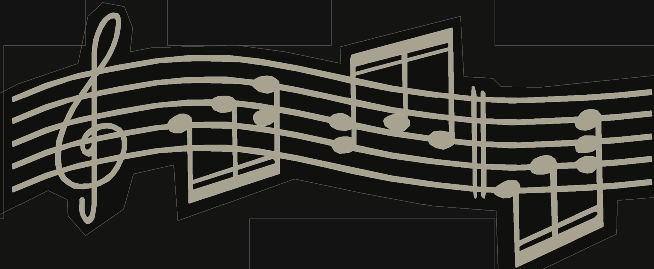


Р. СВОРЕНЬ УСИЛИТЕЛИ И РАДИОУЗЛЫ

УСИЛИТЕЛИ И РАДИОУЗЛЫ

Р. СВОРЕНЬ

ШАГ ЗА ШАГОМ

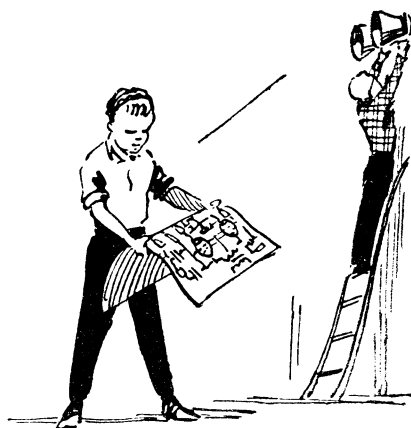


ИЗДАТЕЛЬСТВО „ДЕТСКАЯ ЛИТЕРАТУРА“

П. Свирень

ШАГ ЗА ШАГОМ

*У*СИЛИТЕЛИ
И РАДИОУЗЛЫ



ИЗДАТЕЛЬСТВО „ДЕТСКАЯ ЛИТЕРАТУРА“
Москва 1965

В этой книге рассказано о ламповых усилителях низкой частоты, громкоговорителях и их акустическом оформлении, о некоторых путях улучшения качества звучания радиоаппаратуры. Рассказ об основах радиоэлектроники и принципах усиления иллюстрируется схемами и описаниями радиолюбительских конструкций: радиограммофонов, высококачественных усилителей, простого школьного радиоузла, акустических агрегатов. Издательство просит отзывы об этой книге присылать по адресу: Москва, А-47, ул. Горького, 43.

Дом детской книги,

Рисунки Н. Фролова

Обложка О. Айзмана

Чертежи

В. Авдеевой, Б. Малышева, В. Микulinской, Г. Цаплина.



Г л а в а I

З В У К

Звук — конечный продукт всех радиоаппаратов, о которых будет рассказано в этой книге. Радиоузел, усилитель низкой частоты, радиограммофон, приемник, магнитофон, радиола — все они предназначены для создания определенных звуковых колебаний, чаще всего для воспроизведения музыки. Все эти аппараты, так сказать, работают на одного потребителя — на человеческое ухо. И в конечном счете наш слух выставляет им главную оценку — за качество звучания.

Качество звучания звуковоспроизводящей аппаратуры зависит от многого: в частности, от выбранной схемы и конструкции, от того, как собран усилитель, как он налажен. И конечно, качество звука очень сильно зависит от подбора и расположения самих излучателей звуковых волн — громкоговорителей. Именно с них мы и начнем знакомство со звуковоспроизводящей аппаратурой. Для этого прежде всего нуж-

но изучить продукцию, которую должен выпускать громкоговоритель, выяснить, что представляют собой звуки, которые он воспроизводит. Попутно мы коротко познакомимся с настоящими источниками звука — с некоторыми музыкальными инструментами. Не сможем мы обойтись и без знакомства с потребителем излучаемого звука — слуховым аппаратом (органом слуха) человека. Очень важно знать, как наше ухо воспринимает звуки, по каким признакам их различает, какие искажения и в какой степени фиксирует. Конечно, нужно нам поговорить и о самом звуке, о том, как возникают звуковые колебания, какими величинами характеризуются, чем похожи и чем отличаются звуки, полученные от различных источников, в чем проявляются искажения звука, как можно оценить степень этих искажений.

Именно с этих вопросов мы, пожалуй, и начнем.

Вы тронули гитарную струну...

Когда нужно найти лаконичное и четкое объяснение какого-либо слова, люди обычно обращаются к энциклопедическому словарю. Поступив подобным образом, мы сразу же запишем: «Звук — распространяющиеся в упругих средах — газах, жидкостях и твердых телах — механические колебания, воспринимаемые ухом». Оставим пока в стороне жидкости и твердые тела и посмотрим, что представляют собой звуковые колебания в газах, в частности в воздухе.

Источником звука могут быть различные колеблющиеся тела: например, хорошо известная струна. Вы тронули гитарную струну, и она пришла в движение. Струна вибрирует, быстро отклоняется то в одну, то в другую сторону от своего среднего положения, от положения покоя. Это один из примеров очень интересного вида движений, которые мы называем свободными колебаниями. Вам наверняка хорошо знакомы и другие примеры свободных колебаний, движений туда-обратно — колебания маятника, качелей, стальной линейки, зажатой в тиски.

Отчего же возникают колебательные движения? Попробуем разобраться в этом хотя бы в самых общих чертах.

Вы тронули гитарную струну и передали ей некоторую порцию энергии. Мы часто производим подобную передачу энергии, например, когда вращаем педали велосипеда, перемещаем по столу книгу или ударяем ногой по футбольному мячу. И всякий раз отданная нами энергия расходуется на какое-нибудь важное дело — на создание тепла, на борьбу

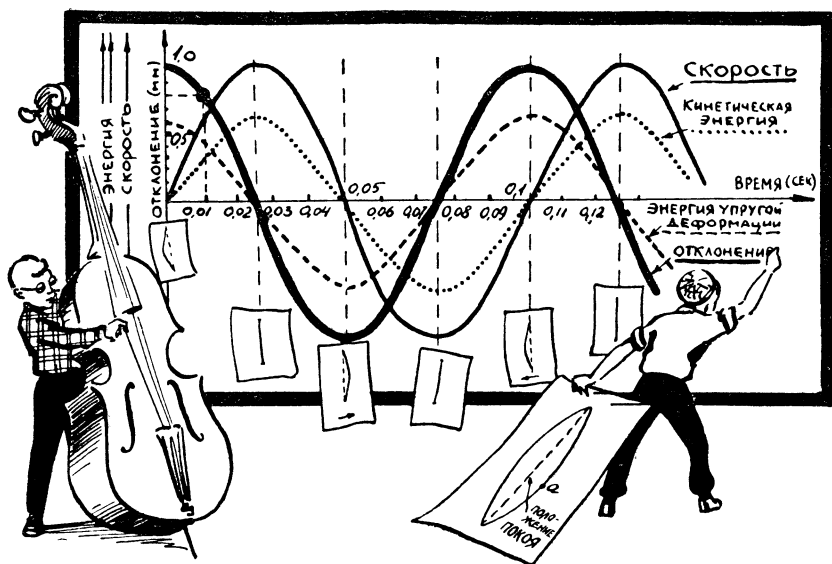


Рис. 1. В процессе свободных колебаний струны энергия упругой деформации переходит в кинетическую энергию, которая затем опять переходит в энергию упругой деформации, и т. д. При этом струна отклоняется то в одну, то в другую сторону и изменяется скорость движения струны.

с трением или сопротивлением воздуха. Одним словом, энергия сразу находит своего главного потребителя, который в основном ее и поглощает.

Иначе обстоит дело с натянутой струной. Здесь имеется сразу несколько главных потребителей энергии, причем два из них представляют для нас особый интерес — именно они заставляют струну совершать колебательные движения.

Когда мы оттягиваем струну, отводим ее от условной средней линии (рис. 1), то, естественно, затрачиваем на это какую-то энергию. Ее сразу же захватывает первый потребитель, чтобы превратить в так называемую упругую деформацию. Явление это связано с изменением внутренней структуры вещества, с его упругостью. Когда мы сгибаем (деформируем, то есть изменяем форму) стальную пружину или сжимаем (деформируем) резиновый мяч, то затрачиваем свою энергию именно на то, чтобы преодолеть силы внутренней упругости. Но затраченная энергия не уходит безвозвратно. Упругое тело, как только у него появится возможность, вернется в первоначальное состояние и почти полностью отдаст полученную энергию.

Лучше всего это видно на примере обычных часов. Заведенная пружина запасает определенную порцию энергии, а затем постепенно отдает ее, вращая многочисленные шестеренки часового механизма. Таким же образом ведет себя и упругая струна: она не потребляет, а лишь накапливает энергию и при первой возможности возвращает ее обратно. Возвращает, но кому?

Спортсмен, который обычно прыгает в длину на 7—8 м, едва перепрыгнет 3—4 м, если его лишить возможности предварительного разбега, заставить прыгать с места. Дело в том, что при разбеге спортсмен создает некоторый запас энергии, который в момент прыжка добавляет к силе своих мускулов. Физика весьма точно определяет этот запас: это не что иное, как кинетическая энергия, которой обладает любое движущееся тело, в том числе и бегущий человек. Чем больше масса тела и скорость его движения, тем больше запас кинетической энергии. Это хорошо поймет тот, кому приходилось, разогнав велосипед, долгое время катиться по инерции. Шоферы хорошо знают, что, чем больше скорость автомобиля и чем больше он нагружен, тем труднее его остановить.

Само собой разумеется, что во всех случаях кинетическая энергия не появляется сама собой. Ее накапливают с помощью мускулов, сожженного бензина, взорванного пороха, электрических сил, химических реакций, с помощью самых различных источников, способных работать, толкать, двигать, способных создавать скорость, а значит, и запасать кинетическую энергию.

Теперь можно назвать и второй потребитель энергии в колеблющейся струне. Это — движение. Энергия, которую вы передаете струне во время первого толчка, или какая-то часть ее должна быть затрачена на то, чтобы привести струну в движение, создать у нее некоторый запас кинетической энергии. Правда, запас этот струна долго в себе не хранит. В процессе колебаний она очень часто останавливается: всякий раз, когда попадает в крайнее правое или крайнее левое положение и после этого начинает двигаться в обратную сторону. Остановка длится ничтожное, неуловимое мгновение, но это настоящая остановка, полная потеря скорости. О колеблющейся струне так и говорят: в крайних точках ее скорость равна нулю. А это означает, что, попав в крайнюю точку, струна полностью теряет свой запас кинетической энергии, точнее, полностью отдает его. Кому?

Мы с вами познакомились с двумя потребителями энергии, которые существуют в натянутой струне. Было отмечено, что ни один из этих потребителей полученную энергию вечно

в себе не хранит. В обоих случаях мы сказали, что энергия куда-то передается, но не сказали, куда именно. Для того чтобы выяснить это, посмотрим (разумеется, условно) небольшой учебный кинофильм.

...В зале медленно гаснет свет. Звучит музыкальное вступление. На экране одна за другой появляются пляшущие буквы. Буквы постепенно вытягиваются в три ровные горизонтальные линии. Наконец, можно прочесть название фильма: «Свободные колебания струны». Буквы тускнеют, музыка стихает. Звучит голос диктора: «Замечательная техника современного кино позволяет показать колебания обычной струны, замедленные в несколько тысяч раз».

На экране героиня фильма — струна, натянутая вертикально между двумя массивными стойками. Струна неподвижна. Появляется рука с вытянутым указательным пальцем, который оттягивает струну в сторону. На том месте, где только что была струна, остается пунктирная прямая линия. Возле нее возникает надпись: «Положение покоя».

Голос диктора: «Натянув струну, мы затратили какую-то энергию».

Палец отпускает струну. Она начинает сначала медленно, а затем все быстрее и быстрее возвращаться к своему первоначальному положению, а затем сливается с пунктирной линией.

Диктор объясняет: «Под действием сил упругости струна вернулась в положение покоя. Но она уже не может остановиться: почти вся энергия, которую вы передали струне, теперь превратилась в кинетическую энергию движения. Только потеряв этот подарок, струна сможет вновь обрести покой».

Проскочив пунктирную линию, струна продолжает двигаться дальше и вновь изгибается, но уже в противоположную сторону. Скорость струны уменьшается.

Голос диктора: «Сейчас струна, истратив свою кинетическую энергию, остановится. Но покой будет непродолжительным. Кинетическая энергия израсходована на то, чтобы вновь деформировать струну, изогнуть ее в противоположную сторону».

Силы упругости вновь заставят струну двигаться, вновь искать потерянный покой».

Струна остановилась. И тут же начинается движение в обратную сторону. Весь цикл повторяется сначала: струна совершает колебания...

Не будем утомлять себя этим однообразным зрелищем. Покинем кинозал и попробуем обсудить то, что мы увидели,

сделать некоторые выводы и ввести определения, которые нам впоследствии пригодятся.

Для начала честно признаемся, что мы придумали не совсем удачное выражение: «потребитель энергии». Во всяком случае, первые два потребителя, с которыми мы встретились, — упругая деформация и движение струны, совсем не потребляют энергии, а лишь на время накапливают ее. Чтобы восстановить справедливость, в дальнейшем мы их будем называть не «потребители», а «накопители».

Оба накопителя тесно связаны друг с другом. Когда один из них отдает энергию, другой ее с жадностью поглощает, но лишь для того, чтобы через некоторое время вернуть обратно. Таким образом накопители непрерывно обмениваются той порцией энергии, которую один из них получит при первом толчке струны. В процессе этого обмена струна и совершает движения «туда и обратно», совершает колебания.

О том, как происходят колебания, может довольно подробно рассказать особый рисунок — график (рис. 1). Его основа — две взаимно перпендикулярные линии, которые называют осями координат. Горизонтальная ось размечена в единицах времени: например, в секундах или в долях секунд. Ось времени очень напоминает циферблат секундомера или часов, вытянутый в прямую линию. «Нулевое время», то есть точка, которая находится в начале координатной оси, на нашем графике соответствует началу колебаний — моменту, когда была отпущена предварительно натянутая струна.

Вертикальная ось размечена в единицах длины. По ней мы будем отсчитывать отклонение струны (точнее, отклонение точки *A*) от пунктирной линии «положение покоя».

Так, например, если известно, что через *0,01 сек* струна отклонилась на *0,8 мм*, то на графике мы поставим точку в том месте, где пересекаются две линии. Одна из них поднимается от оси времени — от деления «*0,01 сек*», другая линия идет от оси отклонений — от деления «*0,8 мм*». Таким образом, каждая точка на графике стоит на перекрестке «двух дорог» и одновременно указывает две величины: время и соответствующее этому времени отклонение струны.

Чтобы по графику можно было понять, в какую сторону отклонилась струна, мы пойдем на небольшую хитрость: проведем две одинаковые вертикальные оси — одну вверх от оси времени, другую вниз. По верхней оси будем отмечать отклонения вправо, по нижней — влево. Понятия «вправо» и «влево» в данном случае, разумеется, чистая условность. Мы вводим их лишь для того, чтобы подчеркнуть — струна отклоняется то в одну, то в другую сторону от пунктирной линии,

которая соответствует положению покоя. Очень часто вводят условные положительное (+) и отрицательное (—) направления. Независимо от названия важно понимать одно: точки, которые находятся сверху от оси времени, и точки, расположенные ниже этой оси, соответствуют двум различным направлениям отхода от условной пунктирной линии.

Если регулярно отмечать отклонение струны¹, то в итоге на графике появится большое число точек. Соединив их, мы получим кривую линию, которая подробно расскажет о ходе колебаний. Эту линию так и называют — «кривая» и говорят: «Кривая пошла вверх...», «Кривая падает...», «Кривая сложной формы...» А иногда вместо слова «кривая» говорят «график».

Можно построить график не только для отклонения струны, но и для ее скорости. Можно также построить графики, которые покажут, как в процессе колебаний изменяются запасы энергии в каждом из двух накопителей (рис. 1).

Сравнивая все эти графики, нетрудно заметить, что в момент наибольшего отклонения скорость струны равна нулю. В этот же момент равна нулю и кинетическая энергия, а энергия упругой деформации максимальна. И наоборот, скорость движения, а значит, и кинетическая энергия достигают максимальной величины, когда струна проходит пунктирную линию нулевого отклонения.

Введем несколько важных определений. Наибольшее значение какой-либо величины, меняющейся в процессе колебаний, называется амплитудой. По графикам можно определить амплитуду отклонения, скорости, энергии упругой деформации (потенциальная энергия) и кинетической энергии струны. Две последние величины почти равны, так как накопители почти полностью передают друг другу запасы энергии. Для чего нам пришлось ввести слово «почти», будет сказано несколько позже.

Время, в течение которого проходит полный цикл колебаний и струна возвращается в исходное (крайнее) положение, называется периодом. В нашем примере период составляет 0,1 сек.

Иногда весь период колебаний рассматривают по частям. Например, говорят о положительном и отрицательном полупериодах, имея в виду разные направления движения струны. Заметим, что в течение одного периода каждая из перемен-

¹ При быстрых колебаниях струны человек, разумеется, не успеет выполнить всех этих операций, но это не значит, что они вообще не выполняемы. Существуют электронные приборы, например, осциллографы, которые успевают «следить» за быстрыми процессами и строить их графики.

ных величин — отклонение, скорость, запасы энергии — дважды достигает амплитудного значения: во время положительного и отрицательного полупериодов.

