетчик, могущий, правда, только суммировать входные импульсы.

Для того чтобы получить еще больше разрядов, в большинстве счетчиков имеется выход и вход переноса $\bar{P}_{\text{вых}}$ и $\bar{P}_{\text{вх}}$ (выводы 7 и 5 у MC14516, см.

схему рис. 16.10; 1). Вход переноса $\bar{P}_{\text{вх}}$ у первого счетчика соединяется с левым потенциалом (низким уровнем), как на нашей схеме. Выход переноса соединяется со входом переноса следующей микросхемы, а тактовые входы С всех микросхем при этом объединяются. Второй счетчик будет считать, если на его входе переноса также оказывается низкий уровень, поэтому выход и вход переноса снабжаются надстрочной чертой – значком инверсии, показывающим, что рабочий уровень в данном случае отрицательный, а не положительный.

Эксперимент 2. Счетчик с индикацией десятичного числа на светодиодах

Схема этого эксперимента представлена на рис. 16.10; 2. Здесь мы просто заменили микросхему счетчика на CD4017 (отечественный аналог K561ИЕ8), которая представляет собой десятичный счетчик со встроенным дешифратором. Счетчик считает импульсы на входе С (вывод 14), при этом высокий уровень появляется на одном из выходов Q0–Q9 после каждого следующего импульса. После 10-го импульса все разряды обнуляются (высокий уровень устанавливается на Q0), принудительное обнуление производится подачей высокого уровня на вход R (вывод 15).

Для получения счетчиков большей разрядности здесь специального входа переноса нет, а выход переноса $P_{\text{вых}}$ (вывод 12) соединяется с тактовым входом следующего счетчика С. Поэтому выход переноса здесь обозначен без значка инверсии (надстрочной черты) – рабочий перепад уровней у него другой, чем в предыдущем случае (из низкого в высокий).

В счетчике CD4017 (K561ИЕ8) никаких специальных функций (вроде предварительной записи) нет. Подобные счетчики удобно использовать как счетчики-делители частоты. Входная частота непосредственно делится на 10, если снимать выходной сигнал с вывода Q9 (вывод 11). При необходимости получить меньший коэффициент деления к счетчику добавляется схема, обнуляющая его при достижении высокого уровня на выходе Q с нужным номером. Не следует, как это часто рекомендуется, соединять вход обнуления R с выбранным выходом непосредственно – пока счетчик успеет обнулиться, на выходе удерживается высокий уровень, и этот короткий импульс может нарушить работу схемы.

Эксперимент 3. Счетчик с индикацией десятичного числа на семисегментном индикаторе

Схема этого эксперимента сложнее предыдущих и представлена на рис. 16.11. Сложность обусловлена тем, что для управления семисегментным индикатором нужен специальный дешифратор, существующий в

употребляемой нами КМОП-серии микросхем CD4000 с расширенным питанием (3–18 В) только в виде отдельной микросхемы CD4511.

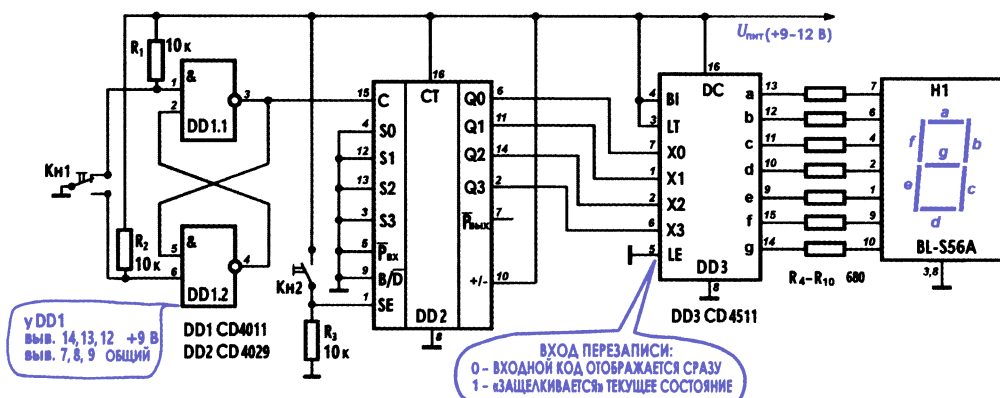


Рис. 16.11. Счетчик с индикацией десятичного числа на семисегментном индикаторе

Зато микросхема эта имеет одну важную для данного случая особенность: у нее имеется вывод «защелкивания» (перезаписи) LE. Микросхема CD4511 отображает двоичный код, установленный на входах X0–X3 (выводы 7, 1, 2, 6), в семисегментный код на выходах a–g только тогда, когда на выводе LE присутствует низкий (нулевой) уровень. При подаче высокого уровня на этот вывод код на выходах a–g «защелкивается» и не будет изменяться, пока на LE опять не окажется низкий уровень. В нашей схеме эта функция не используется, потому вывод LE подключен к низкому уровню. Но это потому, что у нас счет медленный и мы хотим видеть каждое состояние счетчика – в условиях реальных измерений, когда состояние счетчика меняется очень быстро, мельтешение цифр только мешает прочесть результаты, и обновление показаний производится по окончании очередного цикла счета подачей короткого отрицательного импульса на вывод LE.

Счетчик также применяется другой, чем в предыдущих случаях: CD4029 (отечественный аналог K561IE14). Он также реверсивный, как и в эксперименте 1, и также имеет вход и выход переноса для создания многоразрядных счетчиков. Кроме этого, CD4029 имеет вывод переключения режима счета двоичный/десятичный B/D (вывод 9). А вот специального вывода обнуления у него нет (просто выводов корпуса не хватило), потому обнуление производится через вывод предварительной загрузки SE (вывод 1), при этом, естественно, на входах загрузки S0–S3 должны быть все нули (см. схему рис. 16.11).

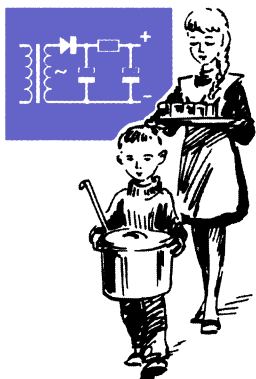
Семь сегментов индикатора типа BL-S56A образованы из длинных светодиодов и размещены в плоском корпусе так, чтобы образовать универсальную «заготовку» для изображения цифры из отрезков прямых. Это несколько напоминает шаблон для написания почтовых индексов, которые

размещают на конвертах Почты России. Только на конвертах сегментов в шаблоне девять, а не семь (наверное, потому, что они разрабатывались тогда, когда о семисегментных индикаторах еще не знали). С помощью семисегментного индикатора можно отобразить цифры от 0 до 9, знак «минус», некоторые буквы и даже значок градуса. Кроме того, в каждом таком индикаторе обязательно имеется восьмой сегмент в виде разделительной точки (мы его не используем).

Семисегментные индикаторы бывают с общим анодом (то есть с объединенным положительным выводом) и с общим катодом (отрицательным выводом) и выпускаются разных цветов от голубого до красного. В данном случае BL-S56A – с общим катодом, и для зажигания необходимо подавать ток на аноды сегментов через резисторы отдельно. Именно для этой цели и спроектирована микросхема CD4511 – при использовании индикаторов с общим анодом совместно с ней пришлось бы дополнительно подключать ключевые транзисторы или микросхему с инверторами.

Следует учесть, что индикаторы с большими цифрами (высотой дюйм и более) имеют в каждом сегменте не один светодиод, а два, включенных последовательно. Падение напряжения на них может составлять более 4 В. Потому при 5-вольтовом питании они практически не работают, а при напряжении питания 9–12 В в этом случае лучше снизить сопротивление резисторов R4–R10 до значения 430–470 Ом.

Нажимая на кнопку Кн1, вы можете наблюдать смену цифр на индикаторе. А кнопка Кн2 сбрасывает показания счетчика в нули во всех разрядах.



ГЛАВА 17

Питание на любой вкус

1. Для питания электронных схем требуются источники электрической энергии с постоянным напряжением. Практически ко всем электронным устройствам нужно подводить энергию от внешнего источника. Усилителям эта энергия необходима для создания мощной копии сигнала (гл. 9; 4), генераторам – для создания переменных токов (гл. 11; 6), телевизионной трубке – для высвечивания экрана, устройствам автоматики – для выполнения логических или вычислительных операций, для управления исполнительными механизмами.

В подавляющем большинстве случаев электронные схемы требуют, чтобы им передали только постоянную электрическую мощность, подвели постоянное напряжение и создали в цепи определенный постоянный ток. Именно постоянное напряжение необходимо для транзисторных и ламповых схем: попробуйте вылепить сложный сигнал из меняющегося коллекторного тока – тут не поймешь, какие изменения тока относятся к самому сигналу, а какие к питающему напряжению. Исключение составляют лишь нити накала некоторых ламп (гл. 10; 11): их задача – только нагреть катод, а для этого и переменный ток пригоден. Еще питаются переменным током некоторые типы двигателей и иных исполнительных механизмов, но это уже, как правило, к самим электронным схемам отношения не имеет.

Очень часто источник, поставляющий энергию для электронных устройств, каким-то способом выделяют на самой схеме, в ее описании и даже в размещении элементов, в монтаже. И называют этот источник блоком питания, или источником питания, или для краткости просто питанием. В некоторых случаях питание даже не рисуют на схеме – не важно, каким будет источник, лишь бы давал нужное постоянное напряжение и обеспечивал нужную мощность. На схеме при этом указывают, куда, к каким точкам нужно подвести напряжение и какое именно по величине, куда подать «плюс», а куда «минус». А там сами смотрите – какой хотите

источник, такой и применяйте, лишь бы удовлетворить запросы «потребителя».

2. Постоянное питающее напряжение можно получить от химических источников тока. С химическими источниками электрической энергии – гальваническими элементами и аккумуляторами – дело обстоит просто. Они по самой своей природе дают постоянное напряжение, и при использовании их для питания электронных схем нужно решить лишь две задачи – подобрать гальванические элементы (аккумуляторы) так, чтобы они давали нужное напряжение и нужный ток.

Это именно две задачи, а не одна. Один гальванический марганцево-цинковый элемент (гл. 3; 7, табл. 3.1) дает ЭДС примерно 1,6 В, и, полагая, что в самом элементе потеряется небольшая часть ЭДС, то есть что напряжение элемента в реальной схеме примерно равно 1,5 В¹, остается лишь соединить последовательно некоторое число элементов, чтобы получить нужное напряжение. Если нужно 4,5 В – три элемента, если нужно 9 В – шесть элементов и т. д. (рис. 3.8). Так появляется батарея из последовательных элементов, которая и дает нужное напряжение. Но это еще совсем не значит, что от батареи можно получить нужный ток.

Каждый источник тока, в том числе и гальванический элемент, имеет свое собственное внутреннее сопротивление $R_{\text{внут}}$, на котором теряется часть ЭДС (гл. 4; 9). И чем больше потребляемый ток, тем большая часть ЭДС теряется на этом сопротивлении, тем меньше напряжение на зажимах элемента. Для каждого типа аккумуляторов и гальванических элементов есть некоторый разумный предел, при котором напряжение еще не слишком уменьшается. Кроме того, если превысить этот предельный ток, гальванический элемент будет быстро разрушаться и выйдет из строя раньше своего срока (рис. 3.9).

Кстати, срок службы гальванического элемента, а значит, и батареи, собранной из таких элементов, измеряется не в привычных единицах времени, а в новых для нас единицах – ампер-часах (А-ч), которые, если разобраться, сводятся к единице электрического заряда, к кулону: 1 А-ч = 3600 Кл. Для элемента нельзя просто указать срок службы, этот срок зависит от того, как служит элемент, насколько энергично работает. В ампер-часах фактически показывают, какой суммарный заряд гальванический элемент способен направить в цепь за время своей жизни, и называется такая характеристика емкостью. Зная емкость элемента и потребляемый от него ток, легко подсчитать срок службы уже в часах. Так, например, если от элемента «373», емкость которого 3,2 А-ч, потреблять ток 32 мА, (0,032 А), то он проработает 100 часов, если потреблять 320 мА (0,32 А) – время не-

¹ В щелочных элементах начальное напряжение у свежей батарейки 1,6 В, которое быстро снижается до номинального напряжения 1,5 В. Под конец работы напряжение может снижаться до 1,0–1,1 В – это признак истощения батарейки.

прерывной работы будет 10 часов. Ну а если потреблять ток 1 А, то запасов элемента хватит всего на 3,2 часа².

Емкость батареи зависит от емкости ее отдельных элементов: при последовательном соединении общая емкость равна емкости одного элемента – количество зарядов, поставляемых в цепь, не увеличивается, возрастает только их энергия, возрастает напряжение. При параллельном соединении гальванических элементов или аккумуляторов тоже получается батарея, но ее напряжение такое же, как и у одного элемента. Зато если элементы соединить параллельно, емкость суммируется. Соединив параллельно три элемента по 1 А-ч каждый, получим общую емкость 3 А-ч³. Упрощенно это можно объяснить так: сначала один из параллельно соединенных элементов отдает в цепь свои запасы зарядов, потом – другой, затем – третий.

По величине емкости можно приблизительно определить допустимый потребляемый (часто говорят «разрядный») ток; для марганцево-цинковых элементов он составляет примерно 3–5 % от емкости. Так, например, от того же элемента «373» не стоит потреблять ток более чем 100–150 мА (0,1–0,15 А)⁴. Для плоской батарейки карманного фонаря, стаканчиковые элементы которой имеют емкость около 1 А-ч, желательно, чтобы потребляемый ток не превышал 30–50 мА (0,03–0,05 А). Конечно, можно разряжать батарейку большим током, как делают, например, в карманных фонарях, но при этом и напряжение будет намного меньше, чем ЭДС, и емкость окажется меньше, чем это было бы при разряде небольшим током (рис. 3.9). Плоская батарейка из трех элементов в карманном фонарике, где лампочка потребляет 280 мА, дает напряжение 3,3–3,7 В, и ее реальная емкость уменьшается на 15–20 %⁵.

3. Блок сетевого питания⁶: силовой трансформатор, выпрямитель, фильтр. Можно получить постоянное напряжение, необходимое для питания электронных схем, и от электросети. Для этого нужно произвести три операции. Во-первых, нужно понизить сетевое напряжение или повысить его в зависимости от того, какое постоянное напряжение нужно получить. Во-вторых, необходимо преобразовать переменное напряжение

² У щелочного элемента типа D (373) номинальная емкость намного больше: около 15–18 А-ч (см. табл. 3.1), величина 3,2 А-ч характерна для солевых батареек типа 373 производства 1960-х годов. Соответственно, рассчитанное время работы увеличится в пять раз. Однако не следует забывать про снижение емкости с увеличением разрядного тока (см. рис. 3.9 и текст далее).

³ Параллельно гальванические элементы стараются не соединять: при малейшей разнице (разные партии, разный срок хранения, просто технологические отклонения в производстве) элементы начнут работать друг на друга, и емкость существенно снизится в сравнении с расчетной.

⁴ Соответственно, для щелочной батарейки типа D предпочтительный ток будет составлять 0,75–0,9 А.

⁵ При увеличении разрядного тока в 5 раз, от 0,2 до 1 А, емкость элемента типа D (373) снижается примерно в полтора-два раза, в зависимости от изготовителя.

⁶ Блоки сетевого питания официально называются источниками вторичного электропитания (ИВЭП), или, сокращенно, просто источниками питания.

так, чтобы в его спектре появилась постоянная составляющая, и, в-третьих, нужно с помощью фильтров отвести в сторону все переменные составляющие, оставить постоянную составляющую в чистом виде (рис. 17.1; 1).

Рассмотрим эти три операции чуть подробнее.