Период характеризует скорость колебательного процесса: чем больше период, тем медленнее протекают колебания. Однако для характеристики скорости чаще пользуются другой величиной — частотой. Частота — это число периодов, которое приходится на единицу времени. Единицей измерения длины служит метр, веса — килограмм, а единицей частоты — герц. Один герц (сокращенно *гц*) соответствует одному периоду за одну секунду. Так, например, в нашем примере период длится 0,1 *сек*, значит, на 1 *сек* приходится 10 периодов и частота равна 10 *гц*. При более быстрых колебаниях частота выше. Например, если период равен 0,01 *сек*, частота составляет 100 *гц*.

Период, а значит, и частота собственных колебаний струны зависят от скорости обмена энергией между ее накопителями. Чем быстрее происходит этот обмен, тем выше частота колебаний. Это правило можно проиллюстрировать многими наглядными примерами. Чем толще струна, тем больше ее масса, тем медленнее она набирает и снижает скорость, дольше накапливает и отдает кинетическую энергию. Именно поэтому у толстых струн частота собственных колебаний меньше, чем у тонких. Частота собственных колебаний зависит и от натяжения струны. Чем сильнее струна натянута, тем резче действуют силы упругости, тем быстрее проходит процесс обмена энергией и, следовательно, выше частота колебаний этой струны.

В заключение нужно еще ввести понятие о мгновенном значении и о фазе.

С первым термином дело обстоит довольно просто: сам смысл слов «мгновенное значение» указывает, что речь идет о значении какой-то величины в какой-то определенный момент времени. Так, в нашем примере (рис. 1) для момента 0,01 *сек* мгновенное значение отклонения равно 0,8 *мм*, а для момента 0,02 *сек* струна отклонена на 0,3 *мм*. Для моментов: 0,025 *сек* и 0,075 *сек* мгновенные значения скорости достигают амплитуды, а для моментов 0,05 *сек* и 0,1 *сек* скорость равна нулю.

Теперь поговорим о фазе. Допустим, что мы едем в поезде, который идет точно по расписанию. Если следить за временем, то можно подсчитать, сколько километров мы уже проехали, отметить на карте то место, где в данный момент движется поезд, или, иными словами, определить мгновенное значение пройденного пути.

Но можно решить и обратную задачу: пользуясь расписанием, можно по названиям станций безошибочно отсчитывать время. Тот момент времени, когда поезд проходит мимо какой-либо станции, мы будем называть фазой этой станции. В своем блокноте вы сможете составить таблицу такого типа: станция I — фаза 14 час 25 мин, станция II — фаза 15 час 10 мин, станция III — фаза 16 час и т. д.

Рассматривая колебания струны для каждого мгновенного значения той или иной переменной величины (отклонение, скорость, энергия), можно указать соответствующий этому значению момент времени. Так, в частности, отклонение влево на 0,8 мм наступит в момент 0,01 сек, а такое же отклонение вправо — в момент 0,04 сек. Положительная амплитуда скорости наступает в момент 0,025 сек, а отрицательная — в момент 0,075 сек.

Каждый такой момент времени и есть фаза для данного мгновенного значения скорости или отклонения. Иными словами, фаза амплитуды отклонения вправо — 0 и 0,1 сек, влево — 0,05 сек, амплитудной скорости 0,025 сек и 0,075 сек и т. д.

В дальнейшем мы часто будем говорить о фазе, но измерять ее будем не в секундах, а в градусах. Нет, это не ошибка, именно в градусах принято указывать фазу для всех мгновенных значений и для всех величин, изменяющихся

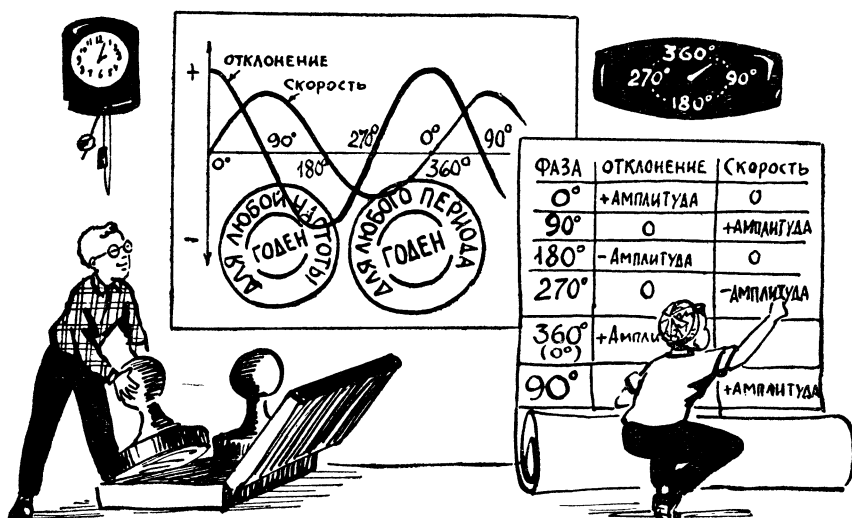


Рис. 2. Весь период, независимо от частоты колебаний, принято делить на 360 условных единиц времени — градусов. Половина периода делится на 180°, четверть периода — на 90° и т. д.

в процессе колебаний. В данном случае градусы — это совсем не те единицы, которые служат для измерения температуры. Для измерения фазы служит совсем другой градус (в переводе на русский язык это слово означает «шаг», «ступень»). Весь период разбивают на 360 равных частей, и каждую такую часть называют градусом. Иными словами, градус — это время, соответствующее $\frac{1}{360}$ части периода. Теперь мы можем

сказать, что фаза положительной амплитуды скорости равна 90° , отрицательной амплитуды — 270° , фазы нулевой скорости — 0° , 180° и 360° . Точно так же в градусах можно указать фазу для любого мгновенного значения на графиках отклонения кинетической энергии и энергии упругой деформации (рис. 2).

Вы, дорогой читатель, наверняка недовольны. Для чего вместо удобных и привычных единиц времени — секунд — вводить какие-то градусы? Да и зачем вообще нужно вводить понятие о фазе колебаний? На каждый из этих вопросов можно подготовить весьма обстоятельные ответы, высказать много «за», дать целый ряд пояснений. Но мы ограничимся только двумя пояснениями — по одному на каждый вопрос.

Первое. Наш поезд идет по кругу — все движения струны регулярно повторяются, период следует за периодом, переменные величины проходят одни и те же значения. Как правило, не нужно, а часто и невозможно следить за всем ходом колебаний, за всеми периодами. Достаточно выбрать один типичный период и познакомиться с ним. Ну, а для такого типичного периода уже неважно, когда он начался, когда кончился, и фазу удобно отсчитывать в долях целого периода, в градусах.

Второе. На практике нам обычно приходится иметь дело сразу с большим числом колебаний и очень часто необходимо знать, как они взаимодействуют друг с другом. Отвлечемся на время от нашей излюбленной струны и обратимся к графикам на рис. 3. На каждой паре этих графиков одновременно показан ход колебаний двух одинаковых маятников.

В первом случае маятники двигаются с одинаковыми фазами, как принято говорить, синфазно: амплитудные отклонения в обе стороны происходят в один и тот же момент времени.

На второй паре графиков показан случай сравнительно небольшого сдвига (небольшой разницы) фаз. Фаза второго маятника запаздывает на $\frac{1}{8}$ часть периода, то есть на 45° .

И, наконец, на третьей паре графиков показан весьма распространенный случай противофазных колебаний. Фазы сдви-

нуты на $\frac{1}{2}$ периода — положительная амплитуда второго маятника запаздывает по отношению к первому на 180° . В любой момент времени оба маятника движутся с одинаковой скоростью, но в противоположные стороны. Кстати, когда говорят о сдвиге фаз, то слова «запаздывает» и «опережает» имеют весьма относительный смысл. Так, например, сказать «запаздывает на 90° » — это то же самое, что сказать «опережает на 270° ».

Приведенный пример колебаний двух маятников может иметь лишь чисто учебное значение, если они никак не связаны друг с другом. В этом случае можно не обращать внимания на существующие сдвиги фаз. А теперь представьте себе случай, когда оба маятника выполняют общую работу: например, совместно регулируют ход одних часов. Вот здесь-то фазовые сдвиги уже играют решающую роль. В первом случае маятники действуют согласованно. Во втором это согласование несколько нарушается. Ну, а в третьем случае маятники действуют друг против друга, и результаты их совместного труда равны нулю. Это лишь один из многочисленных примеров, показывающих, какую важную роль могут играть фазовые соотношения.

После двух частных пояснений хочется сделать еще одно — общее.

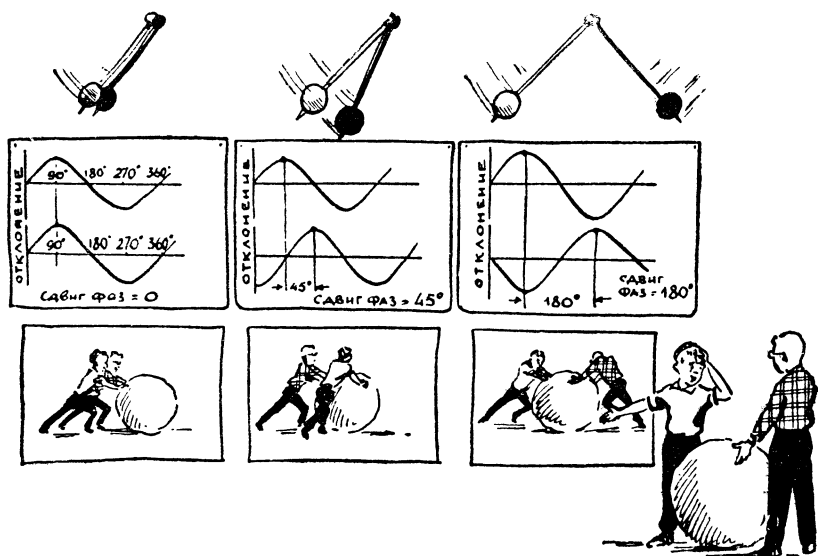


Рис. 3. При наблюдении колебания двух маятников (струн, качелей и т. п.) может оказаться полезным оценить сдвиг фаз этих колебаний.

Все затраты времени на знакомство с колебаниями гитарной струны имеют весьма далекий прицел. Различные виды механических и электрических колебаний будут встречаться на протяжении всей книги, и всякий раз мы будем пользоваться уже знакомыми терминами, понятиями, характеристиками, такими, как «период», «амплитуда», «обмен энергией», «частота», «сдвиг фаз», и другими. Поэтому то, чем мы сейчас занимаемся, можно рассматривать как закладку фундамента, на котором предстоит построить целый архитектурный ансамбль с довольно солидными корпусами «Электроакустики», «Усилителей» и «Радиоузлов».

Мы уже рассмотрели все основные процессы, связанные с колебаниями струны, ввели их основные характеристики. Теперь остается выполнить данное обещание — пояснить, для чего раньше, рассказывая о том, что накопители полностью передают друг другу свои энергетические запасы, мы вынуждены были осторожно вставить слово «почти». За пояснениями придется еще раз отправиться в кинозал.

Звучит голос диктора:

«Струну заставляет двигаться энергия упругой деформации...»

«...она уже не может остановиться».

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

«Струну заставляет двигаться энергия упругой деформации...»

На экране мелькают знакомые кадры, струна двигается туда и обратно точно так же, как и в момент возникновения колебаний. И все же что-то в ее движении изменилось, колебания проходят «так да не так». Внимательно присматриваемся... Ну что ж, кажется, ясно — за время нашего отсутствия заметно уменьшилась амплитуда колебаний. Теперь струна медленнее проходит мимо линии покоя, меньше отклоняется от нее. Колебания постепенно затухают. Это естественно — мы знаем, что ни одна струна не звучит вечно. Причину затуханий можно определить одним словом — «потери».

Всякий раз при перекачивании энергии из одного накопителя в другой какая-то ее часть теряется. Теряется на то, чтобы преодолеть сопротивление воздуха, преодолеть внутреннее трение в самой струне. Отобранная таким образом у струны энергия в итоге превращается в тепло, которое, как в бездонную бочку, уходит в просторы воздушного океана. При этом энергетические запасы струны постепенно уменьшаются, уменьшаются амплитуда скорости и амплитуда отклонения, колебания постепенно затухают.

Среди нескольких видов потерь энергии у струны есть, если можно так выразиться, полезные потери. Во всяком случае, эти потери, а точнее говоря, затраты энергии, полезны для настоящей струны, колебания которой дают звук.

Звук на анализе

Вы тронули гитарную струну. Она пришла в движение, увлекла за собой окружающий воздух, и во все стороны от колеблющейся струны пошли звуковые волны. В самых общих чертах процесс образования и распространения звуковых волн выглядит так.

Двигаясь, струна сжимает воздух впереди себя, создает повышенное давление. Разумеется, область с повышенным давлением не может оставаться изолированной. Давление передается соседним участкам, и от струны катится своеобразный вал сжатого воздуха.

Но струна не просто движется — она совершает колебания. Это значит, что через некоторое время струна пойдет в обратную сторону, и там, где только что происходило сжатие воздуха, начнется его разрежение. Пониженное давление также передается соседним участкам, и вслед за валом сжатия следует вал разрежения. Затем струна вновь меняет направление, и за разреженной областью появляется область сжатия, за ней опять разрежение и т. д., до тех пор пока струна колеблется. Бегущие одна за другой области сжатия и разрежения — это как раз и есть звуковые волны.

Звуковые волны чем-то напоминают волны на поверхности воды. Гребень морской волны можно сравнить с областью сжатого воздуха, впадину — с областью разрежения. В обоих случаях само вещество — воздух либо вода — не переносится вместе с волной, а лишь совершает колебание: поднимается — опускается, либо сжимается — разрежается.

У морских волн колебания происходят перпендикулярно направлению движения самой волны — волна движется горизонтально, а вода колеблется вверх-вниз. Такие волны называют поперечными. У звуковой волны колебания направлены вдоль линии распространения, проще говоря — вперед-назад. Поэтому звуковые волны называют продольными. Кстати, продольные волны могут распространяться в воде так же, как и в любой другой жидкости или твердом теле. При этом происходит ничтожное, измеряемое микронами и миллионными долями микрона, смещение вещества вперед-назад.

Вернемся к «учебной» струне, график колебаний которой

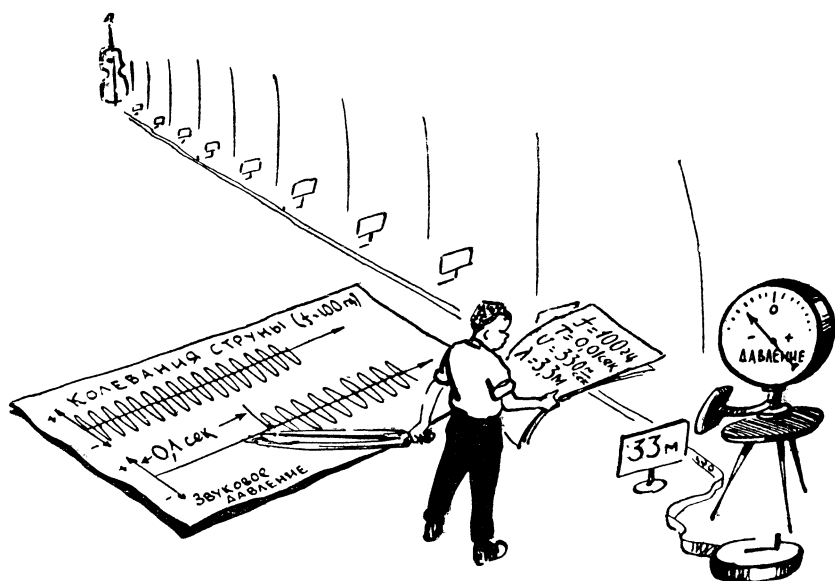


Рис. 4. График изменения звукового давления как бы повторяет график колебаний струны. Запаздывание звука зависит от расстояния до звучащего тела (струна) и может быть подсчитано, исходя из того, что скорость звука в воздухе при 0° примерно равна 330 м/сек.

приведен на рис. 1. Поместим на некотором расстоянии от струны манометр, который будет измерять давление воздуха, и будем записывать все результаты измерений (рис. 4). Мы вводим такой прибор, конечно, условно: для нас это как бы мысленный эксперимент. Но такие измерения все же можно сделать с помощью электронных приборов.

Отрегулируем манометр так, чтобы он показывал лишь отклонение давления воздуха от обычной величины. Это значит, что при нормальном атмосферном давлении прибор покажет нуль. Под действием звуковых волн стрелка манометра будет отклоняться то в одну, то в другую сторону, показывая то сжатие (+), то разрежение (—). График изменения звукового давления (часто его называют графиком звуковых колебаний) в точности повторяет график изменения скорости струны. Здесь, правда, нужно сделать оговорку. Все графики, приведенные на рис. 1 (отклонения, скорости, энергии), очень похожи, и поэтому график звука можно зачислить в «родственников» к любому из них. И все же мы будем считать, что

звуковое давление следует за изменением скорости: чем быстрее движется струна, тем большее давление она создает.

Сравнивая графики колебаний струны и звуковых колебаний, сразу же введем уже знакомые нам основные характеристики, или, как принято говорить, параметры звука: период, частоту, фазу, мгновенное значение и амплитуду. Разумеется, все эти параметры теперь относятся к звуковым колебаниям, то есть к изменению давления воздуха. Что касается периода, частоты и фазы, то с этими параметрами дело обстоит довольно просто — они, как и прежде, измеряются в секундах, герцах, градусах. А вот амплитуда и мгновенные значения должны быть выражены в единицах давления.

Как известно, давление говорит о той силе, которая действует на определенную поверхность. Поэтому единица давления представляет собой единицу силы, или, что то же самое, единицу веса, отнесенную к единице площади. В новой международной системе единиц СИ давление измеряют в ньютонах на квадратный метр, или, сокращенно, н/м^2 . Ньютон (н) в системе СИ — это величина силы (веса), которая примерно равна 92 г. Таким образом, если на стандартный лист фанеры площадью около 2 м^2 мы выльем стакан воды (вес около 200 г) и равномерно распределим эту воду по листу, то каждый его участок будет испытывать давление около 1 н/м^2 .

Единицей звукового давления н/м^2 стали широко пользоваться сравнительно недавно, и в литературе прежних лет вы встретите другую единицу — *бар* (дин/см^2), который в 10 раз меньше 1 н/м^2 , то есть $1 \text{ н/м}^2 = 10 \text{ бар}$; $1 \text{ бар} = 0,1 \text{ н/м}^2$.

Если вы захотите сказать, насколько сильный звук действует в какой-либо точке пространства, то наверняка назовете величину звукового давления в этой точке. Но какую величину надо назвать? Мгновенное значение ни о чем не скажет, так как оно непрерывно меняется. Называть амплитуду тоже не совсем правильно — ведь амплитудное давление бывает сравнительно редко, всего два раза за период, а все остальное время звуковое давление значительно меньше.

Когда говорят о звуковом давлении, то обычно имеют в виду его так называемую эффективную величину. Она учитывает тот эффект, который производит звуковая волна в среднем за весь период, и поэтому эффективная величина всегда меньше амплитуды. Так, в частности, для звуковых колебаний, график которых показан на рис. 4, эффективное звуковое давление меньше амплитудного на 30%. В дальнейшем, когда мы будем говорить о звуковом давлении, то всегда будем иметь в виду эффективное, или действующее, значение.

Если поместить на пути звуковой волны легкую пластинку,

например листок бумаги, то волна заставит эту пластинку двигаться, совершать колебания. Как мы увидим дальше, такие вынужденные колебания тонких пластинок-мембран лежат в основе работы многих музыкальных инструментов, микрофонов, человеческого уха.

О способности звуковой волны выполнять работу, например раскачивать листок бумаги, можно судить по звуковому давлению. Однако чаще работоспособность волны характеризуют так называемой интенсивностью или силой звука. Величина эта показывает, какая звуковая мощность приходится на единицу поверхности, на которую падает волна звука. В системе СИ единицей силы звука служит ватт на квадратный метр — вт/м^2 . Раньше пользовались другой единицей: мощность относили к площади в квадратный сантиметр — $1 \text{ вт/см}^2 = 10\,000 \text{ вт/м}^2$; $1 \text{ вт/м}^2 = 0,0001 \text{ вт/см}^2$.

Если бы марсианину, прилетевшему на Землю, сказали, что у нас единицей длины служит метр, а единицей времени — секунда, то он наверняка попросил бы, чтобы ему пояснили, много это или мало. Так и вы, по-видимому, тоже хотите знать, как выглядят и «чего стоят» применительно к звуковым волнам единицы н/м^2 и вт/м^2 . В дальнейшем мы часто будем встречаться с этими единицами, а пока для их характеристики приведем лишь три примера.

Шорох листьев на расстоянии 1 м создает звуковое давление около $0,0001 \text{ н/м}^2$ (это в 10 тысяч раз меньше, чем давление стакана воды, распределенной по листу фанеры) и силу звука около $0,000\,000\,000\,01$ (10^{-11}) вт/м^2 . На шумной улице звук, конечно, намного громче. Звуковое давление здесь достигает $0,2 \text{ н/м}^2$, а сила звука $0,0001 \text{ вт/м}^2$. Наконец, мощный реактивный двигатель на расстоянии 5 м создает звуковое давление 20 н/м^2 и силу звука около 1 вт/м^2 .

Следующие два параметра звука, с которыми нам предстоит познакомиться, — это скорость распространения и длина волны.

Если вы взглянете на график звука и график колебаний струны (рис. 4), то сразу же заметите их различие — звуковые колебания несколько запаздывают. В нашем примере они в точности следуют за всеми колебаниями струны, но следуют с опозданием на $0,1 \text{ сек}$. Это время необходимо звуковой волне для того, чтобы добежать от струны до той точки, где мы измеряем давление. Если измерить расстояние между струной и нашим воображаемым манометром, то можно подсчитать скорость распространения звуковой волны. Скорость звука, измеренная таким способом в различных веществах, приведена в табл. 1. Можно решить и обратную задачу. Взяв из

этой таблицы скорость звука в воздухе (330 *м/сек*) и вспомнив, что опоздание звука составляет 0,1 *сек*, мы легко определим расстояние между струной и манометром. Оно составляет 33 *м*. Подобным же образом, заметив, на сколько секунд запаздывает гром, легко подсчитать расстояние до места вспышки молнии.

Т а б л и ц а 1

Скорость звука в различных веществах
(в метрах в секунду — *м/сек*)

Воздух 0°C	331	Керосин	1300
Воздух 20°C	344	Масло льняное	1770
Водород	1284	Алюминий	5080
Углекислый газ	259	Лед	3280
Гелий	965	Сталь	5050
Вода	1497	Пробка	500
Вода морская	1550	Резина	46

Что такое длина звуковой волны, легко понять, если вспомнить наше старое сравнение — с морскими волнами. Там длиной волны называют расстояние между двумя ближайшими гребнями или двумя ближайшими впадинами. Аналогично для звука длина волны — это расстояние между двумя ближайшими участками с максимальным (амплитудным) давлением или максимальным разрежением воздуха.

Длина звуковой волны зависит от частоты и скорости распространения звука. Чем выше частота, тем чаще следуют друг за другом области сжатия и разрежения, тем, следовательно, короче волна. А с увеличением скорости звука длина волны, наоборот, увеличивается. Чем быстрее распространяется звук, тем дальше успевает уйти один гребень от другого, тем больше расстояние между ними.

Нужно сказать, что акустика имеет дело со сравнительно короткими волнами. Так, например, при частоте 100 *гц* длина звуковой волны 3,3 *м*; частоте 500 *гц* соответствует волна 66 *см*, а частоте 20 *кгц* — 1,7 *см*. Данные эти относятся только к воздуху, к скорости звука 330 *м/сек*. В другой среде, с иной скоростью распространения звука, и длина волны будет иной. Так, в воде звук распространяется намного быстрее, и за время одного периода гребень звукового давления успевает пройти в четыре раза большее расстояние, чем в воздухе. Поэтому расстояние между гребнями, то есть длина вол-

ны в воде, также в четыре раза больше. Для приведенных выше значений частоты мы получим примерно такие длины волн: 14 м, 280 см и около 7 см.

Для распространения звука в плотной среде, в частности в жидкости, важна еще одна особенность. Звуковые волны, особенно самые длинные, не встречают значительного сопротивления, хорошо сохраняют энергию, полученную от излучателя, и поэтому проходят весьма большие расстояния. Это позволяет пользоваться звуком для дальней подводной звуковой связи, пеленгации и локации. Гидролокатор, подобно нашей струне, посылает в подводное царство звуковые волны и внимательно «слушает», когда и откуда вернется эхо. Своеобразным гидролокатором является широко распространенный прибор — эхолот. Улавливая отраженный от дна звук, он определяет глубину водоема. Эхолот используют также для обнаружения косяков рыбы.

Другой прибор — гидроакустический пеленгатор — только «слушает». Он обнаруживает на большом расстоянии невидимый источник подводного звука — например, работающий корабельный двигатель. Существуют и подводные звуковые маяки, по сигналам которых капитаны могут вести свои корабли.

Вы можете и сами понаблюдать, насколько хорошо вода проводит звуковые волны. Когда будете нырять в реке или в море, прислушайтесь к подводным звукам. Вы услышите, как у берега волна играет камешками, услышите, как стучит двигатель проходящего вдали парохода.

Легко убедиться и в том, что звук хорошо распространяется в твердых телах. Приложив ухо к железнодорожному рельсу, можно услышать шум приближающегося поезда задолго до его появления, когда звуки, идущие по воздуху, еще совсем не слышны. Подобным образом интересно послушать и водопроводную трубу — она может «донести» до вас много далеких шумов.

В технике широко используют специальные приборы — акустические дефектоскопы, которые следят за тем, как проходит звук по твердому телу. С их помощью удастся обнаружить невидимый дефект в ответственной детали, например раковину в стальном вале электрогенератора или трещину в бетонном фундаменте будущего дома.

Можно рассказать много интересного о свойствах звуковых волн, о том, как акустика помогает самым различным областям науки и техники, о новых акустических приборах. Однако пора возвращаться к своей главной задаче — к знакомству с характеристиками звуковых колебаний. Сейчас

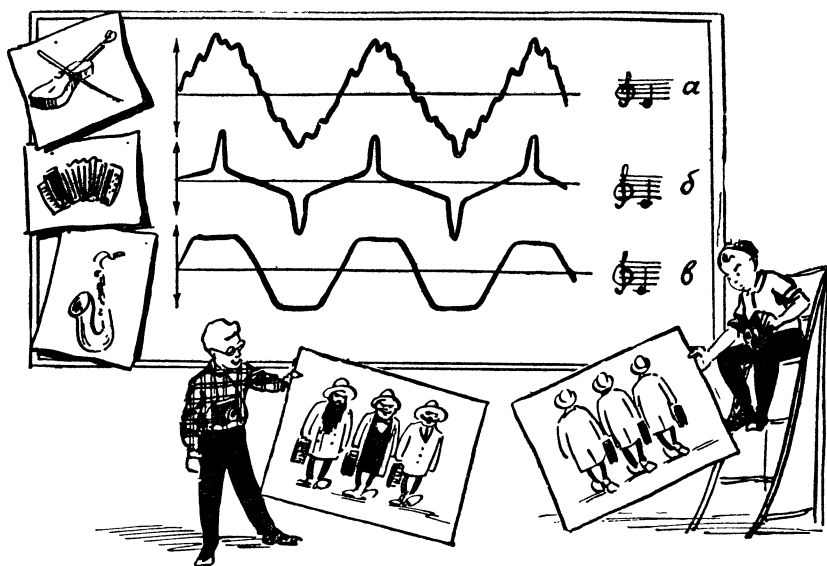


Рис. 5. Одинаковые по высоте (частоте) звуки, исполненные на различных музыкальных инструментах, звучат по-разному. Характер звучания определяется формой кривой (спектром).

предстоит познакомиться с еще одной характеристикой, еще одним и, кстати говоря, исключительно важным понятием. Имя ему — спектр.

Для начала поясним, почему мы называли спектр «исключительно важным» понятием. Представьте себе, что несколько музыкантов, например, пианист, скрипач, баянист и трубач, взяли на своих инструментах одну и ту же ноту. Забегая немного вперед, скажем, что при этом все четыре инструмента создают звуковые волны с одним и тем же периодом. Можно рассадить музыкантов так, что в определенной точке все четыре звуковые волны будут создавать и одинаковое давление. Но никаким способом не удастся добиться, чтобы звуки, идущие от разных инструментов, были неотличимо похожи друг на друга. Вы прекрасно знаете, что скрипка и труба всегда звучат по-разному даже тогда, когда берут одну и ту же ноту.

Чем же отличаются, казалось бы, одинаковые звуки, исходящие из разных инструментов? Они отличаются пока еще загадочным для нас спектром.

Очень часто учебная модель какого-либо прибора или аппарата устроена намного проще оригинала. Делают это для

того, чтобы сразу не запугивать ученика и сложность реальной техники раскрывать перед ним постепенно. Исходя из подобных побуждений, и мы выбрали для первого знакомства чрезвычайно упрощенный образец звуковых колебаний (рис. 1 и 4). В основном, было сделано два упрощения, два отклонения от истины, и, пожалуй, сейчас можно честно рассказать о каждом из них.

На рис. 5 приведено несколько графиков реальных звуков. Во многом все они похожи: имеют одинаковый период колебаний, одинаковую амплитуду. В то же время сразу видно, что все эти звуки сильно отличаются один от другого и от «учебного» (рис. 1 и 4). Они отличаются формой кривой. А за этими, казалось бы, сухими словами «форма кривой» скрывается очень многое — весь ход изменения звукового давления. Вы видите, что в одном случае (рис. 5, а) звуковое давление изменяется очень неуверенно — в течение каждого полупериода оно несколько раз становится то больше, то меньше. Второй график (рис. 5, б) показывает, что сжатие и разрежение существует лишь небольшую часть периода, а все остальное время звуковое давление близко к нулю. Совсем иначе проходят колебания в третьем случае (рис. 5, в). Здесь звуковое давление почти весь период действует с наибольшей амплитудной силой.

Кроме уже знакомой струны, существует огромное множество источников звука, которые создают самые разнообразные звуковые колебания с самой причудливой формой кривой. Наше ухо, а мы его называли главным потребителем звуковых волн, довольно точно различает все эти звуки. Иными словами, ухо каким-то образом оценивает не только силу, не только частоту звука, но и форму кривой его графика.

Из всего сказанного придется сделать невеселый вывод. Путешествуя по зоопарку, мы не заметили слона; изучая звуковые колебания, не ввели очень важный для них параметр — форму кривой. Но как только захотим исправить эту ошибку, то сразу же столкнемся с серьезными, на первый взгляд даже непреодолимыми трудностями. Как можно точно оценить форму графика? В каких единицах ее измерять? Как сравнивать разные по форме кривые, отмечать их сходство или различие?

Для начала попробуем решить подобную задачу из другой области. Представьте себе, что вам нужно, пользуясь картой, измерить площадь какого-либо водоема, например Черного моря. В этом случае можно поступить так: разбить всю поверхность моря на квадраты, посчитать площадь каждого из них, а затем все полученные результаты сложить. При этом на карте разместятся два-три больших квадрата, несколько

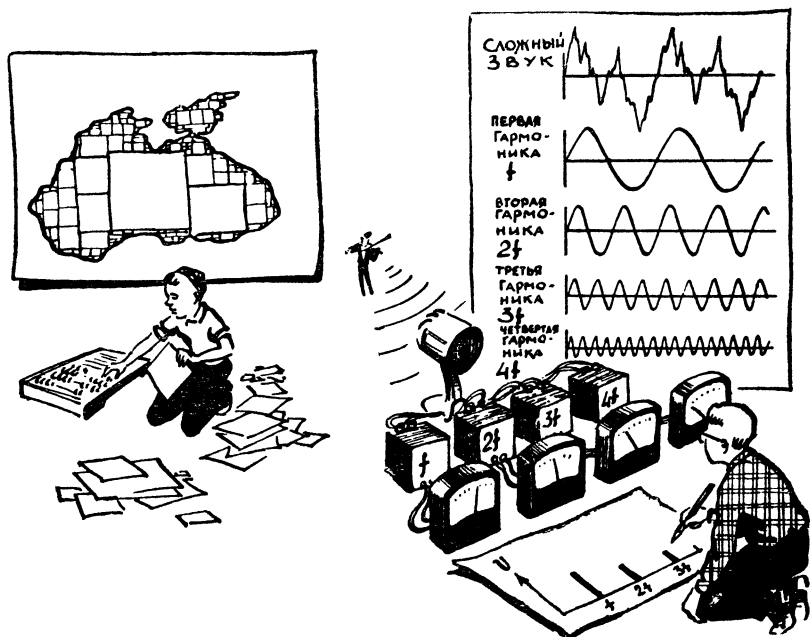


Рис. 6. Звук сложной формы можно представить в виде суммы простейших синусоидальных составляющих (гармоник) с разными частотами и амплитудами. Такой набор синусоидальных составляющих называется спектром сложного звука.

квадратов поменьше и, наконец, множество мелких и мельчайших квадратиков, которые точно воспроизведут сложные очертания морских берегов (рис. 6).

Подобным же образом для оценки формы кривой какого-либо звука его можно представить как сумму каких-то составляющих — звуков с разными амплитудами, частотами и фазами, но с одинаковой стандартной формой кривой. В этом случае сравнительно просто описать форму графика любого, самого сложного звука. Нужно лишь назвать набор стандартных составляющих, которые в сумме дадут этот сложный звук.

То, что сложную геометрическую фигуру можно представить в виде суммы более простых фигур, в частности квадратов, ясно и без особых рассуждений. А вот можно ли подобную операцию суммирования производить со звуковыми колебаниями? Оказывается, можно.

Если в точку, где расположен измеритель звукового дав-

ления, направить две звуковые волны, то прибор не будет в отдельности реагировать на каждую из них, а покажет суммарное давление. Это как раз и означает, что для получения звуковых колебаний сложной формы достаточно сложить, то есть заставить совместно работать, определенный набор простых по форме звуков. И наоборот, всякий сложный звук можно разложить на более простые составляющие.

Пока слово «можно» мы применили условно, имея в виду «в принципе можно». Однако в дальнейшем вы познакомитесь с приборами, которые без всяких условностей, в буквальном смысле слова могут разложить сложный звук на набор простых составляющих. Кстати, один из таких приборов — это наше ухо.

Из чего же нужно исходить при выборе стандартной составляющей для разложения сложных звуков?