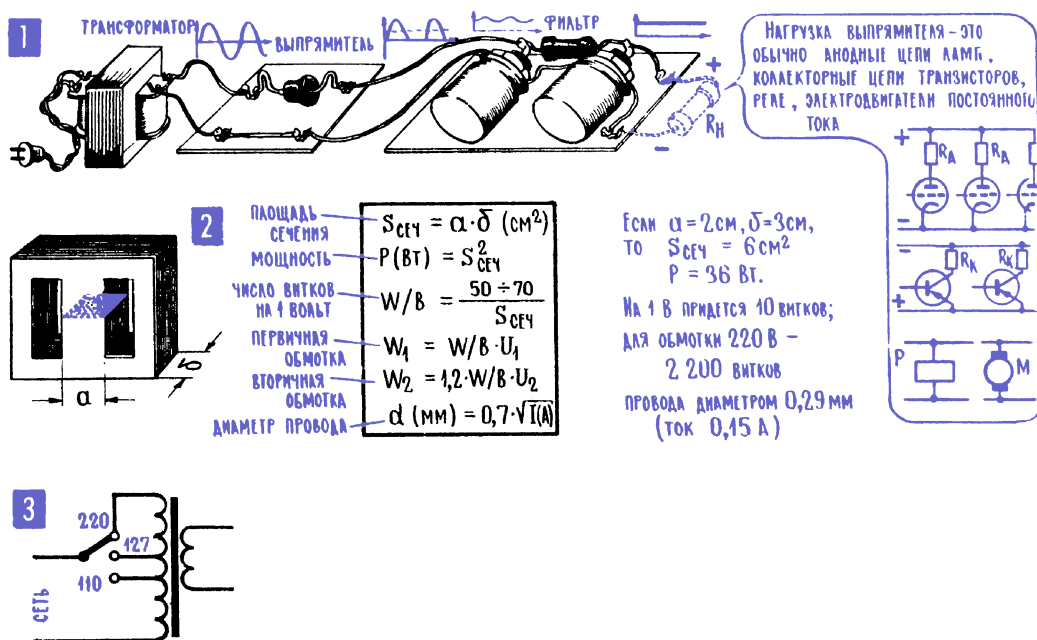


Рис. 17.1. Простой блок сетевого питания

4. Простейший расчет силового трансформатора позволяет найти сечение сердечника, число витков в обмотках и диаметр провода. Переменное напряжение в сети бывает 220 В, реже 127 В и совсем редко 110 В. Для транзисторных схем нужно постоянное напряжение 10–15 В, в некоторых случаях, например для мощных выходных каскадов усилителей НЧ, 25–50 В⁷. Для питания анодных и экранных цепей электронных ламп чаще всего используют постоянное напряжение 150–300 В, для питания накальных цепей переменное напряжение 6 В (точнее, 6,3 В, именно столько дают три соединенные последовательно банки кислотных автомобильных аккумуляторов, и лампы, рассчитанные на 6,3 В, можно питать от них). Все напряжения, необходимые для какого-либо устройства, получают от одного трансформатора, который называют силовым.

Примечание редактора. В современных условиях напряжение в бытовой сети в России встречается только 220 В (по последним стандартам, подогнанным под европейские, – 230 В), 50 Гц. При этом надо учитывать, что реальное напряжение, особенно в загородном доме, может опускаться и менее 200 В, поэтому обмотки

⁷ Для питания конструкций на микросхемах обычно нужно также напряжение 5 В или, реже, 3,3 В.

трансформатора (см. далее) нужно рассчитывать с запасом в 10–15 %. Напряжение 110–120 В, 60 Гц – стандарт в Америке и Японии. На борту авиалайнеров, на некоторых судах, а также иногда в гостиницах можно встретить розетки с напряжением обоих стандартов, при этом перепутать их невозможно из-за разной конструкции.

Силовой трансформатор собран на разборном стальном сердечнике из изолированных друг от друга тонких Ш-образных, реже П-образных пластин (рис. 6.20). Его размеры, а точнее площадь сечения средней части сердечника, выбираются с учетом общей мощности, которую трансформатор должен передать из сети всем своим потребителям. Упрощенный расчет устанавливает такую зависимость: сечение сердечника S см², возведенное в квадрат, дает общую мощность трансформатора в ваттах. Например, трансформатор с сердечником, имеющим стороны 3 см и 2 см (пластины типа Ш-20, толщина набора 30 мм), то есть с площадью сечения сердечника 6 см², может потреблять от сети и «перерабатывать» мощность 36 Вт. Это грубый, упрощенный расчет, но он дает вполне приемлемые результаты (рис. 17.1; 2).

И наоборот, если для питания электрического устройства нужна мощность 36 Вт, то, извлекая квадратный корень из 36, узнаем, что сердечник силового трансформатора должен иметь сечение 6 см². Например, должен быть собран из пластин Ш-20 при толщине набора 30 мм, или из пластин Ш-30 при толщине набора 20 мм, или из пластин Ш-24 при толщине набора 25 мм и т. д. Сечение сердечника нужно согласовать с мощностью, для того чтобы сталь сердечника не попадала в область магнитного насыщения. А отсюда вывод: сечение всегда можно брать с избытком, скажем, вместо 6 см² взять сердечник сечением 8 см² или 10 см². Хуже от этого не будет. А вот взять сердечник с сечением меньше расчетного уже нельзя – сердечник попадет в область насыщения, индуктивность его обмоток уменьшится, упадет их индуктивное сопротивление, увеличатся токи, трансформатор перегреется и выйдет из строя.

В силовом трансформаторе несколько обмоток. Во-первых, две сетевые для включения в сеть с напряжением 220 В и 127 В. Правда, отдельных обмоток для каждого напряжения не делают. В обмотке для напряжения 220 В витков больше, чем в обмотке для 127 В, и обмотки переключают таким образом, что при напряжении сети 220 В к обмотке 127 В просто добавляют некоторое количество витков (рис. 17.1; 3)⁸.

Кроме сетевых обмоток, в сетевом трансформаторе может быть сколько угодно вторичных, каждая на свое напряжение. В трансформаторе для питания ламповых схем обычно две обмотки – накальная на 6,3 В и повышающая для анодного выпрямителя. В трансформаторе для питания транзисторных схем чаще всего одна обмотка, которая питает один выпрямитель. Если на какой-либо транзистор нужно подать пониженное

⁸ В современных блоках питания отвод на напряжение 127 В предусматривать не требуется.

напряжение, то его получают от того же выпрямителя с помощью гасящего резистора или делителя напряжений.

Необходимое соотношение числа витков первичных и вторичных обмоток подсчитать нетрудно: во сколько раз одно напряжение должно быть больше или меньше другого, во столько же раз и число витков должно быть больше или меньше (гл. 6; 25). Но отсюда вовсе не следует, что само число витков в обмотках может быть произвольным. Число витков в обмотках определяется по важной характеристике трансформатора, которая называется «число витков на вольт», и зависит от сечения сердечника, его материала, от сорта стали. Для распространенных типов стали можно найти «число витков на вольт», разделив 55–70 на сечение сердечника в квадратных сантиметрах. Так, если из нашего примера взять сердечник с сечением 6 см^2 , то для него получится «число витков на вольт» примерно 10. Это значит, что обмотки будут иметь такие данные: на 110 В – 1100 витков; на 127 В – 1270 витков; на 220 В – 2200 витков. Если понадобится вторичная обмотка на 25 В, то в ней будет 250 витков.

Теперь остается выбрать намоточный провод. Для трансформаторов используют медный провод с тонкой эмалевой изоляцией (под названием ПЭВ или ПЭВ-2), причем обычно один тип такого провода можно заменять другим. Диаметр провода выбирается из соображений малых потерь энергии в самом трансформаторе и хорошего отвода тепла. Если взять слишком тонкий провод, то он, во-первых, будет обладать большим сопротивлением и отбирать значительную часть энергии, которую трансформатор должен передать своим потребителям.

Ну а во-вторых, тонкий провод из-за малой поверхности охлаждения будет плохо отдавать тепло в окружающую среду, а это может привести к перегреву трансформатора. За перегревом последует разрушение изолирующего покрытия провода, и в итоге короткое междувитковое замыкание. А это явление чрезвычайно опасное – два соседних проводника, соединившись, создают так называемый короткозамкнутый виток (или группу витков), который, по сути дела, представляет собой самостоятельную обмотку трансформатора, замкнутую накоротко. Сопротивление короткозамкнутого витка очень мало, ток в нем создается огромный, трансформатор раскаляется, как утюг, начинает дымиться и, конечно, быстро выходит из строя.

Диаметр провода выбирают из расчета 2–2,5 А на каждый квадратный миллиметр сечения провода. А что делать, если вдруг окажется, что обмотка в окне выбранного сердечника не уместится? Диаметр провода уменьшать нельзя, число витков тоже; остается собирать сердечник из пластин с большим окном. При этом увеличится сечение сердечника, а значит, меньше станет «число витков на вольт» и вместе с ним общее число витков – придется все пересчитать.

Примечание редактора. Более точная формула для диаметра провода $d = 0,8 \cdot \sqrt{I_i}$, где I_i – ток в обмотке i в амперах. Величина тока рассчитывается, исходя из заданной мощности и напряжения в данной обмотке i (P_i / U_i). Если сечение магнитопровода выбрано верно (суммарная мощность всех обмоток не превышает мощности трансформатора), то, как правило, рассчитанная таким образом обмотка автоматически уместается в окне выбранного магнитопровода, даже с учетом запаса в 10–15 %.

При изготовлении силового трансформатора нужно проявить все свое терпение и аккуратность. Провод укладывают ровными слоями виток к витку, между слоями кладут тонкую бумагу, особое внимание обращают на то, чтобы с краев один слой не проваливался на другой. Конечно, в наше время силовые трансформаторы изготавливать самому приходится редко, в продаже бывают трансформаторы самых разных типов. Но даже с учетом этого приведенные простейшие расчетные соотношения и справочные данные могут быть полезны для того, чтобы выбрать трансформатор, проверить, подходит ли он для данного блока питания. Кроме того, иногда приходится переделывать трансформаторы, например трансформатор от лампового приемника приспособлять для питания транзисторных схем. В этом случае, убедившись, что трансформатор подходит по мощности, по диаметру провода первичной (сетевой) обмотки, можно эту обмотку оставить нетронутой и только намотать новую вторичную обмотку, предварительно рассчитав ее. Все эти работы, еще раз повторяем, нужно делать очень аккуратно.

Примечание редактора. Пересчитать любой сетевой трансформатор на новую обмотку очень просто. Для этого, не разбирая трансформатор, нужно поверх имеющихся намотать несколько витков любого провода, включить трансформатор в сеть и измерить переменное напряжение на этой временной обмотке. Поделив число намотанных витков на полученную величину, получаем число витков на вольт для данного трансформатора, которое одинаково для всех обмоток (можно даже подсчитать число витков в первичной, сетевой обмотке, если надо). После этого останется только умножить полученную величину на необходимое напряжение.

5. Выпрямленное напряжение и основная частота пульсаций зависят от того, какая выбрана схема выпрямителя – однополупериодная или двухполупериодная (мостовая). При всех расчетах трансформаторов возникает вопрос: на какое напряжение должна быть рассчитана вторичная обмотка? Напряжение, которое указано для сети, – это эффективное напряжение, амплитуда в сети 220 В достигает 310 В, в сети 127 В – амплитуда 180 В (гл. 6; 7).

И при расчете вторичных обмоток тоже исходят из эффективного напряжения на них, понимая, что амплитуда будет на 40 % выше. А вот если напряжение со вторичной обмотки подать на выпрямитель, то чему будет рав-

но выпрямленное, постоянное напряжение? Амплитуде переменного? Его эффективному значению? Или, может быть, какой-либо иной величине?

Поставим вопрос иначе: если задано выпрямленное напряжение, то как его получить, какое для этого нужно иметь переменное напряжение? Оказывается, что это зависит от выбора схемы выпрямителя и от элементов фильтра.

Простейшая схема выпрямления – однополупериодная, уже знакомая нам по детекторным каскадам приемника. Но только там мы выделяли одну из переменных составляющих (низкочастотную), а постоянную отбрасывали, не пускали к усилителю НЧ. А в выпрямителе нам нужна именно постоянная составляющая пульсирующего тока (рис. 17.1; 1), и только ее нужно подвести к нагрузке. Однополупериодный выпрямитель работает через такт, использует энергию только одного полупериода переменного напряжения. При этом частота импульсов такая же, как и частота сетевого напряжения, то есть 50 Гц, а постоянная составляющая в спектре пульсирующего тока составляет примерно 32 % от амплитуды импульса (рис. 17.2; 1).

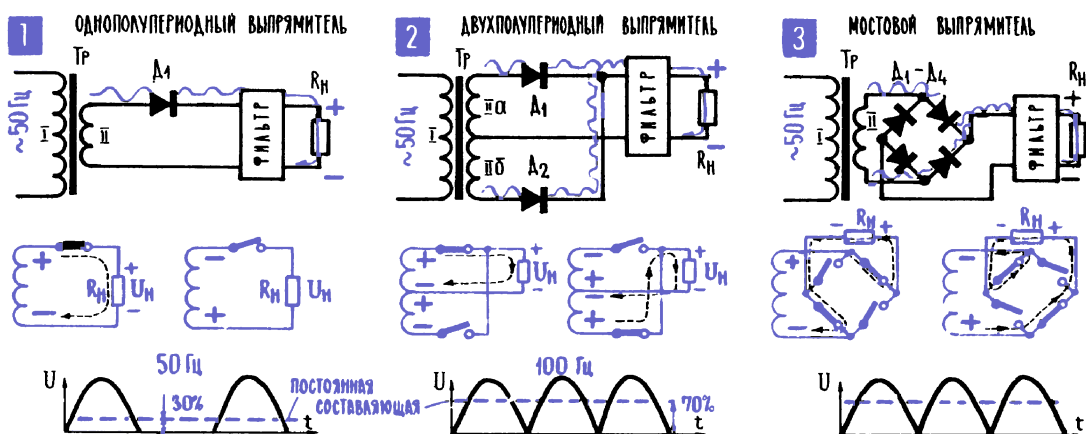


Рис. 17.2. Различные схемы выпрямления переменного тока

Если взять два однополупериодных выпрямителя, включить в них диоды таким образом, чтобы они пропускали ток поочередно, и затем выпрямленный ток от каждого из них направить в общую нагрузку, то получится двухполупериодный выпрямитель (рис. 17.2; 2). Благодаря такому остроумному схемному фокусу ток по нагрузке будет протекать без пауз, частота пульсаций станет в два раза выше и составит уже 100 Гц, а постоянная составляющая увеличится до 64 % от амплитуды. Все это, конечно, достоинства: в двухполупериодной схеме заданное постоянное напряжение можно получить при меньшем переменном, а пульсации с более высокой частотой легче сгладить конденсатором, фильтрам легче отводить от нагрузки переменную составляющую. Ну, а плата за эти достоинства –

усложнение схемы: теперь в ней, по сути дела, два выпрямителя вместо одного.

Существуют две разновидности двухполупериодных схем. Для одной нужно иметь два вентиля, например два полупроводниковых диода, и две отдельные вторичные обмотки в силовом трансформаторе. Обычно их, правда, выполняют в виде одной обмотки с отводом от средней точки, и при этом автоматически получается нужная полярность напряжения, подводимого к диодам: когда на конце одной обмотки (или, точнее, одной секции) «плюс» относительно средней точки, на конце другой – «минус» и когда один диод пропускает ток, второй не пропускает. Во время следующего полупериода полярность напряжения на вторичной обмотке меняется: меняются местами «плюс» и «минус», и тот диод, который пропускал ток, оказывается закрытым, а тот, что не пропускал, – открытым (рис. 17.2; 2). Каждая половинка вторичной обмотки трансформатора для такой схемы должна давать расчетное напряжение, необходимое для выпрямителя, а вся обмотка – удвоенное напряжение.

В мостовой схеме (рис. 17.2; 3) двухполупериодное выпрямление получается без двух отдельных переменных напряжений, для мостовой схемы достаточно иметь одну вторичную обмотку. Но за это приходится платить двумя дополнительными диодами – в мостовой схеме их 4, а не 2. Если разобраться в начертании мостовой схемы, то окажется, что в ней просто найден такой способ включения диодов, при котором ток через нагрузку при любой полярности напряжения на вторичной обмотке идет в одну и ту же сторону. В выпрямителях блока питания используют мощные выпрямительные диоды (гл. 9; 13), хотя при небольших токах вполне могут подойти и маломощные импульсные. Диоды подбирают по величине постоянного тока, который должен давать выпрямитель, и по обратному напряжению (табл. 9.1), которое для страховки всегда считают равным удвоенной амплитуде переменного напряжения на вторичной обмотке. Это, однако, еще не означает, что выпрямленное напряжение действительно получается равным амплитуде переменного напряжения.