Какому из многочисленных простых графиков здесь следует отдать предпочтение?

Решать эти вопросы нам уже не придется — составляющая, наиболее удобная для разложения сложных колебаний, в том числе и сложных звуков, уже выбрана.

Выбор пал на простейшую кривую, известную под названием «синусоида». Примером синусоидальных (иногда говорят, гармонических) колебаний может служить «учебный» звук, а его график (рис. 4), так же как и график колебаний «учебной» струны и маятника (рис. 1 и 3), представляет собой типичную синусоиду. Чем же привлекла к себе внимание эта кривая?

Прежде всего нужно сказать, что синусоиду выбрала сама природа. Природа создала прибор — ухо животных и человека, которое может выделять из сложного звука простейшие составляющие, причем именно синусоидальные. Синусоида — очень популярная кривая. Графики бесчисленного множества различных колебаний — электрических, механических, световых, молекулярных, химических — имеют вид синусоиды или, во всяком случае, очень ее напоминают. Ну, и в заключение отметим, что, по-видимому, нужно было сказать в самом начале. Синусоида обладает рядом замечательных математических свойств, благодаря которым природа «считает» самым естественным, самым удобным, самым простым видом колебаний именно синусоидальные.

Итак, будем считать, что выбор сделан. Теперь, чтобы описать форму кривой сложного звука, достаточно указать эквивалентный ему набор синусоидальных колебаний, который называется спектром сложного звука. Спектр принято изображать в виде особого графика, напоминающего частотол

(рис. 6). Из этого графика сразу же видно, каковы частоты отдельных составляющих и какую амплитуду имеет каждая из них.

В начале XIX века французский математик Жан Батист Жозеф Фурье предложил формулы, по которым можно вычислить амплитуды всех синусоидальных составляющих сложного звука. Одновременно было доказано: если рисунок на графике сложного звука периодически повторяется, то в спектре наверняка будут гармоники — синусоидальные (гармонические) составляющие с частотами, кратными основной частоте, то есть частоте сложного звука. Так, например, если основная частота $f = 100$ гц, то в спектре будут составляющие с частотами 100 гц (первая гармоника, частота f), 200 гц (вторая гармоника, частота $2f$), 300 гц (третья гармоника, частота $3f$) и т. д. Как правило, чем выше номер гармоники, тем меньше ее амплитуда. Математическое описание спектра, составленного из гармоник, носит название «ряд Фурье».

Потом мы в основном будем иметь дело с периодическими звуками, спектр которых состоит только из гармоник. Если же в спектр, кроме гармоник, придется вводить еще какую-нибудь составляющую, то мы будем считать, что это «ЧП» — чрезвычайное происшествие, и сразу же обратим на него внимание.

Научившись с помощью спектра — набора гармоник — точно описывать форму сложной кривой, мы в какой-то мере исправили первое упрощение, сделанное при знакомстве с «учебной» струной. Струна не создает синусоидальные колебания, как это показано на рис. 1, и спектр колебаний реальной струны содержит целый ряд гармоник (рис. 6).

Знакомясь с колебаниями струны, мы сделали еще одно упрощение, и его также следует исправить. Для этого достаточно сильнее натянуть «учебную» струну, чтобы в несколько раз повысить частоту ее колебаний. Без этого колебания воздуха, которые создает струна, вообще нельзя будет считать звуком. Почему?

Как видно из графиков, период колебаний в нашем примере составляет 0,1 сек, а значит, частота равна 10 гц. В то же время ухо воспринимает акустические колебания с частотами от 16 гц до 22 кгц. Слышимым звуком можно называть только те колебания, которые укладываются в этот диапазон. Неслышимые акустические колебания с частотой ниже 16 гц называют инфразвуком, а выше 22 кгц — ультразвуком.

Более подробно об этом будет рассказано в следующем разделе, который в основном посвящен замечательному творению живой природы — органу слуха.

„Я вас слушаю!..“

Когда вы отвечаете на телефонный звонок или просто обращаетесь к собеседнику, то не задумываетесь о том, что стоит за простым выражением: «Я вас слушаю». За этими словами скрывается очень многое: тончайшие и во многом загадочные химические реакции, работа сложных, до сих пор не понятых инженерами физических приборов и вычислительных машин, о которых современная кибернетика пока только мечтает. Еще стоят за этими словами поражения и победы, борьба за право жить на Земле, полная драматизма бурная история, которая рассказывает о событиях, происходивших сотни миллионов лет назад.

Геологическая химия установила, что возраст Земли составляет примерно 5,3 миллиарда лет и что жизнь зародилась на нашей планете около миллиарда лет назад.

Миллиард лет — это очень большой срок. За это время можно было бы 300 миллионов раз пешком обойти вокруг земного шара или 15 миллионов раз «сходить» на Луну и обратно. За это же время обычным стаканом можно 200 раз вычерпать всю воду из Азовского моря. А если каждый день сбрасывать у своего дома хотя бы несколько десятков лопат земли, то через миллиард лет по соседству с вами появится гора, значительно более высокая, чем Эльбрус. Вот что такое миллиард лет.

И все же этот срок не кажется очень большим, когда вспоминаешь, как много он должен был вместить событий, связанных с развитием живой природы.

Сейчас на Земле найдено и описано более 500 тысяч видов растений и 1100 тысяч видов животных и насекомых, в том числе 50 тысяч видов позвоночных животных. Все это изумительное многообразие берет свое начало от простейших одноклеточных организмов, а может быть, даже от какого-нибудь одного типа самых примитивных живых клеток. Неутомимый мастер — природа усложняла простейшие клетки, создавала клеточные коллективы-организмы, прилаживала их к условиям окружающей среды, отбраковывала слабые и плохо приспособленные образцы. Природа закрепляла наиболее важные, полезные свойства и способности, повышала квалификацию отдельных клеток и формировала из клеток-специалистов органы особого назначения, такие, как плавник или крыло, глаз или сердце. Из поколения в поколение совершенствовался мир живого, управляемый железными законами изменчивости, наследственности и естественного отбора. В результате титанической, ни на секунду не прекращавшейся ра-

боты природа за миллиард лет создала такие шедевры, как организм человека, состоящий из 20 триллионов невидимых химических комбинатов — четко взаимодействующих живых клеток.

Растения развивались в сравнительно спокойной обстановке. Они прямо на месте получали все необходимое для жизни: от солнечных лучей — энергию, из почвы — строительный материал, разнообразные минеральные вещества, из дождевого облака — влагу. И поэтому, как ни совершенствовались растения, приспособляясь к морям и пустыням, зною и холоду, они так навсегда и остались неподвижными.

Другое дело животные. Они должны были сами искать для себя пищу и при этом еще не стать пищей какого-нибудь более сильного «коллеги». Вот почему в животном мире, начиная с его простейших представителей, выживало и развивалось то, что могло хорошо двигаться и ориентироваться. Вот почему у животных до такой высокой степени развились органы движения и нервная система.

Нервная система — это сложный орган, а точнее, целый комплекс взаимосвязанных органов, с помощью которого организм изучает окружающий мир, непрерывно оценивает обстановку и на основе этого организует свое поведение. Развитие нервной системы и особенно ее главного штаба — головного мозга — в итоге оказалось решающим фактором в борьбе за существование, за прогресс того или иного вида животных.

Сбор информации об окружающем мире организм осуществляет с помощью рецепторов. Это специализированные клетки (Иван Петрович Павлов называл их клетками-осведомителями), которые под действием света, тепла, давления или химических веществ посылают определенные сигналы в нервную систему. Некоторые рецепторы появились на довольно ранних стадиях развития живого организма. Так, в частности, приемники света, фоторецепторы, разбросаны по всему телу дождевого червя, представителя древнейшего типа животных — кишечнополостных. Некоторое подобие фоторецепторов встречается даже у одноклеточных. У сложных животных рецепторные клетки объединяются в целые органы, такие, как глаз (знаете ли вы, что глаз человека содержит около 200 миллионов светочувствительных клеток?), органы обоняния и вкуса.

Рецепторы звуковых колебаний, а значит, и орган слуха появились намного позже других, так как острая необходимость в них возникла сравнительно недавно, «всего» 150—200 миллионов лет назад. К этому времени наиболее

смелые представители подводного мира (а жизнь, как известно, зародилась и развивалась в океане), стали выбираться на берег, постепенно превращаясь в сухопутных животных. В земных условиях звуковые волны приносят исключительно важные «сообщения» — журчание ручья, шаги приближающегося хищника, шорохи убегающей «пищи». Необходимость пользоваться этой информацией и привела к появлению и развитию слуха.

Слуховой аппарат развился из так называемой боковой линии рыб — своеобразного органа давления, точнее, цепочки органов, вытянувшихся от головы до хвоста по обеим сторонам рыбьего тела. Боковая линия реагирует на медленные изменения давления, позволяет рыбам огибать препятствия, чувствовать приближение других рыб и даже «слышать» некоторые звуки. В частности, установлено, что рыба голец слышит звуки с частотой до 3 кгц, гольян — до 7 кгц и сомик — до 12,4 кгц. В последнее время проведено много интересных опытов, в которых рыб приучали реагировать на различные звуки: например, двигаться за пищей, ориентируясь на источник звуковых волн.

Но услышать звук — это еще далеко не все, нужно проанализировать его, отличить одни звуки от других. Таким анализом занимается мозг, и именно от его развития в огромной степени зависит совершенство всего слухового аппарата. Так у рыб наблюдаются простейшие реакции на звук — обычно они просто бегут от источника звуковых колебаний. Животные амфибии уже умеют выделять некоторые особо важные для них звуковые комплексы, еще лучше развит слух у птиц, и, наконец, у млекопитающих, к классу которых относимся и мы с вами, слуховой аппарат достигает высочайшей степени совершенства, становится одним из главных средств сбора информации об окружающем мире.

Слуховой аппарат человека можно условно разделить на три основные части (рис. 7, 5, 6).

1. Ухо принимает звуковые колебания и предварительно сортирует их по частоте и по мощности. Здесь же составляется и отправляется в мозг шифрованная «телеграмма», формируются серии сложных электро-химических сигналов — нервных импульсов, которые несут подробное описание принятого звука.

2. Анализ нервных импульсов, то есть фактически анализ звука, осуществляют специально для этого приспособившиеся участки коры головного мозга, расположенные в височных частях обоих больших полушарий. Левый и правый слуховые участки сложным образом связаны, и звук, принятый, напри-

мер, правым ухом, попадает не только в «свое», но и в левое полушарие. Сопоставляя сигналы, принятые правым и левым ухом, мозг вычисляет место расположения источника звуковых волн. Интересно, что звуки разных частот изучаются в разных районах слуховых участков мозга, а если раздражать эти участки слабым электрическим током, то у человека возникает ощущение услышанного звука.

3. Третьим элементом слухового аппарата можно считать линию связи ухо — мозг, основа которой — слуховой нерв — состоит из многих тысяч нервных волокон. На этой линии имеется несколько промежуточных узлов связи, где, по-видимому, происходит предварительная обработка нервных импульсов, идущих в мозг.

Из всех элементов слухового аппарата для нас сейчас наибольший интерес представляет само ухо, и с ним мы познакомимся несколько подробнее.

Всякий, кому приходилось бывать в метро, знает, что наземная станция — это лишь небольшая часть всего сооружения и что самое главное — прекрасные дворцы, могучие машины, бесконечные туннели — находится под землей. Подобно этому орган, который мы привыкли называть ухом, — это лишь своего рода наземная станция, получившая название «наружное (внешнее) ухо» (рис. 7, 5, а). Главные же части нашего звукоприемника — среднее и внутреннее ухо — нам не видны. Они спрятаны довольно глубоко и защищены костями черепа.

Звуковые волны, попавшие в ушную раковину, пробегают через извилистый слуховой проход (его длина около 2,5 см) и приводят в движение барабанную перепонку. Она, в свою очередь, связана с системой миниатюрных косточек — молоточком, наковальней и стремечком, которые все вместе весят около 0,05 г. Слуховые косточки расположены так, что образуют рычаг — своего рода усилитель. Конец этого рычага раскачивает барабанная перепонка, а на другом конце получают колебания с меньшей амплитудой, но зато действующие с большей силой. Эти колебания попадают в самый главный «цех» внутреннего уха — в улитку. Название «улитка» этот орган получил потому, что у млекопитающих он действительно похож на спиралевидный домик улитки. У животных, которые стоят на более низкой ступени развития, в частности у птиц, улитки еще нет, ее место занимает более простой орган, немного похожий на изогнутую луковичу. Улитку внутреннего уха человека удобно представить себе как постепенно сужающуюся трубку длиной около 3 см и закрученную в спираль на три, точнее, на $2\frac{3}{4}$ витка.

Итак, улитке передаются звуковые колебания от слуховых косточек. Наряду с этим к ней подходят нервные волокна, связанные со слуховым нервом. Отсюда можно сделать только один вывод: именно в улитке находятся звукорецепторы, находится орган, преобразующий звуковые колебания в серии нервных импульсов. Этот орган, по имени одного из его первых исследователей — А. Корти, получил название кортиева органа (орган Корти).

Кортиев орган надежно укрыт — он находится в спиральном лабиринте улитки (рис. 7, 5, 2, поперечный разрез витка улитки) и чем-то напоминает плоский и длинный слоеный пирог, также закрученный в спираль. Нижний слой, основание «пирога», — лента основной мембраны, сотканная из 25 тысяч поперечных тонких нитей. Эти нити часто сравнивают со струнами рояля или арфы. В направлении от основания улитки к ее вершине основная мембрана расширяется, и нити-струны становятся длиннее. У основания улитки (овальное окно), куда примыкает третья слуховая косточка — стремечко, длина нитей составляет 100 мк, а у вершины улитки — 500 мк (рис. 7, 5, в).

На основной мембране расположились ткани из нескольких типов клеток. В самом наружном слое имеется пять рядов так называемых волосковых клеток (кончик каждой из них покрыт десятками тончайших волосков), к которым подходят нервные волокна (рис. 7, 5, д).

Изучение устройства и работы слухового аппарата началось давно, но еще сегодня в этой области существует очень много загадок. Так до сих пор не удалось проследить все стадии преобразования звука в нервный импульс. Неясно также, каким образом кортиев орган анализирует форму кривой звука, как разделяет сложный звук на синусоидальные составляющие. Существует несколько теорий слуха, но, пожалуй, ни одна из них полностью не объясняет принцип действия нашего звукоприемника.

Долгое время широким признанием пользовалась так называемая резонансная теория слуха, которую около ста лет назад разработал известный физик и врач Герман Гельмгольц. Как говорит само название, в основе этой теории лежит хорошо известное явление — резонанс.

Существует много опытов для иллюстрации резонанса, но один из этих опытов особенно хорошо поясняет резонансную теорию слуха. Откройте крышку рояля или пианино, нажмите правую педаль и с большими паузами спойте над струнами несколько коротких звуков. Вы услышите, как рояль вторит пению, причем после разных нот звучат и разные струны.

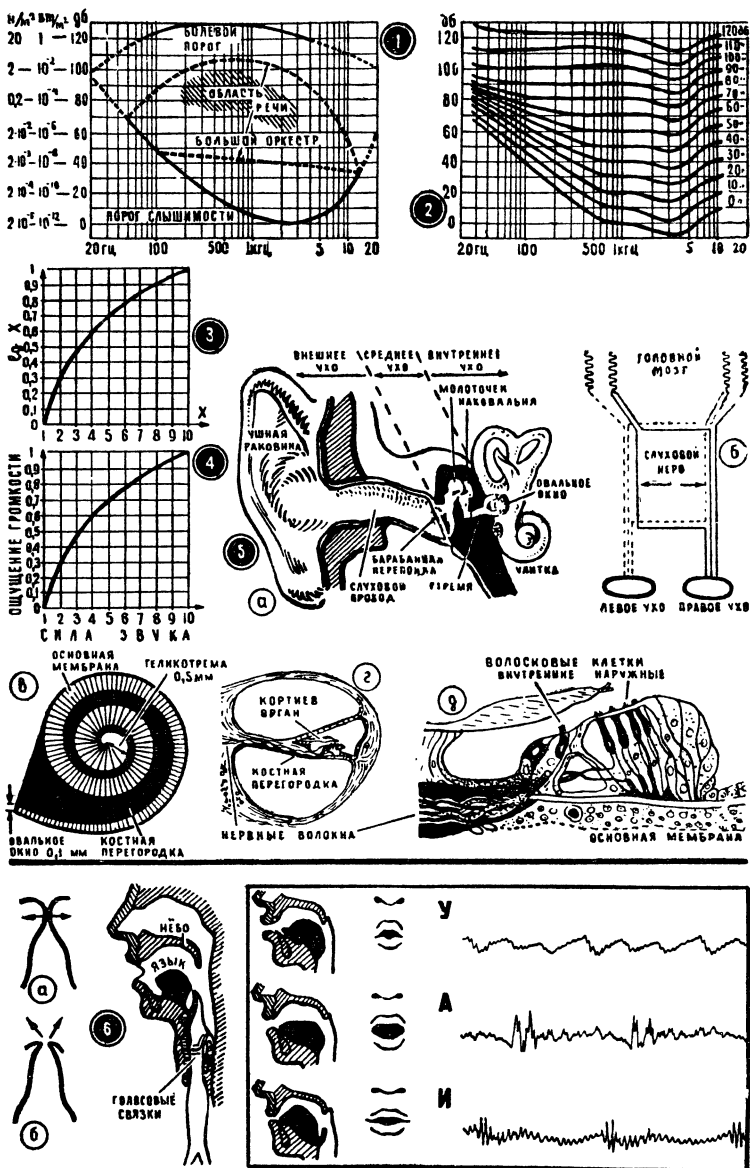


Рис. 7. Органы слуха и речи.