Примечание редактора. Удвоенная амплитуда – чересчур жесткое требование, на практике достаточно величины предельно допустимого напряжения диодов, примерно на четверть-треть большей, чем амплитуда переменного напряжения. Например, номинальное напряжение бытовой сети в России $230\text{ В} \pm 10\%$, максимальному действующему напряжению $230 + 10\% = 253\text{ В}$ соответствует 357 В амплитудного значения. Запаса в 100 В (около 30% от номинального значения) достаточно, итого получаем минимально необходимое допустимое обратное напряжение диодов для сетевого выпрямителя около 450 В . Тут еще дело в том, что от вполне возможных в бытовой сети кратковременных пиков напряжения, превышающих 1000 В и более (что случается не так уж редко – например, при ударе молнии вблизи сетевой уличной проводки), подбором диодов все равно защититься невозможно – не ставить же в каждый бытовой прибор выпрямительные столбы, рассчитанные на ки-

ловольты, правда? Но дело облегчается тем, что кратковременные перенапряжения для выпрямительных диодов не опасны: они вызывают обратимый пробой, после которого диод быстро восстанавливается (точно так же неопасны кратковременные перегрузки по току). А всплеск выпрямленного напряжения, возникающий как следствие подобных явлений, гасится сглаживающими фильтрами, причем в современных импульсных источниках питания (см. далее) такие всплески в принципе не могут попасть на выход.

Получить выпрямленное напряжение после фильтра, равное амплитуде переменного, невозможно прежде всего потому, что даже в отсутствие нагрузки (холостой ход выпрямителя) через электролитические конденсаторы большой емкости, установленные в фильтре, протекает ток утечки. Этот ток, подобно току нагрузки, создает падение напряжения на диодах (см. рис. 9.5). Надо учитывать также, что в мостовой схеме падение напряжения на диодах вдвое больше, чем в двухполупериодной по варианту рис. 17.2; 2: при номинальном токе для выпрямительных диодов оно в сумме составляет не менее 2 В. При малых выпрямленных напряжениях это чувствительные потери, которые резко снижают КПД всей системы. В современных качественных системах вторичного электропитания, особенно достаточно мощных, от выпрямительных диодов постепенно отказываются в пользу полевых транзисторов (MOSFET) в качестве ключей, открываемых и запираемых в нужные моменты времени, в которых потери гораздо меньше.

6. Фильтр выпрямителя сглаживает пульсации и, кроме того, влияет на величину выпрямленного напряжения. Чтобы отвести от нагрузки переменную составляющую, сгладить пульсации напряжения, которое подводится к нагрузке, после диодов включают фильтр, обычно из одного конденсатора (рис. 17.3; 1, 3), реже из конденсаторов и дросселя (рис. 17.3; 2). Резистор R_{ϕ} на рис. 17.1; 3 представляет выходное сопротивление выпрямителя; вместе с C_{ϕ} он образует RC-фильтр. Элементы фильтра выбираются исходя из известных соотношений: чем больше емкость конденсаторов C_{ϕ} , тем лучше, тем большая часть переменных составляющих замыкает через них и меньшая часть идет в нагрузку. Чем больше выходное сопротивление выпрямителя R_{ϕ} , тем труднее переменным составляющим пробраться в нагрузку, но тем большая часть постоянного напряжения на нем теряется. Поэтому в фильтрах ставят электролитические конденсаторы большой емкости⁹.

Здесь, наверное, уместно напомнить, что нагрузка выпрямителя $R_{\text{н}}$ – это вся электронная схема, которую он питает, например коллекторные цепи всех транзисторов или анодные цепи всех ламп. То есть нагрузка $R_{\text{н}}$ – это

⁹ Рядовые электролитические конденсаторы обладают плохими частотными свойствами – чем выше частота, тем меньше их емкость. А короткие всплески напряжения (которые всегда возникают в сети, например из-за включения-отключения мощных потребителей неподалеку) – это как раз и означает появление в спектре сетевого напряжения высокочастотной составляющей. Поэтому для более качественной фильтрации в хороших источниках питания параллельно электролитическим конденсаторам всегда ставят керамические небольшой емкости 0,1–1 мкФ. Часто такие конденсаторы ставят не в самом источнике, а вблизи нагрузки – это следует делать всегда, даже при самом качественном источнике питания.

не резистор, а некий условный элемент, само его сопротивление зависит от тока, который потребляется от выпрямителя: чем больше этот ток, тем сопротивление нагрузки меньше, тем, как принято говорить, сильнее нагружен выпрямитель.

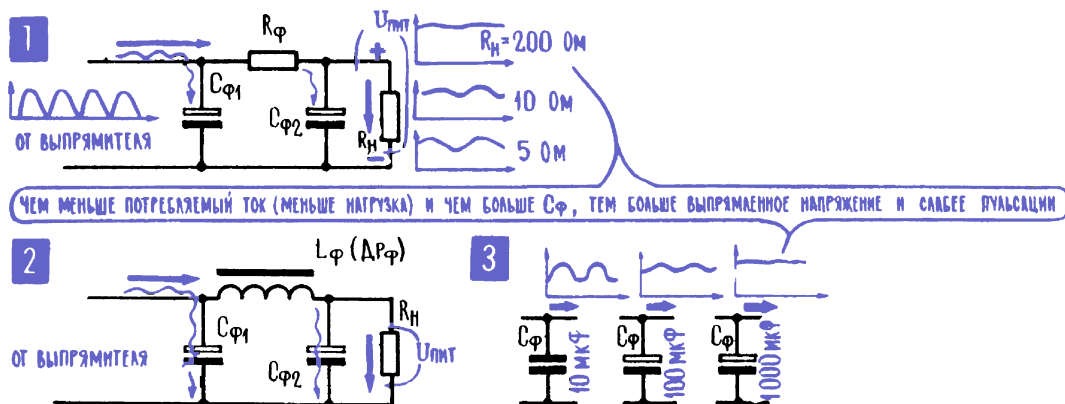


Рис. 17.3. Сглаживание пульсаций выпрямленного напряжения

Нет смысла весь выпрямленный ток фильтровать с одинаковой тщательностью. В качестве примера потребителя, для которого требования к сглаживанию пульсаций можно снизить, можно привести мощный усилитель НЧ – коллекторную цепь его выходного каскада может питать напряжение с пульсациями 1–2 % (от уровня постоянного напряжения), а на предварительные каскады нужно подавать напряжение, у которого пульсации не превышают 0,01–0,05 %. Это легко объясняется: пульсации, попавшие в первые каскады, в дальнейшем усиливаются. В этих случаях устанавливают дополнительные сглаживающие конденсаторы, в особо ответственных случаях отделяя их от основного фильтра дросселем (рис. 17.3; 2). Кстати, плохая фильтрация питающего напряжения в усилителях НЧ проявляется в виде фона с частотой 50 или 100 Гц в зависимости от схемы выпрямителя.

Примечание редактора. Следует отметить, что никакое, сколь угодно большее увеличение емкости конденсатора в схеме по рис. 17.3; 1 не позволяет убрать пульсации выходного напряжения выпрямителя полностью. Нередко при высоких требованиях к качеству питания последовательно с нагрузкой в основном фильтре ставят дроссели (как на рис. 17.3; 2). Это позволяет снизить емкость (и, следовательно, габариты) конденсатора при сохранении приемлемого уровня пульсаций. Однако по-настоящему хорошее сглаживание пульсаций достигается только в схемах стабилизаторов с активными элементами с обратной связью (транзисторами со стабилизаторами, как описано далее в разделе 8, или интегральными стабилизаторами).

Конденсаторы фильтра не только сглаживают пульсации, они влияют еще и на величину выпрямленного напряжения $U_{пит}$, подводимого к

нагрузке. Импульсы тока через диод выпрямителя заряжают конденсатор C_ϕ , и потом он постепенно разряжается через нагрузку R_H . Чем больше емкость конденсатора, тем медленнее он разряжается и тем больше среднее напряжение на нем (рис. 17.3; 3). Чем меньше сопротивление R_H , тем быстрее разряжается конденсатор, тем меньше выпрямленное напряжение и выше уровень пульсаций. Отсюда практический вывод: чем меньше сопротивление нагрузки R_H , то есть чем больше потребляемый от выпрямителя ток, тем больше должна быть емкость конденсатора фильтра C_ϕ . И еще: выпрямленное напряжение определяется не только подводимым к выпрямителю переменным напряжением, но также потребляемым током и емкостью конденсатора фильтра C_ϕ : чем меньше этот ток и чем больше C_ϕ , тем больше выпрямленное напряжение (рис. 17.3; 3).

В приближенных расчетах можно считать, что выпрямленное напряжение получится таким, как эффективное значение напряжения на вторичной обмотке¹⁰. Конденсаторы фильтра, однако, во всех случаях нужно рассчитывать на амплитуду напряжения – в какой-то момент выпрямитель может остаться без нагрузки, конденсаторы разряжаться не будут, и напряжение на них поднимется до уровня амплитуды. При этом в такие моменты к нему будет добавляться сама амплитуда переменного напряжения, и общее напряжение как раз и станет равным удвоенной амплитуде; на нее должны быть рассчитаны диоды.

7. Кремниевый стабилитрон, особенно в сочетании с транзисторами, позволяет создавать стабилизаторы напряжения. Включение транзистора в качестве элемента фильтра позволяет воспользоваться эффективными системами стабилизации напряжения. Стабилизатор напряжения, как об этом говорит само название, поддерживает неизменным выпрямленное напряжение, если по каким-то причинам изменится напряжение на его входе (это может произойти из-за изменений напряжения в сети или если изменится режим самой нагрузки, например увеличится или уменьшится потребляемый ток).

Основа большинства стабилизирующих схем – особый кремниевый диод, стабилитрон (рис. 17.4; 1), который сам по себе предназначен для стабилизации напряжения. Особенность его состоит в том, что в определенном режиме при обратном включении сопротивление этого диода сильно меняется при изменении пропускаемого им тока (такая характеристика у стабилитрона получается за счет определенных свойств самого полупроводникового материала), и в итоге напряжение на диоде остается неизменным. Если собрать делитель с кремниевым стабилитроном (рис. 17.4; 2) и менять подводимое к этому делителю напряжение, то сопротивление дио-

¹⁰ Для простейших схем по типу рис. 17.3; 1 выпрямленное напряжение на выходе можно полагать равным амплитудному значению минус примерно 3–4 В, в зависимости от тока. Поэтому для выпрямителей на напряжение 9–10 В это утверждение будет справедливым, для меньших напряжений потери будут выше, а для более высоких – ниже.

да будет меняться, и напряжение, снимаемое с диода, окажется стабилизированным.

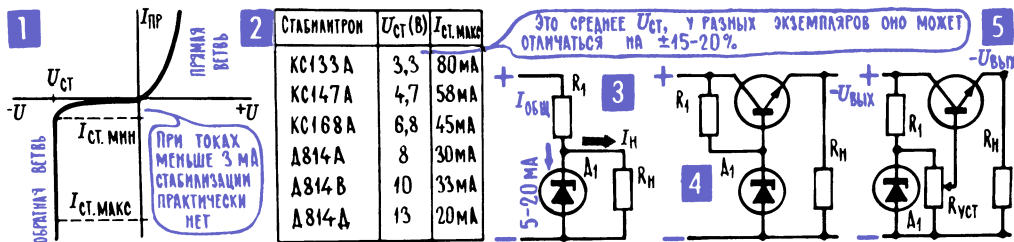


Рис. 17.4. Стабилизаторы напряжения

Используя стабилитрон в качестве источника опорного постоянного напряжения, можно создать электронную схему, которая будет управлять работой транзисторного фильтра и менять его режим таким образом, чтобы напряжение на выходе во всех случаях оставалось неизменным. Это настоящий электронный автомат со следящей системой (гл. 15; 5) – он следит за изменением подводимого напряжения. И с памятью в виде стабилитрона: на нем записано опорное напряжение, по которому нужно равняться (рис. 17.4; 4). Некоторые варианты стабилизированного выпрямителя, например схема, показанная на рис. 17.4; 5, позволяют в широких пределах регулировать выпрямленное напряжение $U_{вых}$. Изменяя с помощью $R_{уст}$ «минус» на базе, мы меняем опорное напряжение и в итоге выпрямленное напряжение $U_{вых}$, которое достается нагрузке.

Примечание редактора. Обращаю внимание читателя на то, что схемы рис. 17.4; 4, 5 представляют собой не что иное, как эмиттерный повторитель (см. гл. 12; 8). У него высокое входное сопротивление (поэтому он почти не шунтирует стабилитрон, не выводя его из режима стабилизации) и низкое выходное (поэтому $U_{вых}$ мало зависит от изменений тока нагрузки). У такой схемы, однако, есть недостатки, так как наклон обратной характеристики стабилитрона (обратная ветвь на рис. 17.4; 1) хоть и велик, но не представляет чистый перпендикуляр к оси напряжений (другими словами, величина $\Delta U_{ст} / \Delta I_{ст}$, называемая дифференциальным сопротивлением, у стабилитронов не равна нулю, а представляет собой довольно большую величину порядка десятков ом). Поэтому колебания входного напряжения и из-за пульсаций, и из-за изменения тока потребления хоть и малы, но все-таки сказываются на напряжении стабилитрона и без изменений передаются в нагрузку.

Для снижения этого эффекта и стабилитрон, и выход схемы обязательно шунтируют электролитическими конденсаторами (на рис. 17.4; 4, 5 не показаны), часто вдобавок к ним устанавливают керамические малой емкости для лучшего снижения высокочастотных помех, как указано выше. Но все-таки коэффициент стабилизации такой схемы недостаточен для получения качественного питания.

В дополнение к теме подобных стабилизаторов (они еще называются линейными) следует добавить, что разница между входным напряжением $U_{вх}$ (которое

определяется параметрами выпрямителя) и выходным $U_{\text{вых}}$ (которое определяется параметрами стабилизатора) выделяется в виде тепла на транзисторе. Тепловая мощность в ваттах определяется током нагрузки $I_{\text{нагр}}$ и подсчитывается по простой формуле $(U_{\text{вх}} - U_{\text{вых}}) \cdot I_{\text{нагр}}$. При большой разнице по напряжению между входом и выходом и существенной нагрузке количество тепла может быть велико настолько, что транзистор придется ставить на большой теплоотвод, и лишь малая часть энергии пойдет в нагрузку – будете зазря отапливать окружающую среду. Но и слишком малая разница тоже неприемлема, так как при снижении тока через стабилизатор ниже уровня его стабилизации никакой стабилизации уже не будет (рис. 17.4; 1). Поэтому при нестабильной нагрузке и «гуляющем» входном напряжении всей схемы расчет и самого линейного стабилизатора, и входного выпрямителя для него – довольно тонкая задача балансировки между двумя крайностями.

Дальнейшее увеличение качества стабилизации в линейных стабилизаторах получают за счет введения отрицательной обратной связи с выхода на вход; в качестве регулирующего элемента при этом обычно выступает операционный усилитель (см. гл. 12; 11), так как усиления одиночного транзистора оказывается недостаточно. Именно по подобным схемам устроены интегральные стабилизаторы вроде известного 7805 и подобных. Подробнее см. далее *Дополнение* (раздел 10), а также *Практикум* в конце этой главы.

8. Цепочки конденсаторов и диодов позволяют увеличивать выпрямленное напряжение. Понизить выпрямленное напряжение всегда просто: для этого достаточно ввести дополнительный гасящий резистор или делитель напряжения¹¹. А вот для того, чтобы получить выпрямленное напряжение побольше, нужно переделать или заменить силовой трансформатор, увеличить напряжение на его вторичной обмотке, которое подводится к выпрямителю. Есть, правда, и другой путь – умножение напряжения, но пользуются им сравнительно редко.

Самый простой из умножителей – это удвоитель напряжения (рис. 17.5; 1), он увеличивает напряжение вдвое. Происходит это за счет того, что в течение одного полупериода выпрямитель через диод D_1 заряжает до амплитуды переменного напряжения конденсатор C_1 , а в течение второго полупериода заряжает через диод D_2 конденсатор C_2 . Оба конденсатора включены последовательно по отношению к нагрузке, и поэтому напряжение на нагрузке (это, конечно, уже выпрямленное напряжение) равно сумме напряжений на C_1 и C_2 . То есть равно удвоенному переменному напряжению, которое подводилось к выпрямителю. Из нескольких цепочек конденсатор–диод можно собрать утроитель напряжения, учетверитель и т. д. Схемы умножения, как уже говорилось, применяются редко; как правило, проще изменить данные вторичной обмотки силового трансформатора, увеличить напряжение на ней и использовать привычную схему выпрямителя без умножения.

¹¹ Или в схеме со стабилизацией (рис. 17.4; 4) взять стабилизатор с номиналом поменьше.

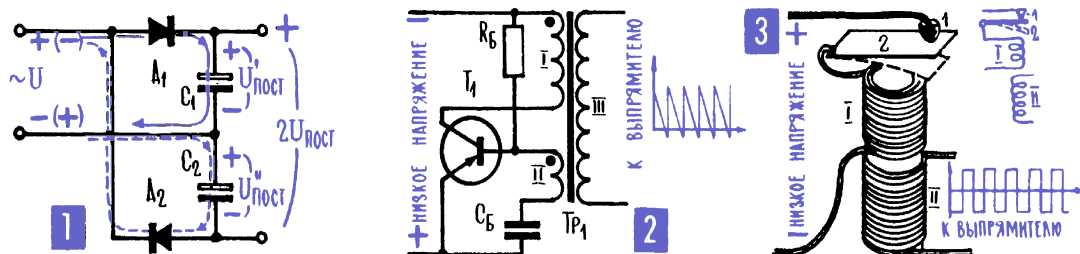


Рис. 17.5. Умножение напряжения

9. Чтобы увеличить постоянное напряжение, можно превратить его в переменное, повысить с помощью трансформатора и выпрямить. Если источник питания дает переменное напряжение, как, например, электросеть, то изменить это напряжение, повысить его или понизить, можно с помощью трансформатора. Но если питание осуществляется от источника постоянного напряжения, например от аккумулятора или гальванического элемента, то напряжение можно только уменьшить, так как постоянное напряжение не трансформируется (вспомните: переменное напряжение во вторичной обмотке трансформатора наводится только при изменении тока в первичной – гл. 5; 10, 14), и поэтому повысить его никак нельзя. А бывает, что повысить постоянное напряжение нужно обязательно. Например, при питании лампового приемника или передатчика от автомобильного аккумулятора – он дает напряжение 12 В, а на аноды ламп нужно подать 150–200 В.

В электротехнике когда-то эту задачу решали с помощью машинных преобразователей – умформеров, где в одной машине объединен электродвигатель с электрогенератором. Двигатель приводится в движение низким напряжением, он вращает ротор генератора, который уже дает высокое напряжение.

А вот другой путь: можно постоянное напряжение превратить в переменное, например периодически разрывая цепь, а затем уже это переменное напряжение повысить с помощью трансформатора. В дотранзисторную эпоху такая операция осуществлялась с помощью вибропреобразователей (рис. 17.5; 3). Как только в обмотке I появляется ток, якорь притягивается, контакты 1, 2 разрываются, и ток прекращается. Тогда якорь возвращается на место, контакты 1, 2 замыкаются, и весь процесс начинается сначала¹².

С появлением транзисторов открылась возможность строить более надежные преобразователи, без непрерывно движущихся и часто подгорающих контактов. Транзисторный преобразователь напряжения – это, по

¹² Работу вибропреобразователя легко смоделировать на любом электромагнитном реле, имеющем нормально замкнутые контакты: просто подключить обмотку через эти контакты. Частота переключения зависит от массы якоря и упругости пружины, прижимающей контакты друг к другу. Точно так же устроен классический электрический звонок, работающий от постоянного тока.

сути дела, генератор, например двухтактный мультивибратор или блокинг-генератор (рис. 17.5; 2). Повышенное напряжение снимают с отдельной обмотки трансформатора и затем подают на обычный выпрямитель. Частоту переменного напряжения делают сравнительно высокой (килогерцы и десятки килогерц), при этом уменьшаются габариты трансформатора. Соображения по выбору сердечника, приведенные в гл. 17; 4, относятся к частоте переменного тока 50 Гц; с увеличением частоты сердечник может иметь меньшее сечение, и число витков на вольт тоже будет меньше.

10. Дополнение от редактора: современные стабилизаторы напряжения. Уже в 1970–1980-е годы были широко распространены интегральные стабилизаторы напряжения. По функциональности они повторяли схему со стабилитроном, показанную на рис. 17.4; 4, но имели несравненно более высокий коэффициент стабилизации, быстродействие, необходимое для отработки быстрых перепадов тока потребления, и температурную стабильность. Подобные стабилизаторы (называемые линейными) выпускались на ряд фиксированных напряжений (обычно 3,3, 5, 9, 12 и 15 В), а также регулируемые в определенном диапазоне с помощью внешнего переменного резистора, как на рис. 17.4; 5. Одним из самых первых таких стабилизаторов и самым известным стала микросхема под общим названием LM78xx, где xx – напряжение стабилизации (05, 12 и т. д.). Внешний вид этой микросхемы в двух исполнениях (мощном на токи до 1,5–2 А и маломощном на ток до 100 мА) показан на рис. 17.6; 1, а типовая схема включения в расчете на напряжение 5 В – на рис. 17.6; 2. Отечественный аналог – серия К142ЕН.

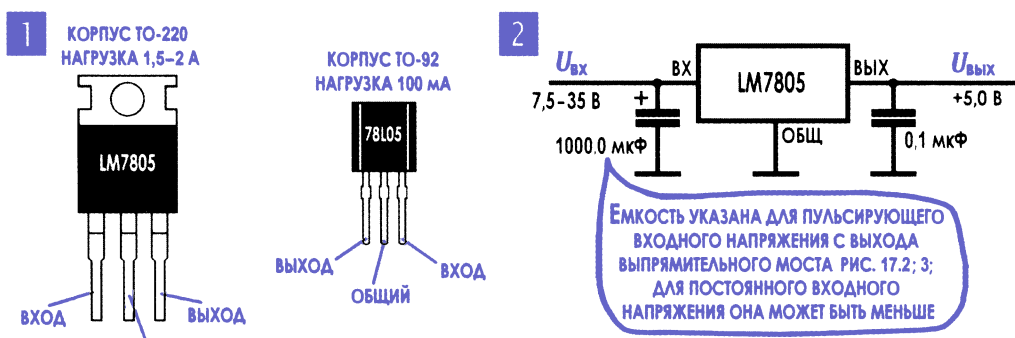


Рис. 17.6. Интегральный стабилизатор LM7805

Существует большое разнообразие подобных стабилизаторов: например, малопотребляющие и с минимальным проходным напряжением (т. е. разницей между входом и выходом). Интегральные стабилизаторы, как правило, имеют защиту от перегрева и ограничение выходного тока при пере-

грузке (или защиту от короткого замыкания¹³), некоторые защищены даже от подключения в неправильной полярности. Большая часть интегральных регуляторов ориентирована на стабилизацию положительного напряжения, но существуют и стабилизаторы отрицательной полярности.

Так как стоимость интегральных стабилизаторов не превышает цены обычного транзистора, то можно поставить один мощный стабилизатор с повышенным напряжением на всю схему, а затем отдельные части запитать от маломощных с нужным напряжением. Благодаря двухступенчатой стабилизации вы получаете заведомо качественное автономное питание для каждого участка, и тогда, например, цифровые узлы не смогут создавать помехи аналоговым компонентам.

Общий недостаток линейных стабилизаторов – их малый КПД. Несложно подсчитать, что при максимально допустимом входном напряжении 35 В при токе 1 А на микросхеме стабилизатора будет выделяться 30 В тепловой мощности. Это заставит устанавливать такую микросхему на здоровенный радиатор размерами примерно 10×10 см с ребрами высотой 25–30 мм, да еще и создавать условия для хорошего отвода тепла от него, чтобы избежать перегрева остальной схемы. И при этом большая часть энергии источника будет переводиться впустую.

Для питания мощных потребителей давно применяются импульсные источники, принцип работы которых показан на рис. 17.5; 2: здесь входное постоянное напряжение (не очень важно, какое именно – это может быть и выпрямленное сетевое 220 В, а может быть напряжение аккумулятора 12 или 14 В) преобразуется в высокочастотное переменное, а затем пропускается через трансформатор, выпрямляется и стабилизируется. Ключевое слово тут «высокочастотное» – как указывает автор, в этом случае требуется трансформатор намного меньших габаритов, снижаются также емкости и индуктивности в выходных фильтрах. Стабилизация при этом осуществляется за счет обратной связи с выхода прямо на высоковольтный вход: регулированием ширины входных импульсов (вот она, широтно-импульсная модуляция, ШИМ!) можно очень точно подстроить величину выходного напряжения, при этом совершенно не увеличивая потерь. КПД таких источников питания достигает 85–95 % и тем больше, чем больше требуемая мощность.

Типичный представитель подобных источников – блок питания компьютера или телевизора. Разумеется, никаких блокинг-генераторов, как на рис. 17.5; 2, там нет: все управляется специальной микросхемой через ключи на полевых транзисторах, разработанных именно для таких целей и имеющих в открытом состоянии сопротивление в единицы тысячных долей ома при допустимом токе в десятки и сотни ампер.

¹³ Ограничение выходного тока не то же самое, что защита от короткого замыкания, – в последнем случае ток должен снижаться или отключаться вовсе, а при ограничении он продолжает поступать на выход (обычно на уровне примерно 80 % от максимально допустимого).

Еще один бонус, который вытекает из самого принципа устройства импульсных источников: диапазон входного напряжения в принципе может быть любым – если вы рассмотрите зарядное устройство вашего ноутбука, то увидите там что-то вроде «INPUT 100–240 V 50/60 Hz». То есть оно одинаково подходит для европейского стандарта 230 В, 50 Гц и для американско-японского 120 В, 60 Гц, без каких-то переключений; и при этом не сбоят при скачках напряжения, характерных, например, для сельской местности.

Для любительских конструкций очень удобны подобные импульсные источники, встроенные в сетевую вилку. Можно даже не приобретать специальные: зарядные устройства для отработавших свой век мобильных телефонов или планшетов дают напряжение 5 В при достаточном токе, и единственное, что требуется сделать, – откусить или заменить выходной разъем. Заодно такие устройства защищены от короткого замыкания и перегрева, имеют хорошую изоляцию от сетевого напряжения, то есть безопасны в применении. Выпускается также большой ассортимент модулей подобных источников для встраивания в аппаратуру самых разных напряжений и мощностей, и зачастую выгоднее приобрести такой модуль, чем возиться с самостоятельно разработанным линейным источником.

Практикум. Лабораторный источник питания

Современные микросхемы стабилизаторов питания (см. гл. 17; 10) имеют предостаточно разновидностей, позволяющих построить стабилизатор питания с переключаемым значением выходного напряжения. Однако мы возьмемся построить стабилизированный источник самостоятельно из дискретных компонентов – схема сама по себе несложная, и все громоздкие узлы (переключатель с резисторами, теплоотводящий радиатор) будут одни и те же в обоих случаях. Зато самостоятельно изготовленная схема стабилизатора содержит некоторые компоненты, с которыми очень полезно познакомиться на практике – они используются во многих других случаях. Отметим, что в принципе данная схема мало чем отличается от того, что содержится внутри фирменных интегральных стабилизаторов, по крайней мере если они не из самых сложных. Наш стабилизатор будет иметь ограничение выходного тока (в том числе при коротком замыкании), а также защиту от перегрева выходного транзистора.

Входное постоянное напряжение для стабилизатора должно быть около 15–17 В. Его можно получать по любой из схем с трансформатором, выпрямителем и конденсаторным фильтром на выходе (рис. 17.2, 17.3). Мощность трансформатора должна быть рассчитана не менее, чем на 50 Вт, выпрямительные диоды – на ток не менее 2 А.

Для схемы стабилизатора, кроме обычных резисторов и конденсаторов, нам понадобятся:

- источник опорного напряжения, в качестве которого удобно использовать специальный прецизионный стабилитрон, они имеют напряжение 1,22–1,23 В (например, AD1580);
- мощный *n-p-n*-транзистор с допустимой рассеиваемой мощностью не менее 50 Вт (можно составной, например, КТ829);
- любой маломощный кремниевый *n-p-n* транзистор;
- операционный усилитель общего назначения с допустимым напряжением питания не менее +20 или ± 15 В. В схеме далее указан классический $\mu A741$ (отечественный аналог 140УД7), его можно заменить на более современные ОРА241, ОР193, ОР97 и др.;
- прецизионные резисторы из т. н. ряда E96 (т. е с погрешностью 1 %) определенных номиналов (см. табл. 17.1). Конечно, можно и из еще более точных разновидностей (резисторы встречаются с точностями вплоть до 0,1 %). Если точные резисторы приобрести не удастся, то можно составить как можно более близкие к табличному варианты из обычных 5%-ных резисторов, включая их последовательно и параллельно. От качества подгонки номиналов под табличные значения зависит точность установки напряжений на выходе стабилизатора;
- мощный (не менее 2 Вт) резистор с сопротивлением 0,3 Ом. Подобный резистор приобрести бывает затруднительно; о том, как изготовить его самостоятельно, см. *Практикум* к главе 4;
- РТС-термистор 100 Ом (типа B59901-D90-A40). Компонент, мало-знакомый даже многим опытным электронщикам. РТС означает *positive temperature coefficient*, то есть сопротивление такого терморезистора возрастает с увеличением температуры (в отличие от более распространенных NTC-термисторов, у которых сопротивление падает – с ними мы познакомились в *Практикуме* к главе 15).

На самом деле РТС-термистор – совершенно особый полупроводниковый прибор, который ничуть не напоминает NTC-термисторы – его сопротивление в обычном диапазоне температур изменяется мало (даже несколько снижается с ее ростом), зато при достижении определенной температуры (ее называют нормируемой температурой T_{NAT}) сопротивление крайне быстро возрастает. Выбранный нами тип имеет сопротивление 100 Ом при комнатной температуре и рассчитан на $T_{\text{NAT}} = 90^\circ\text{C}$. При изменении температуры всего от 80 до 100 °C его сопротивление растет от значения около 200 Ом до примерно 10 кОм, а при достижении 120 градусов становится равным 1 мегаому. Используется такой термистор, как вы,

наверное, уже догадались, для защиты мощного транзистора от перегрева.

Схема стабилизатора приведена на рис. 17.7. Кратко рассмотрим, как она работает.

Главная часть стабилизатора – операционный усилитель (ОУ) DA1, выход которого подключен к базе мощного транзистора VT₃. Транзистор включен, как эмиттерный повторитель, то есть напряжение на его выходе (на эмиттере) повторяет напряжение на базе за вычетом падения напряжения на переходе база–эмиттер $U_{\text{бэ}}$ (см. гл. 12; 8). В данном случае это падение составит не менее 1,2–1,5 В (транзистор составной, то есть $U_{\text{бэ}}$ удваивается), но нас эта величина волнует мало, потому что обратная связь ОУ снимается прямо с выхода всей схемы – с эмиттера VT₃. Иными словами, ОУ будет поддерживать на заданном уровне именно выходное напряжение схемы, а какое при этом установится напряжение на выходе самого ОУ, нас волнует мало (это важно только для того, чтобы не промахнуться и не задать входное напряжение $U_{\text{нестаб.}}$ слишком маленьким).