Происходит это потому, что каждая струна в основном резонирует лишь на одну из синусоидальных составляющих сложного звука. Поэтому для различных сложных звуков, то есть для разных спектров, набор откликающихся струн оказывается различным.

Гельмгольц считал, что наш слуховой аппарат определяет спектр сложных звуков примерно таким же способом. Роль резонирующих струн он отводил нитям основной мембраны, которые имеют разную длину, а значит, и разную частоту резонанса. Эксперименты, казалось бы, полностью подтверждали резонансную теорию слуха. Так, например, при повреждении вершины улитки, где находятся сравнительно длинные низкочастотные волокна, подопытные животные теряют слух в области низших частот, а повреждение основания улитки приводит к потере слуха на высших частотах. В пользу резонансной теории говорили и многие другие эксперименты.

И все же под давлением фактов, особенно полученных в самое последнее время, от простой и, казалось бы, понятной модели уха-роля пришлось отказаться. Вот лишь одно из затруднений резонансной теории. Простейшие расчеты показывают, что для того, чтобы перекрыть весь диапазон слышимых частот (16 гц — 22 кгц), сила натяжения крайних «струн» должна отличаться в 10 тысяч раз. О такой большой разнице не может быть и речи. Для «струн» из живой ткани она недопустима.

Сейчас главное внимание исследователей приковано к волосковым клеткам, где звук преобразуется в нервный сигнал. Установлено, что этот процесс включает в себя целые комплексы химических реакций, с которыми, по-видимому, связано и разделение сложного звука на составляющие. Обнаружены интересные особенности поведения некоторых частей волосковой клетки при воздействии различных звуков. Одним словом, стало ясно, что важнейшие проблемы слуха нужно рассматривать с позиций молекулярной биологии, которая исследует самые тонкие биологические механизмы.

Изумительная биологическая машина

Несмотря на неясности в работе слухового аппарата, его главные характеристики изучены весьма подробно. Так, в частности, установлена чувствительность, или, иначе, порог слышимости, уха — сила самых тихих звуков, которые мы еще в состоянии услышать. Оказалось, что на разных частотах порог слышимости различен, и лучше всего мы слышим звуки

с частотами от 1 до 5 кГц. На краях диапазона слышимых звуков чувствительность уха резко — во много миллионов раз — падает.

Сила звука на пороге слышимости (для частоты 1000 Гц) составляет около 10^{-12} Вт/м², а звуковое давление — 0,00002 н/м². Под действием таких слабых звуков давление на барабанную перепонку не превышает 0,0000003 г, и амплитуда ее колебаний измеряется тысячными долями микрона. Амплитуда звуковых колебаний на входе улитки еще в 50—60 раз меньше, а размах колебаний основной мембраны оказывается в несколько раз меньше, чем диаметр атома водорода. Уже одно это говорит о том, какие сложные и тонкие процессы обеспечивают высокую чувствительность уха.

Самые громкие звуки, которые мы можем слышать, называют порогом болевых ощущений. Он соответствует силе звука около 10 Вт/м² и давлению около 65 н/м². За этим порогом ухо действительно ощущает боль и громкость звука становится невыносимой. Для сравнения заметим, что чувствительные окончания кожи ощущают прикосновение уже при давлении 6 н/м². Порог болевых ощущений неодинаков на разных частотах, хотя и меняется не так резко, как порог слышимости. Значение обоих порогов для разных частот вы найдете на графике (рис. 7, 1).

Области «речь» и «симфонический оркестр» показывают, в каких пределах находятся частоты и звуковые давления для этих источников звука. В табл. 2 указаны некоторые источники звуковых колебаний и соответствующие им звуки различной силы.

Приведенные цифры показывают, что ухо слышит звуки в огромном диапазоне громкостей. Самый сильный и самый слабый из слышимых звуков могут различаться по звуковому давлению в 3 миллиона раз, а это соответствует разнице силы звука в 10 триллионов раз! Измеритель длины с подобным диапазоном мог бы одинаково хорошо определить толщину человеческого волоса и расстояние до Луны. Этот, конечно, весьма условный пример в какой-то степени характеризует универсальность слуха, его способность воспринимать самые различные звуки.

Вас, наверное, интересует, с какой точностью ухо ориентируется в огромном диапазоне звуков различной громкости, из скольких ступенек состоит лестница, которая ведет от самого тихого к самому громкому звуку, от порога слышимости к порогу болевых ощущений. В качестве ответа можно привести результаты, полученные многими исследователями. Человек различает около четырехсот (точнее, 374)

Таблица 2

Динамический диапазон слышимых звуков

Сила звука ($вт/м^2$)	Звуковое давление ($н/м^2$)	Децибелы (дб)	Примеры
10^{-12}	$2 \cdot 10^{-5}$	0	Порог слышимости человеческого уха
10^{-11}	$6,5 \cdot 10^{-5}$	10	Шепот на расстоянии 1 м
10^{-10}	$2 \cdot 10^{-4}$	20	Тихий сад
10^{-9}	$6,5 \cdot 10^{-4}$	30	Тихая комната. Тиканье часов (0,5 м). Игра скрипки пианиссимо.
10^{-8}	$2 \cdot 10^{-3}$	40	Негромкая музыка. Шум в жилом помещении. Город ночью
10^{-7}	$6,5 \cdot 10^{-3}$	50	Тихая работа громкоговорителя. Шум в учреждении с открытыми окнами
10^{-6}	0,02	60	Шум в магазине. Средний уровень разговорной речи на расстоянии 1 м.
10^{-5}	0,065	70	Шум мотора грузового автомобиля. Шум внутри трамвая
10^{-4}	0,2	80	Шумная улица. Машинописное бюро
10^{-3}	0,65	90	Автомобильный гудок. Фортиссимо большого симфонического оркестра
0,01	2	100	Клепальная машина
0,1	6,5	110	Пневматический молот
1	20	120	Реактивный двигатель на расстоянии 5 м. Сильные удары грома
10	65	130	Болевой предел, звук уже не слышен

ступенек — звуков различной громкости. Но сама по себе эта цифра еще мало о чем говорит — она нуждается в целом ряде пояснений и дополнений. Вот некоторые из них.

Во-первых, речь идет об оценке громкости путем сравнения двух разных звуков. Если оценивать звуки поодиночке, то удастся заметить значительно меньше ступенек (часто говорят: градаций) громкости.

Во-вторых, заметим, что приведенная цифра получена в результате проверки слуха у большого числа людей и относится к так называемому среднему человеку. Люди с натренированным слухом, например опытные музыканты, по-видимому, могут заметить меньшие интервалы громкости, и, таким образом, для них число ступенек окажется намного больше.

В-третьих, приведенная цифра относится лишь к средним частотам, например к частоте 1000 гц. С повышением и понижением частоты мы намного хуже различаем звуки разной громкости. Так, например, на частотах 150 гц и 9 кгц можно заметить лишь около ста, на частоте 16 кгц — меньше двадцати, а на частоте 30 гц — всего три различных ступеньки, различных уровня громкости.

В-четвертых, способность различать разные звуки в большой степени зависит от того, насколько мы к ним привыкли.

Есть данные о том, что через 20 мин высота ступеньки — заметный интервал громкости — уменьшается в 1,35 раза, а через 2 часа — почти в 3,5 раза. Подобное явление — адаптация — наблюдается и у других органов чувств: всем хорошо известно, что наши глаза постепенно привыкают к темноте и видят то, что в первый момент было совершенно неразличимым.

В-пятых, высота ступенек увеличивается с высотой лестницы. По мере повышения силы звука ухо как бы грубеет: чтобы оно заметило изменение громкости, приходится резче менять звуковое давление. На этом свойстве стоит остановиться подробнее, так как в дальнейшем мы не раз будем его учитывать.

Совершенно ясно, что ощущение громкости прежде всего зависит от звукового давления на барабанную перепонку — чем больше это давление, тем более громким кажется звук. Ну, а насколько повышается громкость, если повысить звуковое давление на единицу, например на 1 н/м^2 , или увеличить силу звука на 1 вт/м^2 ? Оказывается, что на вопрос, поставленный подобным образом, ответить невозможно. Если вас кто-нибудь спросит, много это или мало 1 л воды, то вы наверняка прежде всего захотите узнать, в сравнении с чем «много или мало». Действительно, если добавить литр воды в неполное ведро, то это сразу же станет заметным, и, конечно, вы ничего не заметите, если дольете литр воды в море.

Наш простой пример в какой-то степени помогает понять важнейший закон физиологии — закон Вебера — Фехнера. Названный именами открывших его ученых — физиолога и математика, этот закон говорит о том, что органы чувств — глаз, ухо — всегда замечают одинаковый прирост какого-либо воздействия (яркость картинки, сила звука), но прирост, одинаковый не по абсолютной, а по относительной величине, прирост не «на столько-то» единиц, а «во столько-то раз» или «на столько-то процентов». Чтобы заметить изменение громкости, нужно увеличить силу звука примерно на 10%: если было $0,2 \text{ н/м}^2$, добавить еще $0,02 \text{ н/м}^2$; если было 20 н/м^2 , добавить

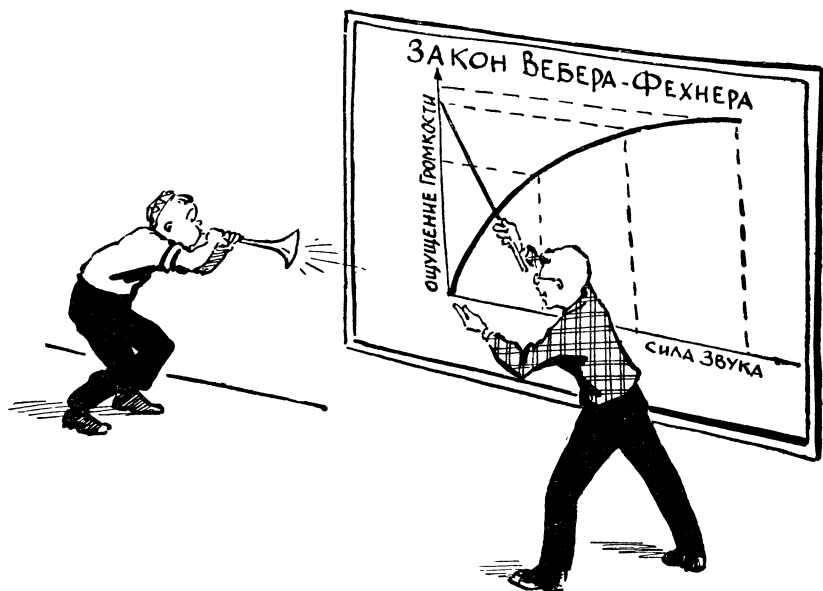


Рис. 8. Зависимость между ощущением громкости и звуковым давлением носит логарифмический характер (закон Вебера — Фехнера). Чтобы повысить громкость и без того громкого звука, нужно увеличить звуковое давление на весьма значительную величину.

2 н/м^2 . Одним словом, в ведре замечен лишний литр воды, в цистерне — лишняя бочка.

Для иллюстрации закона Вебера — Фехнера построим график (рис. 7, 4 и рис. 8), который покажет, как изменяется уровень громкости (разумеется, это условная величина, оценка наших ощущений, выраженная в условных единицах) при изменении силы звука. Кривая, которую вы видите на этом графике, называется логарифмической — такая же по форме кривая показывает, как меняется значение логарифма по мере увеличения числа, к которому этот логарифм относится (рис. 7, 3). Отмеченное сходство не случайно. Путем ряда математических преобразований можно прийти к такой формулировке закона Вебера — Фехнера: «Ощущение пропорционально логарифму раздражения».

Поскольку зависимость между громкостью (ощущение) и звуковым давлением (раздражение) носит логарифмический характер, для оценки этих величин особенно удобно пользоваться самыми популярными единицами — децибелами.

Строго говоря, децибел не имеет никакого отношения ни к ваттам, ни к вольтам, ни к ньютонам. И в то же время с помощью этой единицы оценивают величину мощности и напряжения, тока и звукового давления, силы звука и электрического сопротивления. Децибел, «незвирая на лица», сравнивает две величины, например два напряжения или два звуковых давления, и показывает, во сколько раз одна из них больше другой. Вот поэтому-то децибелом пользуются всякий раз, когда нужен беспристрастный судья, когда нужно оценить относительное усиление, ослабление, рост, уменьшение, подъем, — одним словом, любое отличие или изменение независимо от того, что именно меняется.

Мы коротко рассказали, для чего нужен децибел, и уже, по-видимому, настал момент пояснить, что он собой представляет. Для этого прежде всего вспомним, что такое логарифм и, в частности, десятичный логарифм.

Любое число можно представить как число 10, возведенное в определенную степень. Вот несколько примеров: $100=10^2$; $1\,000\,000=10^6$; $2=10^{0,3}$. В данном случае показатель степени это и есть десятичный логарифм числа. Логарифмы приведенных чисел соответственно равны 2; 6 и 0,3. Сокращенно это записывают так:

$$\lg 100=2; \quad \lg 1\,000\,000=6; \quad \lg 2=0,3.$$

Значение логарифма того или иного числа можно найти по графику или в специальной таблице. Таблицы и графики позволяют по значению логарифма определить и само число.

Довольно подробно о логарифмах и операциях с ними рассказано в учебнике алгебры для 10-го класса. Мы же буквально в двух словах скажем о тех операциях, с которыми в дальнейшем придется встретиться в этой книге.

Вот пример того, как с помощью логарифмов можно выразить отношение двух величин. Если есть два звука разной силы: один $0,05 \text{ вт/м}^2$, а другой 5 вт/м^2 , то сразу же можно сказать, что второй звук сильнее первого в 100 раз. Можно сказать и иначе: логарифм отношения силы этих звуков равен двум ($\lg 100 = 2$).

Сравнивая две величины, мы пользуемся своего рода единицей сравнения, которую можно было бы назвать «раз». Мы так и говорим: «сильнее в 100 раз», «слабее в 3 раза», «увеличился в миллион раз» и т. д. Когда результат сравнения выражают в виде логарифма, то единицей служит «бел», который соответствует логарифму числа 10, то есть единице. Так, в нашем примере можно сказать, что второй звук сильнее первого на две логарифмические единицы, то есть на 2 бела.

Таблица 3

Шкала децибел

Децибелы (дб)	Отношение силы звука (электрической мощности)	Отношение звукового давления (электрического тока, напряжения)	Уровень силы звука (вт/м ²)	Уровень звукового давления (н/м ²)
0	1	1	10^{-12}	$2 \cdot 10^{-5}$
0,5	1,12	1,06		
1	1,26	1,12		
2	1,58	1,26		
3	2	1,41		
5	3,16	1,8		
6	4	2		
10	10	3,16	10^{-11}	$6,5 \cdot 10^{-5}$
12	16	4		
15	31,6	5,62		
20	100	10	10^{-10}	$2 \cdot 10^{-4}$
30	1000	31,6	10^{-9}	$6,5 \cdot 10^{-4}$
40	10^4	100	10^{-8}	$2 \cdot 10^{-3}$
50	10^5	316	10^{-7}	$6,5 \cdot 10^{-3}$
60	10^6	1000	10^{-6}	0,02
80	10^8	10^4	10^{-4}	0,2
100	10^{10}	10^5	0,01	2
120	10^{12}	10^6	1	20
130	10^{13}	$3,16 \cdot 10^6$	10	65
140	10^{14}	10^7	100	200

Обычно на практике пользуются более мелкой и поэтому более удобной единицей — децибелом. Из самого слова понятно, что децибел (сокращенно *db* или *дб*) составляет 0,1 часть бела (сравните с дециметром, который равен 0,1 м).

В дальнейшем мы будем очень широко пользоваться децибелом, и вы постепенно привыкнете к этой единице. Ее «удельный вес» вам поможет понять табл. 3.

В первой (левой) колонке этой таблицы помещены некоторые наиболее часто встречаемые числа децибелов. В следующей, второй колонке приведены отношения (число раз) силы звука, соответствующие тому или иному числу децибелов. Сразу видно, что наш пример, где сила двух звуков отличалась в 100 раз, соответствует разнице в 20 дб (2 бела).

Если бы один звук был сильнее другого в миллион (10^6) раз, то мы сказали бы, что они отличаются на 60 дБ. Если различие в силе звуков составляет 3 дБ, то это значит, что один из них сильнее другого в два раза. В дальнейшем первой и второй колонками табл. 3 мы будем пользоваться для того, чтобы переводить в децибелы не только соотношения силы звука, но и соотношения электрической мощности, энергии, выполненной работы.

Некоторое недоумение у вас, по-видимому, вызовет третья колонка табл. 3. Здесь для того или иного числа децибелов (первая колонка) приведены соотношения звукового давления. Станным на первый взгляд кажется, что одному и тому же числу децибелов соответствуют разные соотношения силы звука и звукового давления. При 20 дБ сила звука отличается в 100 раз, а звуковое давление только в 10 раз. Разница силы звука в два раза — это 3 дБ, а такая же разница звуковых давлений — это уже 6 дБ.