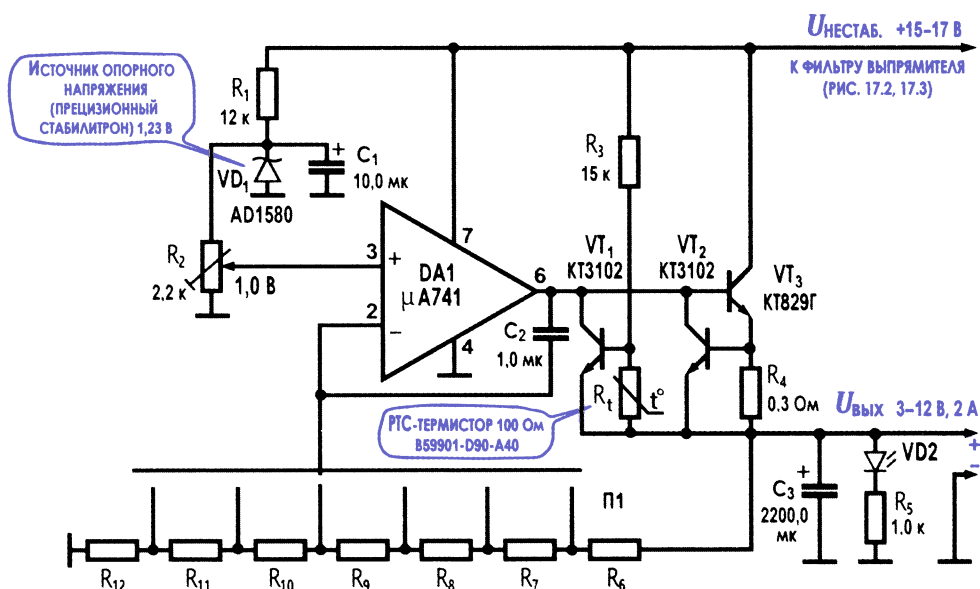


Рис. 17.7. Лабораторный источник питания

Уровень выходного напряжения будет равен входному (опорному) напряжению ОУ, то есть напряжению на выводе 3 ОУ, умноженному на коэффициент усиления, который задается с помощью переключателя П1. Он будет равен отношению суммы сопротивлений от движка П1 до правого (по схеме) вывода П1 к сумме сопротивлений левой части (от движка П1 до общего провода) плюс единица. Сопротивления резисторов R_6 – R_{12} не

указаны на схеме, а сведены в табл. 17.1 – в схеме играет роль не их абсолютная величина, а только соотношение. Значения в таблице можно все вместе пропорционально увеличить или уменьшить, работоспособность схемы от этого не изменится (степень уменьшения или увеличения нужно выбирать в разумных пределах, конечно, лучше всего, чтобы суммарное сопротивление резисторов не выходило за пределы 1–100 кОм).

Таблица 17.1. Значение сопротивлений делителя П1 (рис. 17.7)

Резистор	Точное значение	Ближайшее из ряда E96 ($\pm 1\%$)	Напряжение на выходе (положение переключателя), В
R6	5,33 кОм	5,36 кОм	
R7	660 Ом	665 Ом	3 (1)
R8	400 Ом	402 Ом	4 (2)
R9	530 Ом	536 Ом	5 (3)
R10	180 Ом	182 Ом	7,5 (4)
R11	220 Ом	226 Ом	9 (5)
R12	667 Ом	665 Ом	12 (6)

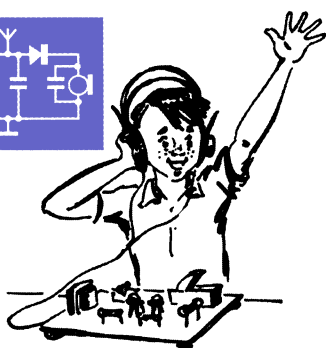
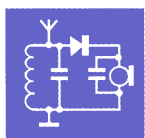
Опорное напряжение здесь для удобства расчетов устанавливается с помощью подстроечного резистора R_2 на уровне 1 В ровно, хотя ничто не мешает его поменять – например, избавиться от подстройки и пересчитать соотношение сопротивлений резисторов на величину опорного источника, равную 1,22 В.

Теперь давайте разберемся в функционировании предохранительной части схемы, собранной на маломощных транзисторах VT_2 и VT_3 . Как уже говорилось, здесь можно применить любой кремниевый n - p - n -транзистор – имеет значение лишь его напряжение $U_{бэ}$, которое должно быть равно 0,6 В (то есть составной или германиевый транзистор не годится). Транзистор VT_2 будет ограничивать ток на выходе схемы: как только напряжение на резисторе-датчике тока R_4 вырастет до 0,6 В, VT_2 начнет приоткрываться и при этом током в цепи коллектор–эмиттер будет запирает мощный транзистор VT_3 . Независимо от установленного напряжения, ток в цепи никогда не сможет превысить величину 2 А, даже при коротком замыкании на выходе.

Но тут нас подстерегает другая «засада» – ведь вся разница между входным и выходным напряжениями рассеивается в виде тепла на мощном транзисторе VT_3 . Легко подсчитать, что при выходном напряжении 3 В (не говоря уже о коротком замыкании на выходе) на транзисторе VT_3 будет падать около 15 В, что при максимальном токе нагрузки 2 А даст около 30 Вт рассеиваемой мощности.

То есть для успешной работы выходной транзистор VT_3 должен быть установлен на теплоотводящий радиатор. Расчет такого радиатора довольно сложен и весьма приблизителен – укажем здесь только, что при такой выделяющейся мощности ребристый радиатор должен иметь суммарную площадь поверхности около 150 см^2 .

Но что делать, если воздействие будет длительным и транзистор все-таки перегреется и сгорит? Для этого и служит узел из транзистора VT_1 , резистора R_3 и РТС-термистора R_t . Термистор имеет корпус с отверстием, через которое он плотно привинчивается к радиатору вблизи транзистора. В исходном состоянии (пока температура не превышает примерно $80\text{--}85^\circ\text{C}$) сопротивление R_t относительно мало (около 100 Ом) и не влияет на работу схемы: падение напряжения на нем не превышает $0,1 \text{ В}$, транзистор VT_1 надежно закрыт. При нагреве сопротивление R_t резко увеличивается, и транзистор начинает приоткрываться (точно так же, как VT_2 приоткрывается при увеличении тока свыше 2 А через резистор R_4). В результате такая защита никогда не даст радиатору нагреться свыше 90°C в месте установки термистора – и даже если сам кристалл транзистора при этом нагреется несколько выше этого значения, это не страшно, так как его предельная температура составляет 150°C .



ГЛАВА 18

Фантастическая электроника

1. Важнейшие проблемы радиоэлектроники – уменьшение веса и объема аппаратуры, повышение ее надежности, автоматизация производства.

Радиоэлектронная аппаратура непрерывно совершенствуется, берет на себя все более сложные функции и при этом часто сама сильно усложняется. Лет тридцать-сорок назад в очень сложном электронном аппарате могло быть несколько тысяч деталей, а современные аппараты, в частности вычислительные машины, содержат миллионы и десятки миллионов деталей. И если бы это были детали, какие выпускались лет тридцать назад, – электронные лампы, сравнительно большие резисторы и конденсаторы, то для размещения сложной электронной аппаратуры нужны были бы, наверное, огромные многоэтажные дома, она весила бы сотни тонн, потребляла бы тысячи киловатт электроэнергии. Вот лишь один из многих примеров: электронное оборудование большого современного самолета, если бы оно было собрано на лампах, весило бы столько, что самолет уже просто не мог бы подняться в воздух.

А вот другая проблема: по мере усложнения электронной аппаратуры резко снижается ее надежность. Как показала статистика, главная причина отказов, неисправностей – это соединительные цепи, соединения между элементами схемы; и чем больше элементов, тем чаще происходят отказы, меньше надежность. Это проблема огромной важности, особенно если учесть, что электронике доверяют такие важные дела, как, например, управление космическим кораблем или контроль за ритмами больного сердца.

Взволнованно повествует о проблеме надежности старинная английская баллада:

Не было гвоздя –
Подкова пропала,
Не было подковы –
Лошадь захромала,

Лошадь захромала –
Командир убит,

Конница разбита,
Армия бежит!
Враг вступает в город,
Пленных не щадя,
Оттого, что в кузнице
Не было гвоздя¹!

И наконец, третья важнейшая проблема: электронной аппаратуры нужно все больше и больше, аппаратура эта усложняется, и делать ее вручную уже просто невозможно. Если бы при нынешних масштабах применения электроники изготавливать ее по технологии полувековой давности, то в электронной и радиопромышленности, наверное, должно было бы работать все население страны. Здесь есть только один выход – автоматизация производства, создание такого оборудования, такой технологии, при которой основную работу делали бы машины, автоматы, а человек только следил бы за ними. Но можно ли автоматизировать такие чисто человеческие операции, как сборка электронных схем, пайка, монтаж, наладивание?

Примечание редактора. Отмеченный на рис. 18.1 в качестве основы печатных плат гетинакс (прессованная с синтетической смолой бумага) в настоящее время в электронике применяется очень редко, только в самых дешевых изделиях. Его достоинство в сравнении с распространенным стеклотекстолитом (эпоксидный состав с наполнителем из стекловолокна) состоит в том, что отверстия в таком материале можно пробивать, а не сверлить. Сверление стеклотекстолита – тонкая операция, требующая специальных твердосплавных инструментов. Зато стеклотекстолит прочнее на изгиб, чем хрупкий гетинакс, имеет лучшие диэлектрические свойства, а тонкий слой медной фольги на нем держится прочнее.

Применение интегральных схем – вот путь, двигаясь по которому, можно одновременно решать все три проблемы: добиваться резкого уменьшения габаритов и веса аппаратуры, повышать ее надежность и автоматизировать производство. Интегральные схемы, или, как их часто называют, микросхемы, – это электронные блоки, плотность монтажа в которых в тысячи раз выше, чем в аппаратуре из дискретных элементов, то есть из отдельных деталей – резисторов, диодов, транзисторов и т. д. Сложный электронный блок, занимающий в традиционном исполнении целый шкаф, если его выполнить в виде интегральной схемы, может уместиться в тончайшем слое кремниевой пластинки размером с копейку, а весить доли грамма. И надежность его будет очень высокой: у интегральной схемы совсем иной принцип соединения «деталей», они как бы слиты в единую электрическую цепь, представляют собой единую схему и единую монолитную конструкцию. Об этом напоминает само слово «интегральная», оно происходит от латинского *integer*, что означает «целый», «единый».

¹ Перевод Маршак С. Я.

Наконец, как это ни удивительно, но интегральные схемы по самой своей природе предполагают автоматизацию производства: эти невидимые микроскопические электронные блоки изготавливаются без какого-либо прикосновения к ним человеческой руки.

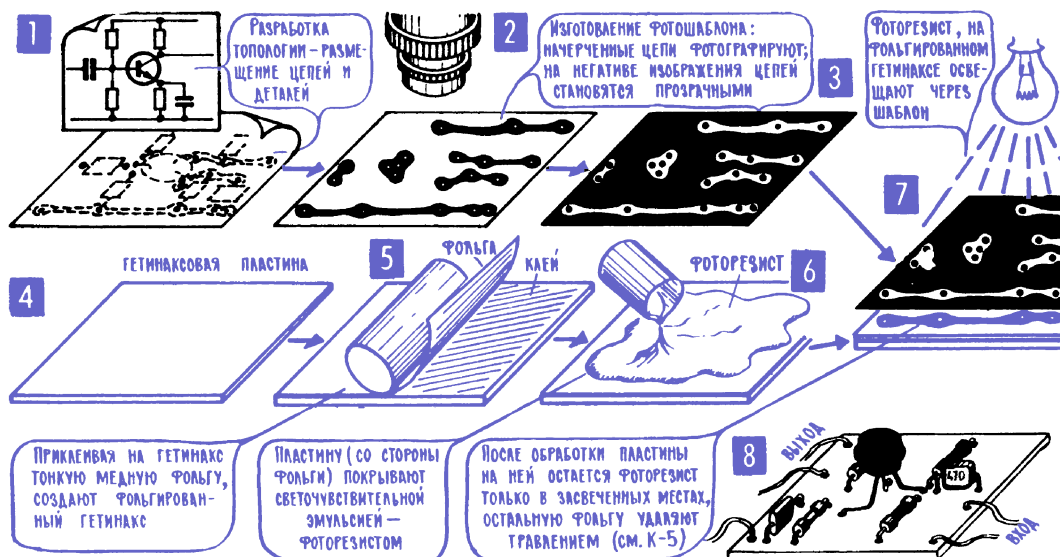


Рис. 18.1. Изготовление печатных плат

2. Интегральные микросхемы – революция в электронике. Первые интегральные схемы появились в 1958 году, но нельзя, конечно, считать, что микросхемы были созданы в один день – технология подошла к ним через многие другие свои достижения. В частности, через печатный монтаж – изготовление соединительных проводов методом фотолитографии (рис. 18.1). Через методы вакуумного напыления различных покрытий, например веществ с высоким удельным сопротивлением для создания резисторов (гл. 4; 5). И конечно же, самое важное достижение, приблизившее электронику к интегральным схемам, – это создание в 1948 году транзисторов. Во-первых, появились действительно микроскопические усилительные приборы: сам транзистор, без корпуса, – это кристаллик размером с песчинку; электронную лампу таких размеров невозможно себе представить. Но транзистор-песчинка – это далеко не предел, современные технологии позволяют делать транзисторы в тысячи раз меньших размеров. Более того – ученые и технологи научились создавать в полупроводниковом кристалле и другие элементы очень малых размеров. Так, например, *p-n*-переход, если подать на него обратное постоянное напряжение (свободные заряды оттянуты от границы, между зонами *p* и *n* появился слой без свободных зарядов; гл. 9; 10), выполняет роль конденсатора. А вводя в полупроводник донорные или акцепторные примеси и дозируя их опре-

деленным образом, можно создавать в кристалле резисторы с самым разным сопротивлением.

Раньше других начали широко применяться так называемые гибридные интегральные схемы – в них значительная часть элементов образована различными тонкими пленками, а активные элементы – транзисторы и диоды – это бескорпусные приборы-песчинки, соединенные с пленками в нужных местах. В гибридной схеме из металлических пленок образованы соединительные проводники и обкладки конденсаторов, между этими обкладками находятся пленки диэлектрика, в виде тонких пленок выполнены резисторы (рис. 18.2). Создаются эти пленки напылением тончайших слоев нужных материалов через трафареты (шаблоны) – маски с фигурными окнами.

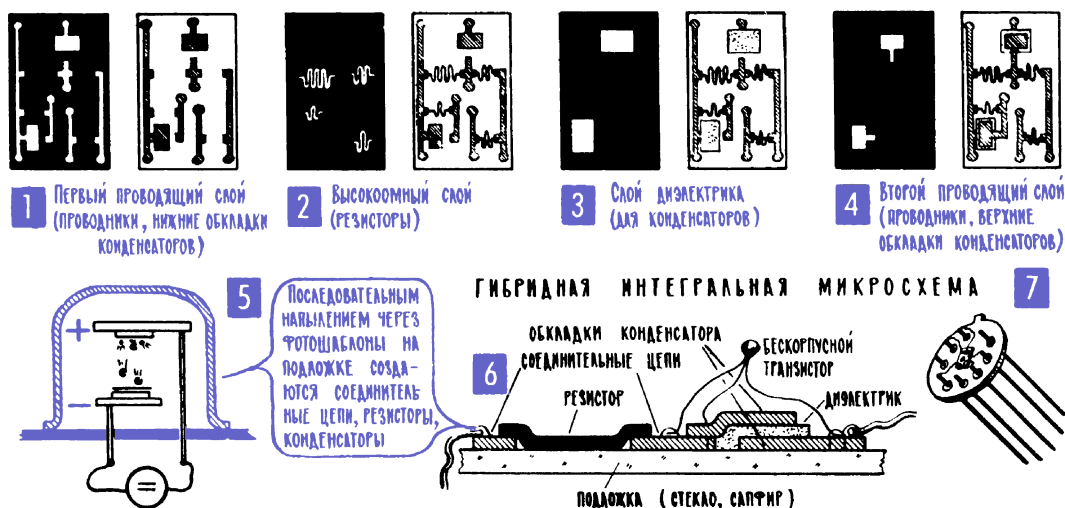


Рис. 18.2. Гибридная интегральная схема

Постепенное совершенствование технологии позволило сделать следующий важный шаг – перейти к полупроводниковым интегральным схемам, где в одном кристалле создаются все элементы – транзисторы, резисторы, конденсаторы, соединительные цепи (рис. 18.3). Существуют две основные группы полупроводниковых интегральных схем – с обычными биполярными транзисторами (это уже знакомые нам приборы с коллектором, базой и эмиттером) и униполярными, или, как их иначе называют, полевыми, транзисторами. Эти полупроводниковые приборы по принципу действия и особенно по некоторым характеристикам похожи на электронные лампы. Так, например, у полевых транзисторов, как и у ламп, высокое входное сопротивление, их управляющий электрод – он называется уже не базой, а затвором, – подобно сетке, влияет на ток «без касания», своим электрическим полем, и не имеет прямого контакта с эмиттером и коллектором – у полевого транзистора они называются, соответственно, исто-

ком и стоком. На основе полевых (униполярных) транзисторов появился огромный класс интегральных схем типа МОП, что расшифровывается так: металл – окисел – полупроводник (окисел является диэлектриком, и поэтому МОП-структуры иногда называют МДП: металл – диэлектрик – полупроводник). Структуры МОП – основа большинства интегральных схем для вычислительной техники, и в то же время полевые МОП-транзисторы благодаря некоторым важным достоинствам, таким, например, как высокое входное сопротивление и низкий уровень шумов, выпускаются в виде отдельных усилительных приборов².