Сейчас мы попытаемся ликвидировать эту неясность.

Сила звука и звуковое давление — это взаимно связанные величины, подобно тому, как связаны между собой площадь квадрата и длина его стороны. Ни одна из этих величин не может измениться так, чтобы другая осталась неизменной. Без особых доказательств ясно, что если увеличить сторону квадрата в два раза, то площадь его возрастет в четыре раза, увеличим площадь в девять раз, и сторона станет длиннее в три раза. Подобная зависимость — она называется квадратичной — существует также между звуковым давлением и силой звука. Если звуковое давление увеличится в три раза, то сила звука обязательно возрастет в девять раз. Если сила звука повышается в 100 раз, то, значит, звуковое давление возросло в 10 раз. Вот почему в табл. 3 в одном горизонтальном ряду, то есть для одного и того же числа децибелов, приводятся соотношения и для силы звука, и для звукового давления, причем соотношения, связанные квадратичной зависимостью. Кстати, зная одно из этих соотношений, всегда легко получить второе: звуковое давление нужно возвести в квадрат, а из силы звука извлечь квадратный корень. Путем подобных вычислений и построена третья колонка табл. 3.

Квадратичная зависимость связывает не только силу звука и звуковое давление. Такой же зависимостью связаны и многие другие величины, в частности электрическая мощность с величиной тока и электрическая мощность с величиной напряжения. Поэтому, для того чтобы перевести в децибелы соотношение токов или напряжений, нужно пользоваться третьей колонкой табл. 3.

В свое время мы называли децибел самой популярной единицей, и вы уже, по-видимому, поняли, что для этого есть основания. Децибелами широко пользуются электрики, электронщики, радисты. Однако особую популярность эта единица завоевала у специалистов по акустике. Они часто забывают об истинных единицах звукового давления и силы звука и выражают эти величины прямо в децибелах. Чтобы понять, как это делается, нужно сопоставить первую, четвертую и пятую колонки табл. 3.

Самый тихий звук, который мы еще слышим (порог слышимости), соответствует звуковому давлению $0,00002 \text{ н/м}^2$. Все более громкие звуки будут создаваться давлением, большим в определенное число раз, то есть на определенное число децибелов. Поэтому, приняв $0,00002 \text{ н/м}^2$ за нулевой уровень давления (меньшее давление для нас действительно равносильно нулю, так как звук не слышен), можно все остальные величины звукового давления выражать прямо в децибелах. Это и показано в пятой колонке табл. 3. Здесь приведены звуковые давления, соответствующие тому или иному числу децибелов при условии, что отсчет производится от порога слышимости (0 дб). Условившись об этом, мы в дальнейшем будем говорить: «Звуковое давление равно 40 дб » или «Звуковое давление поднялось до 80 дб », имея в виду, что эти цифры соответствуют $0,002 \text{ н/м}^2$ и $0,2 \text{ н/м}^2$ (пятая колонка табл. 3). Аналогично, приняв за нулевой уровень силу звука на пороге слышимости, мы выражаем в децибелах и эту величину (четвертая колонка табл. 3). Из таблицы видно, что порогу болевых ощущений соответствует примерно 130 дб .

Для того чтобы вы поскорее привыкли к децибелам, мы начнем пользоваться этими единицами, рассказывая об основных характеристиках человеческого слуха.

Прежде всего советуем еще раз взглянуть на табл. 2. Здесь в третьей колонке, на которую вы раньше, по-видимому, не обратили внимания, приведены уровни громкости (в децибелах) для самых различных источников звука. Громкость в децибелах приводится и на вертикальной оси графика (рис. 7, 1), где показано, как меняются с частотой порог слышимости и порог болевых ощущений.

Обратите внимание, что, так же как и на многих других графиках, на графиках рис. 7, 1 и 7, 2 деления горизонтальной шкалы неодинаковы: чем выше частота, тем меньший участок приходится на каждый герц. Эта так называемая логарифмическая шкала вводится для того, чтобы уместить весь диапазон слышимых частот на небольшом участке и в то же время достаточно подробно показать участок средних и особенно

низших частот. Логарифмическая шкала как бы приспособлена к особенностям слуха: чем ниже частота, тем меньшие ее изменения мы замечаем. В логарифмическом масштабе отмечают не только ось частоты: на некоторых графиках, например, пользуются логарифмической шкалой силы звука.

Из графика рис. 7, 1 хорошо видно, что на средних частотах наше ухо воспринимает огромный диапазон громкостей — около 140 *дб*. Сравнительно небольшая часть этого диапазона — 40 *дб* — приходится на разговорную речь. Все многообразие голосов, от самого громкого, крикливого, до самого тихого, едва слышного, лежит в пределах от 60 до 100 *дб*.

Намного шире диапазон, в который укладывается звучание большого симфонического оркестра. Его высшая точка, 120 *дб*, соответствует самому громкому звуку — форте-фортиссимо — всех инструментов. Низшая точка, около 45 *дб*, соответствует самому тихому — пиано-пианиссимо — звучанию одной скрипки.

Несколько слов о том, как следует оценивать музыкальные термины «форте» и «пиано». Музыканты ввели для себя восемь уровней громкости и обозначают их так:

ppp — пиано-пианиссимо

pp — пианиссимо

p — пиано

mp — меццо-пиано

mf — меццо-форте

f — форте

ff — фортиссимо

fff — форте-фортиссимо.

Все эти уровни охватывают диапазон громкости примерно в 70—75 *дб* и делят его на семь равных частей, по 10 *дб* в каждой. Музыканты считают, что подъем на одну ступеньку, то есть повышение громкости на 10 *дб*, создает ощущение удвоенной громкости. Для подъема на одну такую ступеньку, то есть для перехода на следующий уровень громкости, нужно увеличить силу звука в 10 раз, то есть повысить звуковое давление в 100 раз. Из закона Вебера — Фехнера следует, что «ступеньки» по абсолютной величине неодинаковы. При низких уровнях громкости для подъема на 10 *дб* достаточно увеличить звуковое давление на сотые и даже тысячные доли n/m^2 . В области громких звуков для такого же увеличения громкости (10 *дб*) приходится повышать звуковое давление на единицы и даже на десятки n/m^2 . Многие музыканты собственными мускулами чувствуют справедливость закона Вебера — Фехнера. Скрипачи, пианисты, барабанщики очень легко

переходят от пианиссимо к пиано, но переход от форте к фортиссимо требует от них значительных усилий, в буквальном смысле слова — тяжелой физической работы (рис. 8).

Мы уже отметили, что на частоте 1000 гц человек способен обнаружить около 400 (точнее, 374) различных уровней громкости. Каждой такой ступеньке соответствует изменение силы звука на 0,4 дб, то есть примерно на 10%. На высших и особенно на низших частотах мы намного хуже различаем громкость звука. В значительной степени это связано с тем, что при понижении частоты резко падает чувствительность уха и вместе с этим как бы сжимается весь диапазон громкости. Так, на частоте 1000 гц этот диапазон примерно равен 130—140 дб, а на частоте 50 гц всего 80 дб — порог слышимости повышается соответственно от 0 до 50 дб.

Более подробно об этой зависимости рассказывает график на рис. 7, 2. Здесь изображены так называемые кривые равной громкости, полученные при проверке слуха у большого числа людей. Каждая из этих кривых соответствует определенному уровню громкости, величина которого, разумеется условная, обозначена над кривой. По вертикальной оси отложены уровни силы звука, причем на частоте 1000 гц уровни громкости и силы звука совпадают. Каждая кривая показывает, как с изменением частоты нужно изменить силу звука, чтобы громкость осталась постоянной.

В области низших частот несколько кривых резко загнуты вверх. Это значит, что при уменьшении частоты нужно резко усилить звук, для того чтобы громкость осталась неизменной. Важно отметить, что для громких звуков (от 80 дб и выше) изменение силы звука на всех частотах дает примерно одинаковый эффект. В области слабых звуков (от 80 дб и ниже) даже небольшое уменьшение силы звука на низших частотах приводит к резкому снижению громкости вплоть до самого порога слышимости. Практически это значит, что если каким-нибудь способом постепенно ослаблять звуки, идущие от большого оркестра или многоголосого хора, то раньше всего мы перестанем слышать низшие частоты.

Можно было бы рассказать еще много интересного о том, как человек воспринимает звуки различной силы, об особенностях оценки громкости. Однако нам уже давно пора перейти к другому важному способу «сортировки» звуковых колебаний, пора рассказать, как мы различаем звуки по их частоте.

Начнем с так называемых простых звуков, график которых представляет собой синусоиду (рис. 1, 2, 4). Принято считать, что человек слышит звуки с частотой от 16 гц до 22 кгц.

Однако эти граничные цифры не для всех одинаковы. Большинство взрослых людей не слышат звуки, частота которых выше 16—18 кгц, а для людей преклонного возраста предельная частота может снизиться даже до 10—12 кгц. В то же время встречаются, правда очень редко, и «рекордсмены», которые слышат ультразвук вплоть до 28 и даже до 30 кгц.

Кстати, способность слышать ультразвук хорошо развита у многих животных. Например, собака слышит почти до 40 кгц. Этим пользуются некоторые дрессировщики: с помощью ультразвукового свистка они подают собаке сигналы, не слышимые для зрителей. Есть животные, которые слышат инфразвук — колебания с частотой ниже 16 гц. Советский ученый академик В. В. Шулейкин обнаружил, что ветер, обдувая морские волны, создает «голос моря» — инфразвук с частотой от 0,1 до 6 гц. Из районов, где начался шторм, «голос моря» довольно быстро (звук движется несравненно быстрее морской волны) приходит к берегу. Благодаря этому некоторые моллюски, способные слышать инфразвук, заранее узнают о приближающейся непогоде.

Человеческий слух с исключительно высокой точностью различает частоту звука во всем доступном нам диапазоне. И хотя на самых низких частотах точность несколько падает, она все же остается достаточно высокой. Об этом свидетельствует полученная опытным путем табл. 4, где показано, какое отклонение частоты способен заметить слух среднего человека.

Т а б л и ц а 4

Заметность изменений частоты

Частота (гц)	50	100	200	400	3500	6500	12 000
Заметное изменение частоты (%)	1	0,7	0,45	0,3	0,3	0,4	0,5
То же (гц)	0,5	0,7	1	1,2	10	25	60

На низших частотах ухо определяет частоту с точностью до 1%, а начиная с 500 гц и выше, точность возрастает до десятых долей процента. Точность определения частоты в некоторой степени зависит также от громкости звука. Так, при большой громкости (80 дб), в пределах от 16 гц до 22 кгц, человек способен обнаружить около 2200 частотных интервалов — градаций, а при тихом звуке (20 дб) таких ин-

тервалов обнаруживается всего около 500, то есть точность определения частоты падает. Табл. 4 соответствует средней громкости (40 *дб*), при которой мы различаем около 1300 граций частоты.

Дирижер взмахнул палочкой

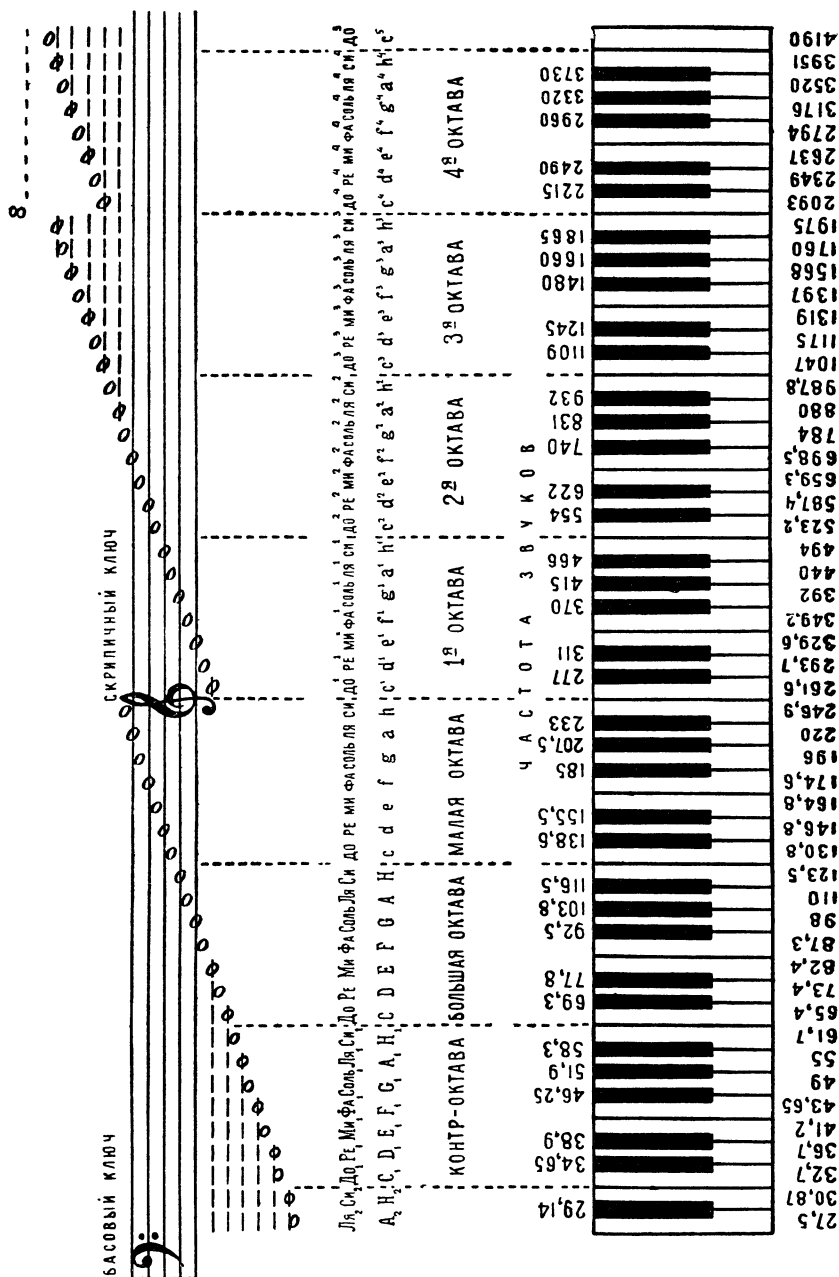
Человек довольно небрежно оценивает силу звука — мы редко обращаем внимание на то, что звук стал немного громче или немного слабее. Совсем иначе обстоит дело с частотой. При оценке частоты мы в ряде случаев бываем предельно точны и внимательны. Большая и интересная область человеческой деятельности в значительной степени основана на том, что звуки разной частоты создают у нас ощущение различной высоты тона. Вы уже, конечно, догадались, что здесь речь идет о музыке.

Из всего огромного диапазона слышимых частот в музыке в основном используется участок от 27,5 до 4190 *гц*. Лишь некоторые музыкальные инструменты-рекордсмены выходят за пределы этого диапазона. Ниже всех по частотной лестнице опустился орган — до 16 *гц*, выше всех поднялась маленькая флейта-пиколо — до 4500 *гц*.

На своей «территории» музыканты используют не все частоты и даже далеко не все слышимые частотные интервалы. Мы знаем, что в самых неблагоприятных условиях, при очень небольшой громкости, можно различить по частоте больше 500, а при нормальной громкости до 2200 различных звуков. В музыке используется всего 88 частотных интервалов, то есть 88 звуков разной высоты. Каждому из них соответствует вполне определенная частота, значение которой вы найдете на рис. 9. Частота указана рядом с клавишами современного рояля.

Из рисунка ясно, какой частоты звук мы получим, ударив по той или иной клавише.

Музыкальные звуки различной высоты принято обозначать особыми значками — нотами, подобно тому, как звуки речи обозначают буквами. Основа нотного письма — нотации — пять основных горизонтальных линеек и расположенные над ними или под ними коротенькие дополнительные линейки. На рис. 9 видно, какому месту на нотных линейках соответствует звук той или иной частоты. Для записи всех 88 звуков на линейках места не хватает (больше шести дополнительных линеек вводить не принято), и поэтому приходится идти на хитрость — одни и те же линейки использовать



дважды. Как видите, нота, расположенная на первой основной линейке, может соответствовать частоте 98 *гц* либо частоте 329, 6 *гц*. Все зависит от того, какой знак стоит перед началом нотной записи — басовый или скрипичный ключ. Дополнением к скрипичному ключу служит цифра «8», применяемая при обозначении самых высоких (высокочастотных) звуков.

Музыканты почти никогда не говорят о частоте звука. Они присвоили каждой из 88 частот свое имя и только этим именем и пользуются, если нужно назвать звук той или иной высоты. Слоговые и буквенные имена каждого из 56 основных музыкальных звуков, соответствующих белым клавишам рояля, также приведены на рис. 9.

Названия дополнительных звуков (черные клавиши) образуются из основных путем прибавления частиц «диез» (обозначается значком \sharp) или «бемоль» (обозначается значком b). Первая из них соответствует увеличению, а вторая уменьшению частоты на одну ступеньку. Так, например, звук с частотой 29,14 *гц* (крайняя левая черная клавиша) можно назвать «Ля₂ диез» (ля₂ \sharp) либо «Си₂ бемоль» (си₂ b), причем оба названия равноправны. Если знак \sharp или b появляется на нотных линейках, то, значит, последующую ноту (либо ноты — существуют дополнительные правила) нужно сдвинуть на одну ступеньку вверх или вниз.

Разделение всех музыкальных звуков на основные и дополнительные — это вопиющая несправедливость. Названия эти появились еще в средние века, когда звуки, соответствующие черным клавишам, в музыке почти не использовались. В наследство от тех времен и достались разноцветные клавиши и неоправданно сложная система обозначения дополнительных звуков.

Настройку музыкальных инструментов производят с помощью камертона, который совершает колебания подобно струне, но, в отличие от нее, имеет строго определенную, неизменную частоту колебаний. Опорной точкой музыкальной шкалы принято считать звук «ля¹», имеющий частоту 440 *гц*. Нужно сказать, что в свое время частота опорной точки «ля¹» довольно часто и в значительных пределах менялась. Так, первый камертон, созданный около 250 лет назад, давал звук «ля¹» с частотой 419, 9 *гц*. Первый камертон Парижской оперы для этой же ноты давал частоту 405 *гц*. Вскоре, правда, частота этого камертона была повышена до 425 *гц*, затем до 440 *гц* и, наконец, к 1857 году до 448 *гц*. В то же время в знаменитом Миланском оперном театре Ла Скала камертон звучал с частотой 451,5 *гц*, а в Лондонской опере —

455 гц. Сейчас музыканты избавлены от подобной путаницы — частота 440 гц для звука «ля¹» узаконена международным стандартом.

В современной музыке все частотные ступеньки, то есть интервалы между соседними клавишами, равноправны и независимо от цвета клавиш имеют одинаковую высоту. Здесь, правда, необходимо пояснить, что мы имеем в виду под словом «одинаковая».

Так же, как и при оценке громкости, для нашего слуха важно не абсолютное, а относительное изменение частоты, то есть изменение не «на столько-то герц», а «во столько-то раз», или, что то же самое, «на столько-то процентов». Например, мы ощутим одинаковое повышение тона, если изменим частоту от 100 до 120 гц, или от 10 до 12 кгц. Как видите, по абсолютной величине прирост частоты получается разным — в первом случае на 20 гц, во втором на 2000 гц. И все-таки изменение тона будет казаться одинаковым, так как частота увеличилась в одно и то же число раз — в обоих случаях ее прирост составил 20%.

При подъеме на любую последующую ступеньку частота музыкального звука повышается примерно на 6%, и это всегда вызывает ощущение одинакового повышения тона. Вот почему мы говорим, что все частотные ступеньки имеют одинаковую высоту. В то же время по абсолютной величине расстояние между соседними музыкальными тонами резко меняется (сравните частоты соседних звуков на рис. 9).

Частотный интервал между соседними клавишами рояля, независимо от их цвета, получил название «полутон» (изменение частоты 6%), а интервал в два полутона составляет «тон». Нетрудно подсчитать, что вся музыкальная шкала разбита на 87 полутонов, то есть $43\frac{1}{2}$ тона¹.

Вы уже, конечно, обратили внимание, что названия музыкальных звуков периодически повторяются и следуют друг за другом одинаковыми комплектами. Каждый такой комплект называется октавой и состоит из пяти дополнительных и семи основных звуков — «до», «ре», «ми», «фа», «соль», «ля», «си». Если вы сравните одинаковые по названию звуки из соседних октав, например «до» и «до¹» или «ля¹» и «ля²», то обнаружите изумительную вещь: одна из частот больше другой ровно в два раза. Вот это самое «в два раза» и лежит

¹ Как видите, слово «тон» имеет два значения: оно относится к высоте звучания и является своего рода музыкальной единицей частотного интервала. Два значения имеет и слово «октава»: определяет полный комплект звуков (нот) от «до» до «до», а также интервал между частотами, одна из которых в два раза больше другой.

в основе любой, в том числе и современной, музыкальной шкалы.

Появление нот двойной (четырежды, восьмикратно и т. д.) частоты не случайность и не выдумка изобретателя. По требованию самой природы мы вводим именно это соотношение, подобно тому, как покупаем именно два ботинка, а не один, не три и не сорок. Соотношение частот «в два раза» (то есть на 100%) слух ставит на особое место: для слуха это самое приятное, самое естественное соотношение. В этом можно легко убедиться: ударьте одновременно по двум одноименным клавишам рояля, и вы услышите два очень похожих звука, точнее даже — один богато окрашенный звук. Частотный интервал между двумя ближайшими одноименными звуками, например «ля¹» — «ля²», называется октавой. Поэтому мы говорим, что музыкальный диапазон включает в себя семь полных октав. Каждая октава, в свою очередь, разделяется на 12 полутонов, каждый из которых дает сдвиг частоты на 6%.

Чем же замечательны звуки с интервалом в октаву? Почему слух по-особому ощущает двойную частоту, по-особому реагирует на сочетание звуков, если их частоты отличаются именно «в два раза»?

В поисках ответа мы опять обратимся к роялю.

Очень осторожно, так, чтобы не извлечь звука, нажмите клавишу «ля²» ($f_2 = 880$ гц), а затем ударьте по клавише «ля¹» ($f_1 = 440$ гц) и сразу же ее отпустите. Когда звук «ля¹» затихнет, вы еще довольно долго будете слышать более высокий тон «ля²». Тот же эффект можно получить с двумя любыми клавишами, которым соответствует частотный интервал в одну, две, три и так далее октавы. Чем объяснить этот эффект? Резонансом? Но почему струна с частотой собственных колебаний 880 гц резонирует на частоте 440 гц? Как увязать такой незаконный резонанс с тем, что мы знаем о колебаниях струны?

Рассматривая процесс колебаний струны, мы значительно упростили его. Струна колеблется не только целиком, но еще и отдельными своими частями — половинками, третями, четвертушками и т. д. (рис. 10). Поэтому реальная струна создает звук сложной формы, спектр которого содержит синусоидальные составляющие с кратными частотами: двойной, тройной, четырехкратной и т. д. Пример: струна «ля¹», кроме основного звука, с частотой 440 гц, создает призвуки, как говорят музыканты, — обертоны: первый обертон 880 гц, второй — 1320 гц, третий — 1760 гц и т. д.

В физике и технике обертоны называют гармоническими

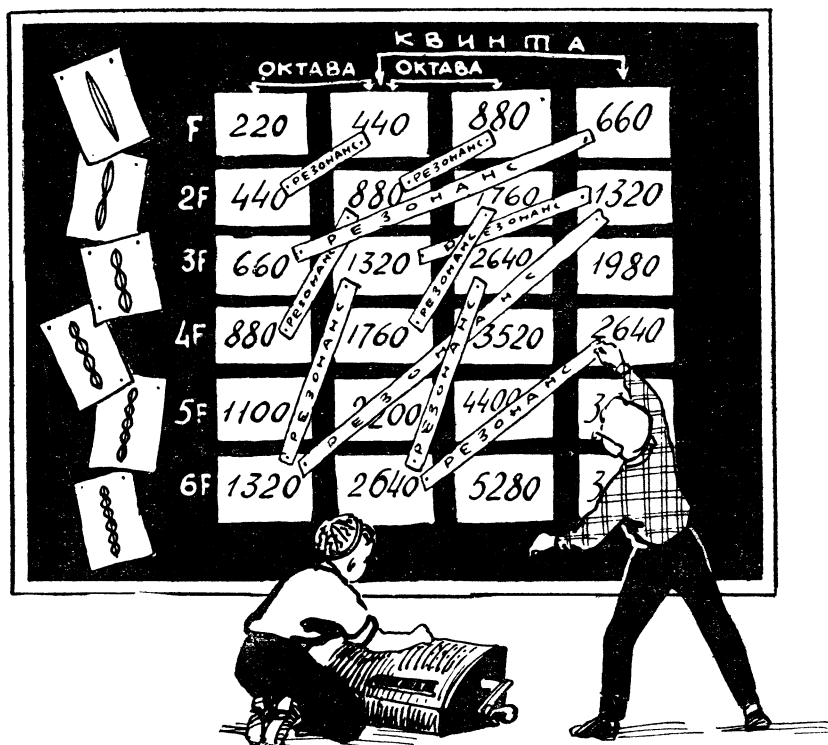


Рис. 10. Струна колеблется не только целиком, но и отдельными своими частями; поэтому ее звук содержит большое число гармоник (обертонов).

составляющими или, сокращенно, гармониками. Этим названием будем в дальнейшем пользоваться и мы. Учтите, что обертоны и гармоники нумеруются по-разному. Синусоидальный тон основной частоты (в нашем примере 440 гц) называют первой гармоникой, тон двойной частоты (880 гц), который у музыкантов числится первым обертоном, называется второй гармоникой, второй обертон (1320 гц) — третьей гармоникой и т. д. Проще говоря, в нумерацию обертонов не входит основной тон, а в нумерацию гармоник он входит. Чтобы подсчитать частоту той или иной гармоники, достаточно умножить частоту основного тона на ее порядковый номер. Легко подсчитать, что для нашего примера частота восьмой гармоники равна 3520 гц ($440 \cdot 8$), десятой — 4400 гц ($440 \cdot 10$) и т. д.

Теперь уже ясно, что резонанс, который мы наблюдали

в своем последнем опыте, — явление вполне законное. Просто струну «ля²» ($f_2 = 880$ гц) привела в движение вторая гармоника колебаний струны «ля¹» ($2f_1 = 880$ гц). Подобные явления могут сблизить звучание двух (или нескольких) тонов разной высоты. Причем главную роль в этом сближении играет ухо: оно само чуть-чуть искажает форму звукового сигнала, само создает и сравнивает гармоники какого-либо созвучия, то есть двух или нескольких звуков. При этом особое предпочтение отдается тем созвучиям, гармоники которых совпадают по частоте. Совершенно ясно, что первое место среди таких привилегированных созвучий занимают чистая прима (табл. 5) и октава — здесь гармоники согласованы

Таблица 5

Музыкальные интервалы

Название интервала	Число полутонов	Название интервала	Число полутонов
Чистая прима	0	Уменьшенная квинта	6
Малая секунда	1	Чистая квинта	7
Большая секунда	2	Увеличенная квинта	8
Увеличенная секунда	3	Малая секста	8
Малая терция	3	Большая секста	9
Большая терция	4	Малая септима	10
Чистая кварта	5	Большая септима	11
Увеличенная кварта	6	Чистая октава	12

наилучшим образом (рис. 10). Вот почему наш слух так хорошо выделяет интервал, соответствующий октаве, вот почему этот благозвучный интервал стал основой музыкальной шкалы.

Наряду с примой и октавой наш слух выделяет еще несколько благозвучных интервалов, так называемых консонансов. Прежде всего это чистая квинта (табл. 5), отчасти чистая кварта и в некоторой степени терция и секста. Остальные интервалы — это диссонансы, они звучат резко, даже неприятно, создают какие-то раздражающие призвуки (рис. 11).

Первые исследователи музыкальной шкалы, а этой проблемой занимался еще Пифагор, ввели в нее консонирующие интервалы в чистом виде. Однако высота частотных ступенек при этом получалась неодинаковой, и в звучании музыки часто слышалась фальшь. Около 250 лет назад немецкий ученый и музыкант Андреас Веркмейстер путем довольно слож-

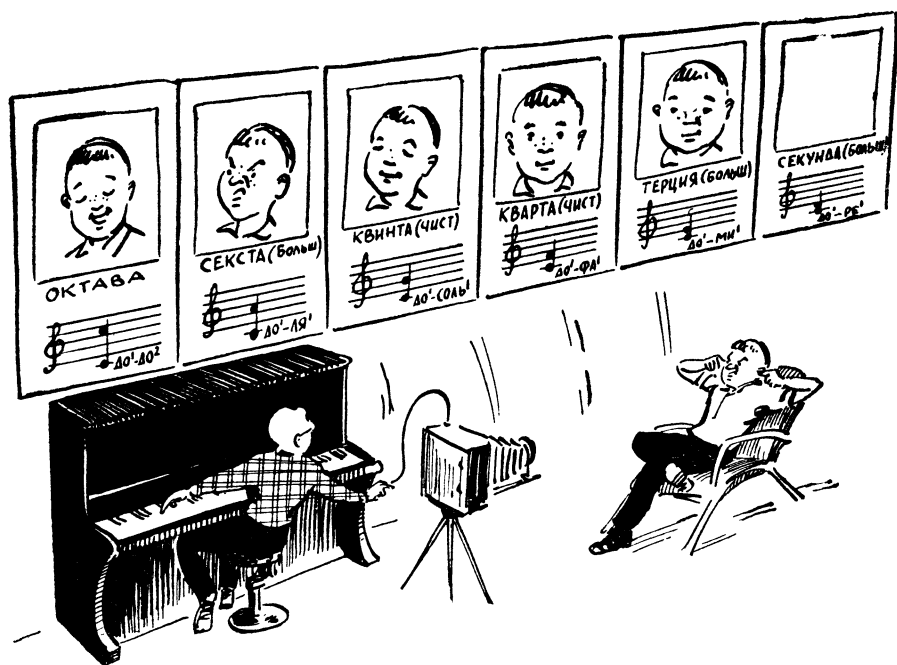


Рис. 11. В зависимости от интервала между двумя звуками наш слух различает созвучия консонансы (благозвучные, приятные) и созвучия диссонансы (неприятные, раздражающие).

ных математических расчетов создал так называемую двенадцатиступенчатую, равномерно темперированную шкалу. На ней высота всех частотных ступенек одинакова (6%), и в то же время имеются интервалы, очень близкие к консонирующим: к чистой квинте, терции, кварте и др. Этой шкалой пользуется и современная музыка, хотя время от времени предлагаются проекты более совершенной музыкальной шкалы: с большим числом ступенек в пределах октавы, большим приближением к естественным, продиктованным самой природой консонирующим интервалам. Пока эти проекты остаются только проектами. Но вряд ли стоит утверждать, что в будущем они не станут достоянием музыкального искусства.

В чем же состоит различие консонанса и диссонанса? Почему ухо по-разному реагирует на них? За счет чего одни созвучия мы относим к приятным, а другие едва в состоянии слушать? Впервые на эти вопросы попытался ответить Гельмгольц. Исследуя хорошо известное музыкантам явление —

возникновение в самом ухе гармоник и комбинационных тонов, он построил довольно строгую теорию консонанса. Вот уже около ста лет ученые стремятся дополнить, развить, проверить или опровергнуть эту теорию и сами при этом открывают новые и интересные подробности анализа созвучий. В качестве примера можно указать работы профессора С. Н. Ржевкина, который исследовал созвучия, подводя один чистый тон к правому уху, а второй — к левому. Оказалось, что в этом случае мы вообще не в состоянии заметить ни консонансов, ни диссонансов. Так еще раз было доказано, что истинное созвучие получается лишь тогда, когда оба звука попадают в одно ухо и там создают «гибридные» комбинационные тона.

Другую музыкальную проблему, привлекающую внимание физиков и физиологов, можно определить одним словом «ритмы». Марш, вальс, галоп, колыбельная. Даже эти простые примеры говорят о том, что ритмический рисунок — сложное чередование акцентов, пауз, звуков различной длительности — одно из главных выразительных средств музыки. Попутно хочется заметить, что не только в музыке, но в стихах, отчасти и в прозе, слух выделяет, а мозг оценивает созвучия (рифмы) и ритмы. Есть основание думать, что действие музыкальных и поэтических ритмов связано с ходом наших внутренних «биологических часов». Эти «часы» представляют собой сложные и пока еще во многом загадочные биологические и биохимические системы, которые отбивают такт работы отдельных клеток и целых органов — сердца, легких, мозга, определяют ритм жизни.

Наряду с изменением громкости и высоты звука, сложными ритмами, приятным и неприятным сочетанием тонов музыкальное искусство использует еще одно сильнейшее «оружие» — тембры. Мы уже знаем, что тембровая окраска определяется спектром звука — числом гармоник (обертонов) и их амплитудами. Ну, а сам спектр прежде всего зависит от того, каким способом создается звук, какой музыкальный инструмент является его источником [1]¹.

Из всех музыкальных инструментов принято выделять три основные группы: струнные, духовые и ударные (рис. 12).

В струнных инструментах, как говорит само название, источником звука является колеблющаяся струна. Можно думать, что далеким предком этих инструментов была туго натянутая поющая тетива лука. В зависимости от того, каким

¹ В квадратных скобках указан порядковый номер рекомендуемой книги или журнальной статьи по списку, приведенному в конце книги.