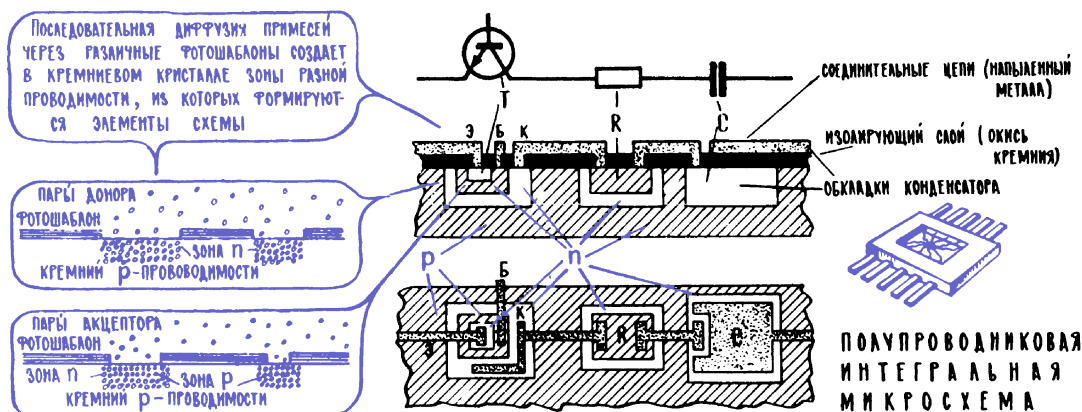


Рис. 18.3. Полупроводниковая интегральная схема

Знакомясь с конкретными интегральными схемами и их описанием в справочниках, кроме сокращений МДП и МОП, можно встретить и другие важные аббревиатуры, другие сокращения, такие, в частности, как ТТЛ – транзисторно-транзисторная логика, ЭСЛ – эмиттерно-связанная логика, КМОП – комплементарные (дополняющие) МОП-структуры. Мы не будем сейчас отвлекаться на эти подробности, а попробуем хотя бы в самых общих чертах познакомиться с существом дела – с устройством микросхем и технологией их изготовления.

Представим себе полупроводниковую интегральную схему, для начала не очень сложную. В тонкой пластинке кристаллического кремния создано несколько диодов и транзисторов – несколько микроскопических областей с примыкающими зонами p - n , n - p - n или p - n - p . Еще раз подчеркнем – все это образовано в едином кристалле, в определенные его микроучастки были введены необходимые примеси и таким образом созданы зоны n или p . Подобным же образом, путем введения различных примесей, созданы в кристалле микроскопические резисторы и конденсаторы. Теперь нужно как-то соединить эти разрозненные «детали», превратить их в электронную схе-

² Дискретные полевые МОП-транзисторы (по-английски MOSFET) в настоящее время имеют широкое применение в качестве переключающих элементов – ключей, в том числе очень мощных (см. гл. 17; 10).

му. Многие соединения, как уже говорилось, осуществляются внутри кристалла, отдельные «детали» просто примыкают друг к другу. Но многие соединения делают снаружи в виде тончайшей паутинки напыленных проводов, чаще всего алюминиевых, а иногда серебряных.

Расположение деталей – однослойное, так что интегральная схема обычно уходит вглубь кристалла не больше чем на десятые доли миллиметра. Правда, в последнее время в технических журналах пишут о создании двух- и даже трехэтажных интегральных схем, но все это пока, видимо, лишь первые шаги³. Зато в части уменьшения площади отдельных «деталей» имеются большие достижения. (Слово «детали» приходится брать в кавычки потому, что в интегральной схеме нет деталей в привычном смысле слова, нет того, что можно было бы извлечь из схемы или заменить; с учетом этого полупроводниковые интегральные схемы долгое время называли монолитными; транзисторы, диоды, конденсаторы, резисторы, созданные в интегральной схеме, называют ее элементами.) В первые годы массового выпуска полупроводниковых интегральных схем их «детали» в среднем имели размеры 0,08–0,1 мм, то есть 80–100 мкм. В конце 1970-х уже пришли к размерам 5–10 мкм, в конце 1980-х типичный размер элемента составлял 1–3 мкм. Чтобы такая трехмикронная деталь стала размером хотя бы с типографскую точку, нужно всю микросхему увеличить до размеров большой книги⁴.

И еще одна попытка пояснить, что такое элемент микросхемы размером 3 мкм. Если среднюю по размерам букву на этой странице заполнить такими трехмикронными элементами, то их на территории этой буквы уместится чуть ли не целый миллион. Плотность «монтажа» в современных БИСах, больших интегральных схемах (больших по количеству элементов), очень велика – в типичной кремниевой пластинке размером 5×5,2 мм (по размерам это клеточка арифметической тетради) уместятся десятки тысяч элементов. А в СБИСах, сверхбольших схемах, число элементов исчисляется сотнями тысяч – по числу «деталей» такая схема эквивалентна нескольким сотням телевизоров⁵.

Десятки и сотни телевизоров в клеточке арифметической тетради – действительно какая-то фантастика!

На рис. 18.4 отмечены основные этапы создания интегральных схем. Здесь один из центральных процессов – фотолитография. В этот термин вошло слово «литография» (от греческих «лито» – «камень» и «графо» – «пишу»), название одного из старых способов печатания картин, где пе-

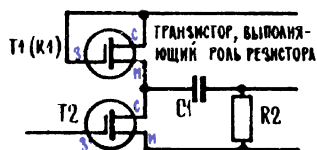
³ Объемные полупроводниковые схемы в несколько слоев так и не получили распространения – слишком велики технологические трудности и мал выход годных кристаллов.

⁴ В современных микросхемах технологические нормы составляют 14–22 нанометра, то есть в 50–70 раз меньше, чем в конце 1980-х. 1–3 мкм – типичная величина элемента для микросхем средней степени интеграции (счетчиков, регистров, наборов логических элементов).

⁵ Имеются в виду телевизоры 1960–1980-х годов на дискретных элементах; современные телевизионные приемники могут быть посложнее иного компьютера. Сверхбольшие интегральные схемы – например, микропроцессоры – перешли порог в миллион элементов еще в 1990-е годы.

чатная форма создается на поверхности камня. Фотолитография (от греческого «фотос» – «свет») основана на использовании светочувствительного материала – фоторезиста (рис. 18.1; 6, 7). Им покрывают кремниевую пластину, на которой будет создаваться микросхема, и освещают эту пластину через фотошаблон, через узор на фотопленке⁶, состоящий из прозрачных и черных участков. На фоторезисте в освещенных его участках появляется скрытое изображение, примерно такое же, как на фотопленке или фотобумаге. А затем следует процесс, напоминающий проявление: экспонированную (освещенную) пластинку кремния погружают в раствор, который удаляет фоторезист с освещенных участков, – в слое фоторезиста, в тех его местах, куда фотошаблон пропускал свет, образуются окна, открывается доступ к кремнию. Теперь в эти окна можно ввести примеси и начать формирование транзисторов и других элементов микросхемы. Введение примеси чаще всего осуществляют за счет диффузии – кремниевую пластину помещают в вакуумную камеру, создают в этой камере пары нужной примеси, и эти пары на некоторую небольшую глубину проникают в пластину, но, разумеется, только в те ее участки, где в фоторезисте открыты окна. Несколько раз повторяя этот процесс с разными фотошаблонами и разными примесями, формируют в кремниевой пластине участки с разными физическими свойствами, и именно таким образом появляются все элементы микросхемы.

Основные этапы изготовления большой интегральной схемы (БИС):
1. Разработка принципиальной схемы.



2. Разработка топологии.
3. Обработка топологии на 9ВМ.
4. Создание промежуточных фотошаблонов.
5. Создание рабочих фотошаблонов.
6. Создание диэлектрического слоя (оксид) на кремниевой пластине.
7. Нанесение фоторезиста.
8. Экспонирование фотослоя.
9. Проявление (с вымыванием засвеченных участков).



10. Вскрытие окон в оксиде.
11. Удаление фоторезиста.

12. Легирование (введение примесей).



13. Отжиг легированной примеси.
- 14–19. Повторение процессов 7–12 со вторым фотошаблоном.
20. Выращивание тонкого слоя подзатворного диэлектрика.

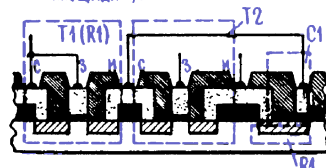


- 21–25. Повторение процессов 7–12 с третьим фотошаблоном.
26. Напыление алюминия.

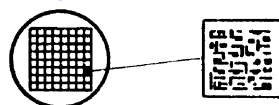


- 27–29. Повторение операций 7–9 с четвертым фотошаблоном.
30. Удаление алюминия с открытых участков, формирование соединительных цепей («проводников»).

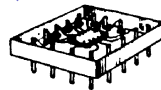
31. Нанесение защитного слоя.
- 32–36. Повторение процессов 7–11 для пятого фотошаблона (открытыми остаются контактные площадки).



37. Резка кристалла.



38. Установка кристалла в корпус, сборка.



39. Герметизация.
40. Окончательный контроль.

Рис. 18.4. Этапы изготовления интегральной схемы

⁶ Фотошаблоны для современных производств микросхем делаются на основе стекла или кварца; засвечивание фоторезиста производится электронным пучком или рентгеновским излучением, так как длина волны видимого света (0,4–0,7 мкм) слишком велика.

При фотолитографии в кремниевой пластине одновременно формируются огромное количество «деталей», например по две зоны p для каждого из десяти тысяч p - n - p -транзисторов, и в результате нескольких последовательных технологических операций сразу рождается микросхема из многих тысяч элементов. Более того, на одной кремниевой пластине одновременно создается несколько десятков или сотен микросхем, затем пластину разрезают и каждую микросхему устанавливают в отдельный корпус (рис. 18.4). Все это можно сравнить с каким-то фантастическим станком, который, получив сырье в виде металла, резины и пластмассы, быстро выполняет несколько операций и сразу, как говорится, одним ударом, выдает несколько десятков полностью готовых автомобилей, собранных из многих тысяч деталей.

3. Микроэлектроника, превратив в интегральную схему сложные и дорогие электронные устройства, сделала их доступными для широкого применения. Интегральные схемы – это малые габариты и малый вес огромных когда-то электронных установок, это высокая надежность аппаратуры. Но может быть, главное в том, что выпускаемые огромными тиражами интегральные схемы сделали сложные и совершенные электронные устройства во много раз более дешевыми и доступными – аппарат, который еще недавно стоил тысячи рублей, превратившись в интегральную схему, стал, грубо говоря, стоить рубль.

Возьмите, к примеру, электронные часы. Все, что они умеют, – точный отсчет времени, календарь, секундомер, будильник, а иногда еще и микрокалькулятор – обеспечивает одна интегральная схема, по числу деталей она эквивалентна нескольким телевизорам. Раньше, пожалуй, никто не рискнул бы использовать столь сложную систему в часах, так сказать, личного пользования. Не говоря уже о том, что мы не стали бы носить с собой электронные часы, схема которых занимает целый чемодан. А вот превратившись в микросхему, электроника часов занимает территорию все той же арифметической клеточки, она весит меньше грамма, а главное – миллионными тиражами выпускается на заводах-автоматах и по стоимости вполне конкурирует с механическими часами⁷.

Другой пример – кнопочный телефонный аппарат. Слов нет, набирая нужный номер, гораздо удобнее нажимать кнопки, чем крутить телефонный диск. Но за это удобство приходится довольно дорого платить – кнопочному номеронабирателю нужна электронная схема из нескольких тысяч деталей. В этой схеме должен быть генератор сравнительно медленных импульсов, которые нужно послать в линию, сообщая о набранном

⁷ Сейчас скорее наоборот – механические ручные часы куда дороже электронных. При этом, что интересно, электронные часы, если не считать уж совсем дешевых, намного точнее любых механических, даже самых дорогих швейцарских: самые точные механические часы допускают уход от -4 до $+6$ секунд в сутки (обычно – до 30 секунд), а рядовые кварцевые – 10–20 секунд в месяц. Поэтому механические часы сейчас приобретаются только как престижное украшение.

номере (гл. 8; 5); должна быть система ввода, при нажатии той или иной клавиши она сформирует сигнал из нужного числа импульсов; должна, наконец, быть память, так как вы можете нажимать кнопки очень быстро, а посылать импульсы в линию нужно в строго определенном темпе, не спеша. Поэтому набранный вами номер сразу же запоминается в триггерных ячейках и уже оттуда подается в линию. Кстати, появление памяти позволяет ввести в аппарат очень удобное приспособление и не повторять каждый раз набор занятого номера, а извлекать его из памяти, нажав кнопку «Повтор».

Кнопочный телефонный аппарат стал реальностью только после того, как вся его электроника, по числу деталей эквивалентная десятку приемников, превратилась в одну интегральную схему (отечественная МОП-схема К145ИК8П; вся серия К145 в основном предназначена для телефонных аппаратов разной сложности, в частности с разным количеством запоминаемых номеров).

Первые микросхемы представляли собой просто несколько транзисторов с простейшими связями, затем в кристалле начали появляться узлы сложных схем, а сейчас в одном кристалле размещают сами эти сложные схемы целиком или почти целиком. Так, например, в одной микросхеме почти целиком находится радиовещательный приемник, или транзисторная память, в которую можно записать целую книгу, или, наконец, процессор вычислительной машины, как его называют после превращения в одну интегральную схему, микропроцессор.

Вот уже много лет, как микропроцессоры перестали быть собственностью одних только ЭВМ. Оставаясь первоклассным вычислителем или, точнее говоря, именно благодаря этому, микропроцессор стал универсальным управляющим устройством в системах автоматики⁸. Перед установкой или в процессе работы микропроцессор можно запрограммировать на решение самых разных задач – от управления токарным станком, стиральной машиной или автомобильным карбюратором до выработки команд коррекции орбиты в бортовой автоматике космического аппарата. И хотя микропроцессор – это интегральная схема, в которой от нескольких десятков тысяч до миллионов элементов, стоимость его сравнительно невелика, и он становится самым активным, пожалуй, помощником человека в деле управления огромным миром работающей на нас техники.

4. Прогресс радиоэлектроники связан с успехами фундаментальной науки. Полупроводниковый диод был известен давно, чуть ли не в начале века, а транзистор, как мы уже упоминали, появился в 1948 году, за его создание группа американских физиков – У. Шокли, У. Браттейн и Д. Бардин – была удостоена Нобелевской премии. Но вот что интересно: за много

⁸ Микропроцессор, предназначенный для работы в системах управления, обычно называют микроконтроллером.

лет до этого, в 1922 году, радиолюбитель из города на Волге – из Нижнего Новгорода – девятнадцатилетний Олег Лосев создал первый в мире полупроводниковый усилитель, построил на его основе приемник и назвал его кристадин, от слова «кристалл». Причем это не было незамеченное или забытое потом изобретение – о кристадинах Лосева писала вся мировая радиотехническая печать, американские радиоинженеры в своем журнале называли кристадин устройством, которое может совершить переворот в радиоэлектронике, вытеснить вакуумную усилительную лампу.

Такой переворот действительно произошел, но ждать его пришлось почти четверть века. Потому, что во времена кристадина физика еще не построила фундамент, на котором потом выросла полупроводниковая электроника. Только глубокие исследования физических процессов в твердом теле позволили в деталях понять, что же происходит в полупроводниках, и только на основе этого понимания развилась вся современная техника полупроводниковых приборов и интегральных схем.

А вот еще один интересный пример. В 1917 году Альберт Эйнштейн предсказал индуцированное излучение атомов и молекул, то есть вызванное внешней причиной, а конкретно – внешней электромагнитной волной. Но понадобилось почти сорок лет, чтобы это предсказание, соединившись с глубоким изучением механизмов перехода атомов с одного энергетического уровня на другой, то есть механизмов изменения запасов энергии атома, привело к рождению совершенно новой области науки и техники – квантовой электроники.

Когда атом или молекула переходят на более низкий энергетический уровень, то они отдают высвободившуюся энергию в виде кванта, порции электромагнитного излучения. При этом если выделяется большая порция энергии, то частота излучения высокая (малая длина волны) – излучается свет, ультрафиолетовые или еще более коротковолновые рентгеновские лучи. А если порция энергии невелика, если молекула выбрасывает «слабый» квант, то частота излучения сравнительно низкая (большая длина волны) – молекула испускает инфракрасные лучи, миллиметровые или даже сантиметровые радиоволны. Можно извне подпитывать атомы излучающего вещества, накачивать их энергией, например пропуская через это вещество ток или освещая его мощной лампой. Можно ввести в систему достаточно сильную положительную обратную связь, грубо говоря, сделать так, чтобы излучение одних атомов возвращалось в излучающее вещество, заставляло излучать другие атомы. Такое индуцированное излучение и накачка энергией приведут к возникновению квантового генератора – атомы вещества будут согласованно излучать электромагнитные волны, причем одной, строго определенной частоты, она определится конкретным переходом излучающих атомов (молекул) с одного энергетического уровня на другой.

Первые квантовые генераторы были созданы советскими физиками, ныне академиками Н. Г. Басовым и А. М. Прохоровым и независимо американцем Ч. Таунсом – все они за эту работу отмечены Нобелевской премией. Первенцем в семействе приборов квантовой электроники был мазер (в этом сокращении буква «м» от слова «микроволны» – первый квантовый генератор работал в диапазоне сантиметровых радиоволн), а через несколько лет появились и оптические квантовые генераторы – лазеры (буква «л» от английского «лайт» – «свет»). К созданию реальных квантовых генераторов ученые пришли через глубокое изучение процессов взаимодействия излучения с веществом – они занимались радиолокацией, а затем радиоспектроскопией, исследованием состава вещества по частоте излучения его атомов и молекул.

Что должны продемонстрировать эти два примера человеку, начинающему свой путь в практическую электронику? Прежде всего то, что он приобщается не просто к интересной области технического любительства, а к области, вобравшей в себя многие замечательные достижения фундаментальной науки. Это должно радовать и предостерегать – в нынешней электронике трудно, видимо, случайно сделать что-то новое и интересное. В этой области творчески может работать только очень грамотный человек, глубоко понимающий существо дела.

Примечание редактора. Автор, конечно, прав в том, что изобрести что-то принципиально новое в электронике, как это удалось инженеру Олегу Лосеву в 1922 году, сегодня сложно – над этим работают многочисленные коллективы крупнейших полупроводниковых фирм мира. Но хочется обратить внимание на другую сторону этого вопроса: полупроводниковая промышленность по своей природе ориентирована на массовое потребление. Завод по производству микросхем стоит 5–10 млрд долларов; разработка микросхемы и комплекта фотомасок для нее может обойтись в сотни тысяч. Поэтому цена какого-нибудь микроконтроллера в 1–3 доллара получается такой, только если этот микроконтроллер выпускать миллионами экземпляров.

Аналогичная история и с готовой аппаратурой: если ее разрабатывать и «доводить до ума» в индивидуальном порядке, то она окажется поистине золотой по стоимости. Все бытовые электронные приборы рассчитаны на тиражирование в сотни тысяч экземпляров, а еще лучше – миллионы. Это имеет свою оборотную сторону в том, что далеко не все нужды потребителей оказываются удовлетворенными: никто не способен производить устройства именно того качества и той функциональности, которые требуются вам для каждой конкретной задачи.

И вот в этом отношении любители электроники и сейчас, совершенно как советские радиолюбители в 1930–1950-е годы, имеют все преимущества перед промышленностью. В сравнении с ситуацией в СССР середины XX века это дело облегчается еще доступностью любых компонентов. Показательный пример представляют собой бытовые метеостанции: достаточно дорогие устройства могут, однако, показывать весьма далекие от истины величины. Это не всегда халатность изготовителей (хотя бывает и такое) – просто они не в состоянии калибровать все датчики надле-

жащим образом в индивидуальном порядке, иначе цена устройств возросла бы настолько, что их никто не стал бы покупать. Любитель вполне способен сделать себе метеостанцию, которая будет если и не всегда дешевле, то намного точнее и удобнее любых фирменных (кроме, конечно, заведомо дорогих профессиональных) моделей. И это только пример того, на что способны любители при своих небольших ресурсах и возможностях. При условии, конечно, что они не ленятся изучать электронику всерьез.

5. Электронные устройства и методы радиоэлектроники с удивительной легкостью превращают в реальность самую смелую фантазию. Шестьдесят лет назад, когда был запущен первый в мире советский искусственный спутник Земли, в популярных журналах под рубрикой «Горизонты науки» начали появляться статьи о будущем союзе электроники и космической техники, в частности о том, как с помощью спутников можно будет перебрасывать ультракороткие волны на большие расстояния. Такая возможность тогда казалась делом далекого будущего; на первом спутнике стояла довольно простая радиоаппаратура: небольшой ламповый передатчик с простейшим манипулятором, который посылал в эфир непрерывную очередь радиоимпульсов, вошедших в историю: «бип-бип-бип...». Но вот прошло всего каких-то десять лет, и спутники «Молния» перебрали телевизионный мост из Москвы во Владивосток. А еще через несколько лет по системе космического телевидения «Орбита» через спутники связи цветные телепередачи пришли в сотни городов на Крайнем Севере, в Средней Азии, на Дальнем Востоке. Сейчас через спутники связи ведется обмен передачами между разными странами и континентами, работает спутниковая телефонная связь и системы спутниковой навигации.

К первым спутникам связи, таким как «Молния», которая имеет сильно вытянутую эллиптическую орбиту и перебрасывает свой радиомост лишь в определенное время суток, очень быстро прибавились постоянно действующие спутники-ретрансляторы. Они находятся на круговой стационарной (геосинхронной) орбите – на высоте примерно 36 000 км. Спутник вместе с Землей совершает полный оборот за 24 часа в плоскости экватора и таким образом всегда висит над одним и тем же районом земного шара. Такой спутник в любое время суток может раздавать московские телевизионные программы огромным территориям Сибири, Средней Азии и Казахстана.

Бортовая электронная аппаратура на спутниках и их бортовые электростанции все время совершенствуются. Это, в частности, позволило поднять мощность бортовых телевизионных передатчиков. А значит, к Земле приходит более сильный ТВ-сигнал и можно уменьшить наземные антенны, упростить приемники. Сначала спутниковые передачи принимались на наземные ретрансляторы, которые, подобно телецентру, распространя-

ли обычный ТВ-сигнал, но потом была создана аппаратура для приема программ со спутника прямо на телевизор. Для этого нужна специальная антенна («тарелка» диаметром 1–2 м) и усилитель с преобразователем: он превращает сигнал со спутника в стандартный ТВ-сигнал.

Телевизионное вещание (это слово пришло от распространенного термина «радиовещание» и обозначает радио- и телевизионные передачи для широкого круга слушателей и зрителей) в нашей стране началось в 1931 году, примерно в то же время, что и в ряде других стран. Но это было совсем другое телевидение; наш нынешний телевизор, особенно цветной, в то время показался бы несбыточной мечтой. Развертка изображения, как на передающей стороне, так и в приемниках, осуществлялась вращающимся дырчатым диском (диск Нипкова); такая система, как всякая электромеханика, была сравнительно инерционной, и картинку практически удавалось разбить лишь на 30 строк, на 1200 элементов. При этом, конечно, изображение получалось несравненно менее четким, чем в современном электронном телевидении, где картинку разбивают на 625 строк, на полмиллиона элементов (гл. 13; 9, 16). О техническом уровне электромеханического телевидения тех лет говорит, в частности, то, что, добиваясь синхронизации картинки в приемнике, пальцем притормаживали вращающийся диск. Правда, из-за небольшого числа элементов раstra спектр телевизионного сигнала получался довольно узким (рис. 13.9; 6), передачи велись на средних волнах, и их легко принимали на больших расстояниях.

Электронное телевидение в нашей стране вывели в эфир в 1937 году, но война прервала эти работы, и они возобновились, по сути дела с нуля, в первые послевоенные годы. Через десять лет были построены телепередатчики в 12 крупных городах, а телевизоров было так мало, они были такой редкостью, что большим событием считалось попасть «в гости на телевидение». И вот наше телевизионное сегодня: в стране не осталось места, где бы не принимался телевизионный сигнал, по крайней мере со спутника.

Транзисторы, а затем интегральные схемы, вытеснив электронную лампу, позволили в несколько раз уменьшить мощность, потребляемую телевизором, он стал в несколько раз легче. В то же время экран стал намного больше – первые миллионы телевизоров имели экран размером (по диагонали) 18 и в лучшем случае 23 см, сегодня типичный размер экрана – 53, или 61, или даже 67 см по диагонали⁹. Правда, для того чтобы получить качественную, четкую картинку на таком большом экране, нужно перейти на новый стандарт, имеющий 1000 или 1200, а может быть, еще больше строк. Уже есть реальные проекты такого телевидения высокой четкости¹⁰.

⁹ Такие размеры имели последние модели телевизоров на основе кинескопов; обычный размер плоских телевизоров с ЖК-экранами начинается от 32 дюймов по диагонали (примерно от 80 см).

¹⁰ Телевидение высокой четкости (1920×1080 элементов) стало стандартом начиная примерно с начала 2000-х.

Другой путь резкого повышения качества картинки – переход на цифровое телевидение¹¹.

6. Массовый переход на цифровые методы и системы знаменует новую страницу электроники. Полвека назад, в эпоху электронных ламп и ручной сборки радиоаппаратов, их конструкторы стремились уменьшить число применяемых деталей, особенно ламп. В описании телевизора, например, как серьезное достижение отмечалось, что в нем на две лампы меньше, чем в предыдущей модели, – скажем, вместо восемнадцати всего шестнадцать. Это снижало и трудоемкость, и себестоимость аппарата, не говоря уже о потребляемой мощности. Совсем иная психология у разработчиков сегодня. В эпоху интегральных схем одним ударом создаются многие тысячи транзисторов, каждый из которых – эквивалент усилительной лампы. Сегодня разработчики электронных систем совершенно спокойно идут на применение сверхсложных, многоэлементных схем, так как вся эта сложность нередко уместается в нескольких микросхемах, на профессиональном жаргоне – в нескольких корпусах. Одно из следствий такого элементного изобилия – широкое применение цифровых систем вместо аналоговых или в помощь им.

Сигнал, который появляется на выходе микрофона, по сути дела, повторяет непрерывно меняющееся звуковое давление (рис. 8.3), является его копией, аналогом (от греческого «аналогия» – сходство). С помощью так называемого аналого-цифрового преобразования, АЦП, аналоговый сигнал можно превратить в цифровой. В этом случае АЦП очень часто одно за другим производит измерения аналогового сигнала (много тысяч измерений в секунду) и каждое его значение кодирует определенным двоичным числом, определенной комбинацией единиц и нулей. Скажем, напряжение на выходе микрофона 2 мВ кодируется как 10011100, напряжение 2,1 мВ – как 10011101, напряжение 2,2 мВ – как 10011110 и т. д. Последовательность подобных кодов – это как раз и есть цифровой сигнал, точно отображающий все изменения аналогового сигнала. С помощью АЦП можно превратить в цифру любой аналоговый сигнал, например меняющееся напряжение на выходе магнитной головки, датчика температуры, звукоусилителя, видеосигнал, идущий от передающей телевизионной камеры.

Другое устройство – цифроаналоговый преобразователь, ЦАП, – осуществляет обратный процесс, превращает цифровой код в определенное напряжение. Так, скажем, обнаружив на своем входе число 10011100, ЦАП даст на выходе напряжение 2 мВ, число 10011101 – 2,1 мВ, число 10011110 – 2,2 мВ и т. д. А это значит, что ЦАП может из последовательности кодов, которую дал АЦП, восстановить исходный аналоговый сигнал.

¹¹ В США передача аналогового ТВ-сигнала прекращена еще в 2009 году; в Великобритании – в 2012-м, в России (с некоторым опозданием по отношению к первоначальному плану) – в 2019-м.

Наверняка сразу же хочется спросить: а зачем это нужно? Зачем сначала в АЦП превращать аналоговый сигнал в «цифру», а затем в ЦАП делать обратное превращение и возвращаться на исходные позиции?

Такие преобразования, оказывается, могут дать очень много, в частности высокую помехоустойчивость линий связи. Если к аналоговому сигналу добавится какая-нибудь помеха, то избавиться от нее очень трудно, чаще всего невозможно. На длинных линиях связи помехи постепенно накапливаются и могут совсем задавить полезный сигнал. А вот очистить от помех импульсы и паузы цифрового сигнала нетрудно. Делает это довольно простой электронный блок – регенератор, восстановитель. На вход регенератора может подаваться «цифра», сильно подпорченная помехами, важно лишь, чтобы импульс отличался от паузы. По этой информации регенератор будет выдавать новенькие, неискаженные цифровые коды, готовые отправиться в дальнейшее путешествие¹².

Цифровые системы широко применяются в телефонной связи и в звукозаписи – в мире выпущены миллионы цифровых лазерных проигрывателей, которые с исключительно высоким качеством звучания воспроизводят музыку с так называемых компакт-дисков. На этих пластмассовых пластинках с тончайшим металлическим покрытием имеются микронных размеров выступы, от которых лазерный луч отражается и попадает на фотодиод. Если выступ есть, луч от него отразится, в цепи фотодиода пойдет ток и даст сигнал «1». Отсутствие выступа, а значит, отсутствие тока, – это «0». Каждый уровень аналогового сигнала кодируется двенадцати–четырнадцатиразрядным числом¹³. Диск вращается, одно число следует за другим, и ЦАП воссоздает аналоговый сигнал – копию звука. Цифровой лазерный проигрыватель – система сложная. В нем, например, имеется тонкая автоматика, которая, в частности, заставляет лазерный луч точно двигаться по невидимой спирали, не отклоняясь от расположенных вдоль нее отражающих выступов.

На этом же принципе работает грозный конкурент видеомagnитофона – лазерный цифровой видеопроигрыватель. На одном его видеодиске может уместиться часовая телепрограмма или около 90 тысяч слайдов; автоматика позволяет мгновенно вызвать на экран любой из них¹⁴. Лазерный (оптический) накопитель информации для компьютеров может на одном диске записать – разумеется, в цифровом виде – чуть ли не тысячу толстых книг.

¹² Для восстановления цифрового сигнала используются не только чисто электронные приемы, но и довольно сложные математические методы, основанные на избыточности передаваемого сигнала. Например, один полезный бит, равный нулю или единице, в сети Wi-Fi может передаваться аж 11 битами. Именно такими способами стал возможен прием, допустим, спутникового навигационного сигнала, который с орбиты за 20 тысяч километров принимается на любой смартфон.

¹³ В оптических (лазерных) компакт-дисках принято кодирование информации глубиной 16 бит, то есть 16-разрядным двоичным числом, что соответствует десятичному диапазону 0–65 535.

¹⁴ Автор, по-видимому, имеет в виду DVD; длительность записи телеэфира на таком диске в хорошем качестве составляет около трех часов.

Приходят цифровые системы и в телевидение. Если аналоговый сигнал, отображающий картинку, с помощью АЦП превращать в цифровой, а его по определенной программе мгновенно обрабатывать в компьютере, то можно получать совершенно новое изображение. Так, в частности, на экране телевизора появляются хорошо всем знакомые убегающие или переворачивающиеся надписи – их создают на телецентре путем компьютерной обработки цифрового сигнала.

В последние годы цифровые системы появились даже в телевизорах и видеомаягнитофонах, о чем свидетельствует надпись *digital* – «цифровой». В этих случаях в каждом телевизоре есть свои АЦП и ЦАП, микросхемы в цифровом виде запоминают видеосигнал (обычно небольшую его часть, соответствующую одной строке), обрабатывают «цифру», превращают ее снова в аналоговый сигнал и возвращают на место¹⁵. Определенная обработка «цифры» позволяет заметно улучшить качество изображения.

Широкое использование цифровых систем, переход на «цифру» прежде всего показывает, что щедрость микроэлектроники, доступность ее сложнейших интегральных схем открыла принципиально новые возможности создания совершенных радиоэлектронных систем.

7. Познакомившись с краткой историей этой книги, читатель легче поймет назначение следующего раздела и некоторых предыдущих. Дополняя вводную главу, автор хотел бы сообщить, что эта книжка началась в 1957 году с опубликованной в журнале «Радио» серии статей под общим названием «Шаг за шагом. От детекторного приемника до супергетеродина». Статьи были рассчитаны на начинающего радиолюбителя и предлагали ему самому собрать самый простой детекторный приемник (антенна, заземление, наушники, подключенный параллельно им точечный диод – и все!) и постепенно пройти путь до вполне приличного трехдиапазонного пятилампового супергетеродина, тоже, разумеется, самодельного. Серия статей «Шаг за шагом» объединяла практические работы с изучением основ радиоэлектроники так, что к концу читатель получал небольшой комплекс фундаментальных знаний и вместе с ним возможность дальнейшей самостоятельной работы.

Судя по многочисленным письмам читателей, выбранная стратегия пришлась им по вкусу, и в 1963 году, взяв за основу упомянутую серию статей, заметно ее расширив и дополнив небольшой порцией электротехники, автор выпустил довольно толстую (более 300 страниц) книгу с тем же названием. Вслед за ней, буквально через два года, появилась книга «Шаг за шагом. Усилители и радиоузы», в основном посвященная звуку, музыке,

¹⁵ В телевизорах с плоскими ЖК-экранами обратное преобразование из цифры в аналог, по сути, не требуется, сигнал так и поступает на управляющий контроллер дисплея в цифровом виде. Однако он перед этим подвергается достаточно сложным преобразованиям в цифровой форме, так как передается в сжатом виде и требует декодирования.

акустическим системам и ламповым усилителям. А еще через три года в том же издательстве «Детская литература» вышла третья книжка – «Шаг за шагом. Транзисторы», о которой хочется сказать особо.

Книжка появилась в очень непростое время, когда шла перестройка самого фундамента радиотехники и электроники. Где-то в начале 1950-х годов появились первые серийные полупроводниковые триоды (транзисторы), они довольно быстро показали свои достоинства и начали энергично вытеснять электронную лампу (гл. 10; 11). При этом нужно заметить, что электронная лампа (тогда обычно говорили «радиолампа») была не просто какой-то радиодеталью, она была основой всей схмотехники, всего многообразия усилителей и генераторов, основой всех приемников, передатчиков, телевизоров, электронных автоматов и только что появившихся вычислительных машин. Ламповая радиоэлектроника опиралась на мощнейшую, годами создававшуюся специально для нее теоретическую базу. За сорок лет своего быстрого прогресса ламповые схемы и сами электронные лампы достигли очень высокого совершенства, сформировав целый мир новой техники, который, казалось, будет процветать вечно.

Транзисторы прежде всего закрепились в небольших переносных радиоприемниках, там, где были особо заметны достоинства полупроводникового усилителя: экономное потребление энергии и низкое питающее напряжение. Переносному ламповому приемнику требовались две батареи: накальная – обычно с напряжением 1,4 В и анодная – с напряжением как минимум 30–40 В. Такому же транзисторному приемнику достаточно было одной батареи с напряжением 6–9 В, а позднее – 3 и даже 1,5 В. При этом двух батарей общим весом 200 г ламповому приемнику хватало на 5–6 часов непрерывной работы; одна батарея такого же веса могла 30, а то и 50 часов питать аналогичный по параметрам транзисторный приемник.

Какое-то время казалось, что электронные лампы отдадут транзисторам лишь малую часть своей процветающей империи: считалось невозможным создать сравнительно мощные транзисторы, а также транзисторы, работающие на достаточно высоких частотах – хотя бы в диапазоне коротких волн.

Но вот прошло еще несколько лет, физики и технологи сконструировали принципиально новые типы транзисторов с прекрасными характеристиками, и ламповые схемы, не выдержав конкуренции, стали сдавать одну позицию за другой. Это было время, так сказать, полупроводникового энтузиазма, но также время очень трудное для огромной армии инженеров, выросших в ламповую эпоху. Уже потом, вникнув в суть дела, мы сумели придумать для себя достаточно простые образы, модели и правила, столь необходимые человеку в практической работе (гл. 9; 15–18; гл. 10). А поначалу транзисторы пришли в наш инженерный мир в густом облаке математических уравнений, непривычных характеристик и множества непонятных параметров. Не знаю, как другим людям, привыкшим к элект-

ронной лампе, но автору этих строк в какой-то момент показалось, что нет никакой надежды пробиться сквозь непонятность транзисторных схем, и, как говорил известный герой, пришла пора переквалифицироваться в управдомы. Думается, многим в то трудное время очень помогла радиоловительская школа, стремление для начала уйти от подробностей, выделить главное, создать для себя пусть упрощенную, но зато наглядную картину. Именно так удалось ухватить существо дела и сделать первые робкие шаги от лампы к транзистору.

Ну, а там уже пошло...

Непростой переход от ламповых схем к транзисторным вспомнился потому, что сегодня в электронике происходит столь же серьезная ломка, а может быть, даже еще более серьезная. Это особо остро почувствовалось при подготовке нынешнего издания книги «Электроника шаг за шагом»¹⁶.

После книги о транзисторах автор решил не продолжать запланированную серию рассказов об отдельных направлениях радиоловительской активности – о приемниках, телевидении, электронной автоматике, звукозаписи и других. Значительно удобнее было (прежде всего удобнее для читателя) собрать все это вместе, сделать общие разделы основ электротехники и электроники, снабдить общим справочным материалом, общими рекомендациями по электропитанию и налаживанию схем. Так появилась книга «Электроника шаг за шагом», первое издание которой вышло в 1979 году.

Через несколько лет ситуация заметно изменилась, и во втором издании книги (1986 год) пришлось несколько более подробно рассказать о некоторых новых областях. Был отмечен и новый поворот в самой схемотехнической идеологии – переход на цифровые схемы и цифровые методы обработки сигналов.

8. Путь в электронику для многих специалистов начинался с простейших самодельных конструкций и схем. Фантастическая электроника... Удивительное совершенство приборов и методов, удивительные возможности вычислять, измерять, управлять, действовать, перерабатывать информацию в недоступных для человека объектах и с недоступными для него скоростями. Удивительные планы и перспективы.

Так имеет ли смысл на фоне всего этого заниматься такими пустяками, как транзисторные приемники или звукоуправляемые игрушки? Стоит ли тратить время на вчерашний день электроники, на дискретные схемы, когда скоро любая аппаратура будет представлять собой всего лишь несколько микросхем, внутрь которых не влезешь ни для того, чтобы отремонтировать, ни для того, чтобы усовершенствовать электронный аппарат?

¹⁶ Речь идет об издании 2001 года. Хотя ломка, о которой говорит автор, происходила лет за двадцать до того, в 80-е годы, см. далее.

Ответ представляется очевидным: не просто полезно, но и необходимо заниматься началами электроники – типичными простыми схемами, способами обработки сигналов, основными законами электрических цепей, конструированием простейших «живых» электронных приборов. Прежде всего эти занятия очень интересны, именно они дают возможность познавать сложное на простых объектах, возможность самому искать, ошибаться, задумываться, находить решение, радоваться удаче. И именно эти занятия воспитывают в человеке многие полезные качества, о которых речь шла в самом начале, – собранность, аккуратность, организованность, умение работать, уважение к труду. И еще находчивость, изобретательность, умение логически мыслить, смелость.

Тем, для кого электроника – просто хобби, просто увлечение, уже нескольких этих «за» достаточно, чтобы уважительно относиться к представленным в этой книге простым схемам и начальным сведениям об основах электротехники и электроники. Но и тот, кто хочет выбрать электронику своей основной профессией, не должен смотреть с пренебрежением на азбуку электронных схем. Потому что к вершинам знаний человек поднимается постепенно и последовательно, ступенька за ступенькой, шаг за шагом. И путь к электронным микроскопам и радиотелескопам, к микрокомпьютерам и космическим роботам, ко всей этой фантастической электронике обязательно проходит через основы наук, через простые схемы и приборы, с которыми познакомила вас эта книга.

Список литературы

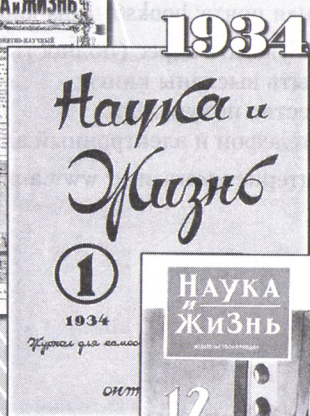
1. *Титце У., Шенк К.* Полупроводниковая схемотехника. 12-е изд. Т. 1 / пер. с нем. – М.: ДМК Пресс, 2007.
2. *Титце У., Шенк К.* Полупроводниковая схемотехника. 12-е изд. Т. 2 / пер. с нем. – М.: ДМК Пресс, 2007.
3. *Хоровиц П., Хилл У.* Искусство схемотехники: в 3 т. Т. 1 / пер. с англ. 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Мир, 1993.
4. *Хоровиц П., Хилл У.* Искусство схемотехники: в 3 т. Т. 2 / пер. с англ. 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Мир, 1993.
5. *Хоровиц П., Хилл У.* Искусство схемотехники: в 3 т. Т. 3 / пер. с англ. 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Мир, 1993.
6. *Шилов Г. Е.* Простая гамма. Устройство музыкальной шкалы. 2-е изд. – М.: Наука, 1980.
7. *Ревич Ю.* Азбука электроники. Электронные устройства своими руками. – М.: АСТ, 2017.
8. *Шеффер Ф.* Электронные эксперименты для детей / пер. с нем. – М.: ДМК Пресс, 2019.
9. *Сворень Р. А.* Электричество шаг за шагом. – М.: ДМК Пресс, 2019.
10. *Танака Кэнъити.* Занимательная электроника. Электронные схемы. Манга / пер. с японск. – М.: ДМК Пресс, 2016.
11. *Хидэхару А.* Занимательная электроника. Цифровые схемы. Манга / пер. с японск. – М.: ДМК Пресс, 2018.
12. *Каффка Т.* LEGO и электроника / пер. с нем. – М.: ДМК Пресс, 2019.
13. *Рутледж Д.* Энциклопедия практической электроники / пер. с англ. – М.: ДМК Пресс, 2002.
14. *Грабовски Б.* Справочник по электронике / пер. с фр. А. В. Хаванов – 2-е изд., испр. – М.: ДМК Пресс, 2009.
15. *Бэйкер, Бонни.* Что нужно знать цифровому инженеру об аналоговой электронике / пер. с англ. Ю. С. Магды. – М.: Додэка-XXI, 2010.
16. *Романов А. Ю., Панчул Ю. В.* Цифровой синтез: практический курс. – М.: ДМК Пресс, 2020.

Оглавление

<i>Рудольф Сворень – человек-легенда</i>	3
<i>Как книга «Электроника шаг за шагом» обрела новую жизнь</i>	12
<i>Предисловие от редактора</i>	14
<i>ГЛАВА 1. Предисловие-путеводитель.....</i>	18
<i>ГЛАВА 2. Встреча с электричеством</i>	28
<i>ГЛАВА 3. Завод, где работают электроны.....</i>	42
<i>ГЛАВА 4. Конституция электрической цепи</i>	66
Практикум. Изучаем закон Ома и свойства конденсатора	89
Эксперимент 1. Измерение тока с помощью вольтметра	89
Эксперимент 2. Исследование заряда и разряда конденсатора.....	91
<i>ГЛАВА 5. Созданный движением.....</i>	95
<i>ГЛАВА 6. Сложный характер переменного тока</i>	115
<i>ГЛАВА 7. Сырье и продукция электроники</i>	147
<i>ГЛАВА 8. В переводе на электрический.....</i>	171
<i>ГЛАВА 9 Создание мощной копии</i>	196
Практикум. Исследование вольт-амперной характеристики диодов и светодиодов.....	219
<i>ГЛАВА 10. От усиления к усилителю</i>	224
Практикум. Исследование усилительных свойств транзистора.....	258
Эксперимент 1. Ключевой режим работы транзистора	258
Эксперимент 2. Транзисторный усилитель синусоидального сигнала	260
<i>ГЛАВА 11. Превращение в генератор.....</i>	262
Практикум. Простые генераторы на микросхемах.....	285
Эксперимент 1. Генераторы прямоугольных импульсов.....	286
Эксперимент 2. Лабораторный генератор синусоидальных колебаний на операционном усилителе.....	289
<i>ГЛАВА 12. Воспроизводится музыка.....</i>	292
<i>ГЛАВА 13. Передача и хранение информации</i>	326
Радиосвязь	326
Аналоговое телевидение	340
Запись звуковой и видеоинформации.....	359
<i>ГЛАВА 14. По стопам кременских волшебников</i>	375
Практикум. Модель терменвокса	389

ГЛАВА 15. Доверено автоматам	393
Практикум. Автоматические регуляторы	412
Эксперимент 1. Регулятор температуры (термостат)	413
Эксперимент 2. Автомат включения освещения	416
ГЛАВА 16. Компьютер – вычисляющий автомат	419
Практикум. Счетчики	453
Эксперимент 1. Счетчик с индикацией двоичного числа на светодиодах	454
Эксперимент 2. Счетчик с индикацией десятичного числа на светодиодах	456
Эксперимент 3. Счетчик с индикацией десятичного числа на семисегментном индикаторе	456
ГЛАВА 17. Питание на любой вкус	459
Практикум. Лабораторный источник питания	476
ГЛАВА 18. Фантастическая электроника	481
Список литературы	500

НАУКА И ЖИЗНЬ



www.nkj.ru >

Тел.: +7 (495) 624-18-35

Книги издательства «ДМК ПРЕСС»
можно купить оптом и в розницу
в книготорговой компании «Галактика»
(представляет интересы издательств
«ДМК ПРЕСС», «СОЛОН ПРЕСС», «КТК Галактика»).

Адрес: г. Москва, пр. Андропова, 38;
Тел.: +7(499) 782-38-89, электронная почта: books@aliens-kniga.ru.

При оформлении заказа следует указать адрес (полностью),
по которому должны быть высланы книги;
фамилию, имя и отчество получателя.

Желательно также указать свой телефон и электронный адрес.

Эти книги вы можете заказать и в интернет-магазине: www.a-planeta.ru.

Сворень Рудольф Анатольевич

Электроника шаг за шагом

Главный редактор *Мовчан Д. А.*
dmkpress@gmail.com

Редактор *Ревич Ю. В.*

Корректор *Синяева Г. И.*

Верстка *Паранская Н. В.*

Обложка *Гуцков А. А.*

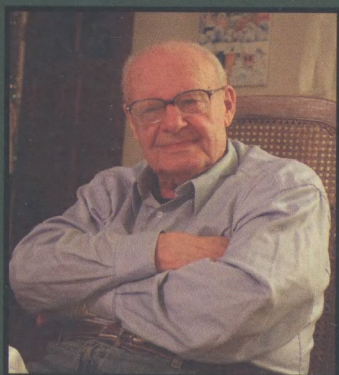
Восстановление рисунков *Гуцков А. А., Паранская Н. В.,
Чаннова А. А.*

Формат 70×100¹/₁₆.

Усл. печ. л. 40,64. Тираж 1000 экз.

Отпечатано в ООО «Принт-М»
142300, Московская обл., Чехов, ул. Полиграфистов, 1

Веб-сайт издательства: www.dmkpress.com



Рудольф Анатольевич Сворень

– автор многих популярных книг о физике и электронике, известный научный журналист, радиоинженер и кандидат педагогических наук, много лет проработавший в редакции журнала «Наука и жизнь» заместителем главного редактора.

Издано 13 книг по физике и электронике, общий тираж которых превысил 8 миллионов. Награжден орденом «Знак Почета», премией Союза журналистов СССР, также премией «Золотое перо» за вклад в журналистику.

Первое издание практической энциклопедии радиолюбителя «Электроника шаг за шагом» Р. А. Свореня было выпущено в 1979 г. и сразу завоевало широкую популярность. В него вошли популярные рассказы об основах электротехники, электроники и радиотехники, о звукозаписи, телевидении, радиосвязи, электронной музыке, об автоматике и вычислительной технике. Настоящая книга подготовлена на базе второго расширенного издания, вышедшего в 1986 году. Основная (учебная) часть оставлена почти без изменений; для привязки к современным реалиям и терминологии книга дополнена комментариями, а также «Практикумом» на основе современных компонентов. Для широкого круга любителей электроники.

Интернет-магазин:
www.dmkpress.com

Оптовая продажа:
КТК «Галактика»
books@aliants-kniga.ru

ДМК
ПРОФ.
издательство
www.dmk.pf

ISBN 978-5-97060-729-9



9 785970 607299 >