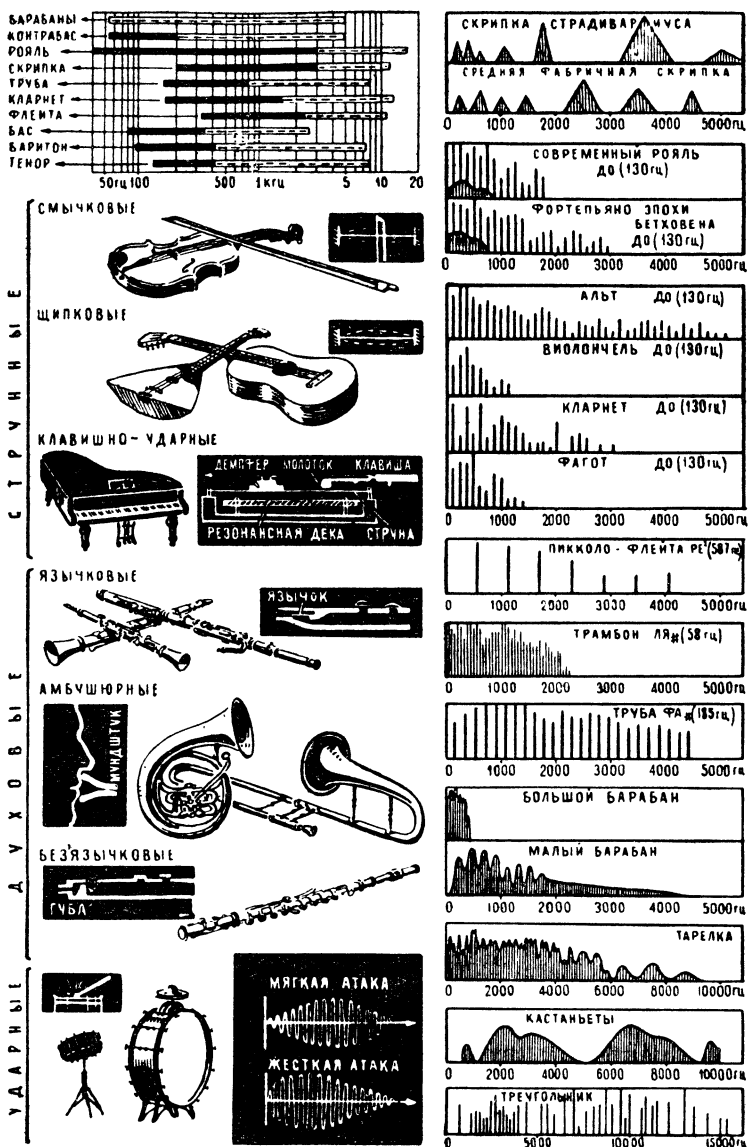


Рис. 12. Музыкальные инструменты.

образом струна приводится в движение, среди струнных инструментов выделяют смычковые (скрипка, альт, виолончель, контрабас), щипковые (арфа, гитара, гусли, мандолина, балалайка) и клавишно-ударные (рояль).

Сама по себе струна создает очень слабый звук — уже на расстоянии 2—3 м он почти не слышен. Это связано с тем, что струна, даже самая толстая, имеет очень небольшую площадь поперечного сечения и увлекает за собой малый объем воздуха. Чтобы получить заметную звуковую мощность, во всех струнных инструментах, струну объединяют с большим излучателем. Струна приводит в движение излучатель, а он уже, захватывая большие массы воздуха, создает достаточно мощное излучение. У скрипки, гитары, контрабаса основной излучатель звука — это сам корпус инструмента, у рояля основным излучателем является особой формы доска — резонансная дека, над которой натянуты струны.

У каждого типа музыкальных инструментов имеется свой характерный тембр. Более того, даже инструменты одного и того же типа создают звук с различной тембровой окраской. Так, например, прослушав несколько, казалось бы, одинаковых скрипок, человек с хорошим слухом у каждой из них обнаружит какую-либо особенность звучания.

Как уже говорилось, струна создает большое число гармоник. Излучатель-корпус, резонируя на разных частотах, усиливает те или иные гармоники, подчеркивает их, окончательно формирует тембр. Те области частотного диапазона, где происходит усиление, подчеркивание гармоник, называют формантами. Можно сказать, что форманта — это область, где частотная характеристика излучателя звука имеет заметный подъем.

В правой части рис. 12 показаны графики, характеризующие тембровые особенности некоторых музыкальных инструментов. Первые два графика — это резонансные характеристики различных по звучанию скрипок. Характеристики показывают, в какой степени тот или иной инструмент подчеркивает звуковые колебания разных частот. Из графиков видно, что различные по характеру звучания скрипки прежде всего отличаются своими формантами. Так, в частности, главная форманта в знаменитых скрипках старинного итальянского мастера Страдивариуса находится в области 3200—4200 *гц*, в то время как у плохой скрипки эта форманта смвинута в область 2200—2800 *гц*.

На третьем графике показан спектр звука «до» (частота 130 *гц*) на современном рояле, а на следующем графике — спектр того же звука, воспроизведенного на фортепьяно эпохи

Бетховена. В старинном фортепьяно применялись тонкие струны, и натянуты они были во много раз слабее, чем на современном рояле¹. Ударный молоточек был оклеен сравнительно жестким материалом, поэтому звук содержал большое число высших гармоник и имел звенящий («проволочный») оттенок.

В духовых музыкальных инструментах основным звучащим телом является столб воздуха. В зависимости от того, каким образом создаются колебания воздушного столба, различают духовые инструменты язычковые и безязычковые. В язычковых инструментах (кларнет, гобой, саксофон, фагот) поток воздуха заставляет колебаться упругий язычок — тонкую металлическую, деревянную или тростниковую пластинку. Сложная колебательная система «язычок — столб воздуха» и определяет «голос» инструмента. К язычковым духовым можно отнести баяны, гармони, аккордеоны. Здесь металлические язычки приводятся в движение воздухом, который нагнетают мехами. К язычковым часто относят и так называемые амбушюрные инструменты. Это трубы (труба, тромбон, валторна, пионерский горн), где роль колеблющегося язычка выполняют определенным образом сложенные губы музыканта.

Безязычковые духовые инструменты (флейта, свирель, дудка) часто называют свистковыми — по принципу действия они напоминают обычный свисток. Источником колебаний в этих инструментах является воздушный вихрь — быстрый поток воздуха. Зацепившись за острый край так называемой губы, он создает ритмические вихревые движения, а они возбуждают звуковые колебания всего воздушного столба. Точно так же создается звук во многих органных трубах. В старинных органах воздух нагнетали большими мехами, а сейчас для этой цели используют мощные вентиляторы с электромоторами. Органист, нажимая на клавиши, переключает потоки воздуха, подает их на различные трубы. В современном органе имеется несколько тысяч труб, которые создают звуки различной высоты и различных тембров. Частота звука зависит от размеров трубы. Большие органные трубы (длина до 11 м) создают низкочастотные звуки, а маленькие (длина до 10 мм) — высокочастотные.

В духовых инструментах есть только одна труба, и для изменения высоты звука меняют ее действующую длину. Для этого с помощью клапанов, а иногда и с помощью паль-

¹ В современном рояле сила натяжения одной струны достигает 50—55 кг, а всех струн — 12 т.

цев перекрывают отверстия в самой трубе (кларнет, фagот, гобой и др.), или направляют воздушный поток в ответвления основной трубы (валторна, кларнет, труба и др), или, наконец, меняют длину трубы с помощью выдвижного колена (тромбон). Кроме того, менять частоту звука можно, используя различные приемы вдувания воздуха, как это делают горнисты.

Особенность большинства ударных инструментов состоит в том, что они создают звук с большим числом сравнительно мощных гармоник, и, как правило, трудно говорить об основной частоте такого звука. Гармонические составляющие так близки, что их приходится рассматривать как сплошные полосы частот. Тембр ударного инструмента зависит от того, какие частоты входят в эту полосу и как распределяется мощность звука между участками полосы. Известно, что большой барабан явно «басит», а маленький создает резкий, звенящий звук, в который наряду с низкочастотными входят еще и высокочастотные составляющие. Эти особенности звучания отражены и в спектрах звука большого и малого барабанов (рис. 12).

У всякого музыкального звука различают три части: атаку, установившуюся часть и спад. Тембр любого музыкального инструмента зависит от того, как изменяется сила звука, от формы атаки и спада. Был проделан интересный опыт, который показал, насколько велико значение характера атаки. Музыкантам предложили прослушать через наушники несколько различных инструментов, причем наушники включались лишь после окончания атаки, через несколько десятых долей секунды после начала звучания.

При этом даже опытные музыканты путали одни инструменты с другими.

Можно предположить, что подобные ошибки возникали с непривычки, так как слух музыкантов не приучен к обрубленным звукам, которые по своему спектру сильно отличаются от настоящего звука с нормальной атакой. Во всяком случае, ошибку никак нельзя отнести за счет плохой работы слухового аппарата — ухо анализирует и различает спектры сложных звуков с очень высокой точностью. Человек с натренированным слухом слышит каждую из 10—15 наиболее сильных гармоник сложного звука. Дирижеры и хормейстеры четко различают в многоголосом звучании хора и оркестра голоса певцов и звучание отдельных инструментов.

Рассказывают, что известный итальянский дирижер Артуро Тосканини однажды остановил репетицию большого симфонического оркестра и сделал замечание какому-то скрипа-

чу — одна из струн его скрипки имела чуть-чуть пониженную частоту.

Изумительной способностью слухового аппарата анализировать спектры сложных звуков пользуется каждый из нас. Именно благодаря этой способности мы различаем звуки речи и можем обмениваться информацией по линиям акустической связи, проще говоря, можем разговаривать друг с другом.

Звуки речи имеют очень сложную форму кривой и очень сложный спектральный состав (рис. 7, 6). Формируются эти звуки голосовым аппаратом, который часто называют самым совершенным музыкальным инструментом. Звук образуется с помощью воздушного потока, который создают легкие. После глубокого вдоха человек может выдохнуть около 4000 см^3 воздуха, а при спокойном дыхании объем этот уменьшается в 5—10 раз. Когда мы поем, то расходует 50—100 см^3 воздуха в секунду, а при разговоре воздух расходуется еще экономнее. Интересно, что при тихом пении (пиано) опытные певцы расходуют в два раза больше воздуха, чем при громком (форте).

Легкие, подобно мехам баяна, продувают воздух через главный генератор звуковых колебаний — голосовые связки. Когда человек дышит, то голосовые связки раздвинуты, и образовавшаяся между ними щель легко пропускает воздух. Когда же мы говорим или поем, то щель сужается, а сами связки вибрируют и создают звук (рис. 7, 6, а, б). Управляют голосовыми связками особые мускулы, получающие сигналы из мозга. Меняя натяжение и длину связок, эти мускулы изменяют и основную частоту звуковых колебаний.

Далее звуковая волна проходит через сложные резонансные полости (рот, носоглотка), где окончательно формируется спектр звука. В этом процессе главную роль играют губы, язык, зубы, нос, нёбо, с помощью которых подчеркиваются определенные составляющие сложного звука, то есть создаются определенные форманты. Так, в частности, для звука «о» характерна одна формантная область, середина которой может лежать в пределах от 550 до 850 гц ; для звука «а» обнаружены две форманты — 550—850 гц и около 3 кгц ; для звука «у» три форманты — около 550, 1900 и 2990 гц .

Сложнее обстоит дело с согласными звуками — некоторые из них произносятся без участия голосовых связок, а только с помощью полости рта. Для ряда согласных характерны составляющие с очень высокими частотами: для «ш» — до 4 кгц , для «с» — до 8 кгц . Для согласной «р» характерна составляющая с очень низкой частотой — около 20 гц .

Частотный диапазон певческих голосов

Голос	Обычный диапазон (гц)	Редкий диапазон (гц)
Бас	82—293	61—349
Баритон	87—370	73—392
Тенор	110—440	98—554
Контральто	164—698	110—880
Меццо-сопрано	174—880	164—987
Сопрано	220—1047	196—1319

Несколько слов о характеристиках певческого голоса. Прежде всего мы различаем голоса певцов по их частотному диапазону (табл. 6). Приведенные в таблице цифры — это весьма условные границы, и их нельзя считать пределом. Так, например, около двухсот лет назад Моцарт слушал певицу Бастарделлу, которая довольно легко брала си третьей октавы (частота 1975 гц). А несколько лет назад в нашей стране гастролировала перуанская певица Има Сумак, которая пела не только в диапазонах женских голосов, но могла перейти в область тенора, баритона и даже баса [2].

Важная характеристика певческого голоса — вибрато. Так называют сравнительно медленное, с частотой около 6 гц, «качание» голоса. При меньшей частоте это качание кажется очень неприятным, при большей частоте в голосе слышится какая-то дрожь.

Красота звучания голоса в большей степени зависит от певческой форманты, которая лежит в области 2800 гц для мужских и в области 3200 гц для женских голосов. Значительное повышение частоты этой форманты придает голосу крикливость.

Процессы образования звуков речи и формирования певческого голоса еще далеко не изучены. Пока мы еще не можем полностью разобрать на части такую сложную характеристику, как красота певческого голоса. И вместе с тем такие точные показатели, как частота вибрато, сила голоса, частотные границы, средние частоты формантных областей, помогают оценивать голосовые данные, помогают формировать красивые голоса при обучении певцов.

При разговоре и пении человек расходует на создание звуковых волн очень небольшую мощность — даже для гром-

ких звуков она не превышает 1 *вт*. Но лишь очень небольшая часть этой небольшой мощности передается самим звуковым колебаниям, так как коэффициент полезного действия (к. п. д.) нашего речевого аппарата составляет 0,2—1%. Таким образом, расходуя мощность 1 *вт*, мы излучаем звуковые колебания мощностью не более 0,01 *вт* (10 *мвт*). Попутно заметим, что к. п. д. большинства музыкальных инструментов также очень мал: как правило, меньше 0,1%.

По мере удаления от излучателя сила звука резко убывает. Здесь действует так называемая квадратичная зависимость: если увеличить расстояние в два раза, то сила звука уменьшится в четыре раза; при увеличении расстояния в десять раз сила звука падает в сто раз.

Все приведенные цифры говорят о том, что уху достаются очень слабые звуковые сигналы. Это особенно сильно ощущается, если собеседник находится далеко от нас и его голос теряется на фоне различных посторонних шумов. Когда уровень этих шумов невелик, например в ночное время, дальность разговорной связи заметно возрастает. Однако даже в самых благоприятных условиях наибольшее расстояние, на котором люди могут переговариваться или «перекрикиваться», не превышает нескольких тысяч метров.

Звуковой связью пользуются многие представители животного мира.

Примитивной звуковой связью пользовались и первобытные люди. А затем она послужила основой для развития разумной речи, для развития мышления.

Очень четко об этом сказал Фридрих Энгельс:

«Сначала труд, а затем и вместе с ним членораздельная речь явились двумя самыми главными стимулами, под влиянием которых мозг обезьяны постепенно превратился в человеческий мозг...»

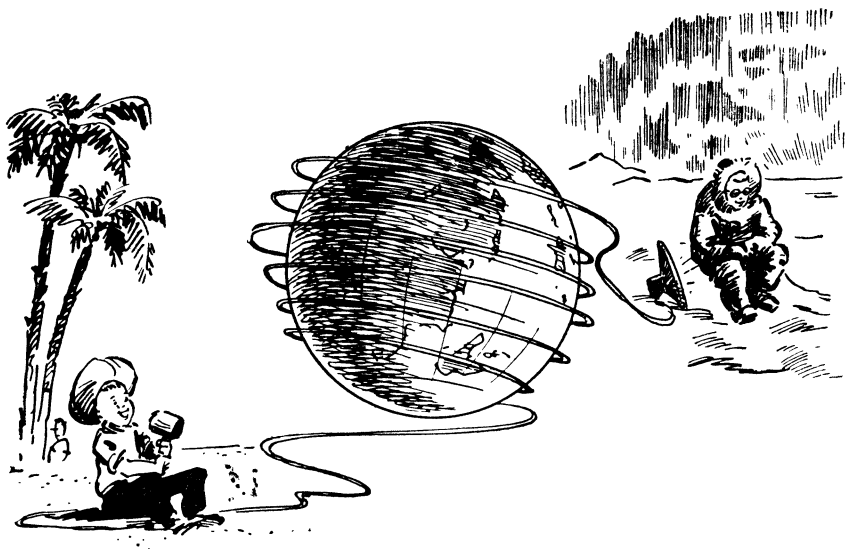
Но если наших далеких предков вполне устраивала звуковая связь, то ее оказалось явно недостаточно в наш век — век больших скоростей, могучей промышленности, в век сложных экономических связей между отдаленными районами. На помощь медленному звуку пришел электрический сигнал, который мгновенно и без усталости проходит огромные расстояния. С помощью такого замечательного союзника древнейшее изобретение природы — звуковая связь — начало совершенно новую жизнь.

В линиях акустической связи звуковые волны переносят информацию. Но каким образом записана эта информация, чем отличаются одни звуковые сигналы от других, как закодирована звуковая «телеграмма»?

Мы уже знаем, что различные звуки имеют разную форму кривой графиков, то есть различный спектральный состав. Именно в форме кривой звука, в его спектральном составе «записаны» знакомые слова, именно набором синусоидальных составляющих звук, несущий «да», отличается от звука, несущего «нет».

По образцу звуковых колебаний можно создать электрические колебания с такой же формой кривой, а значит, и с таким же спектром. В этом случае в электрических колебаниях будет записана та же информация, что и в звуковых. Электрическую копию звука можно передать на большие расстояния, отправить на длительное хранение («записать»), во много раз усилить ее мощность и, наконец, когда это понадобится, вновь превратить в звук.

В следующей главе мы познакомимся с некоторыми участниками этих интересных преобразований.



Глава II

БРИГАДА ПЕРЕВОДЧИКОВ

Общая схема передачи звука с помощью электрических сигналов выглядит так.

Первое. На передающей стороне с помощью звуковых волн создают переменный ток, график которого в точности соответствует графику звукового давления. Иными словами, на передающей стороне создается электрическая копия звука, звуковые колебания переводят на электрический «язык».

Второе. Копия звука — переменный ток — передается по линии связи. Не будем пока думать о том, как происходит эта передача. Отметим лишь, что электрический сигнал движется со скоростью $300\,000\,000$ м/сек, то есть почти в миллион раз быстрее звука, и легко преодолевает большие расстояния.

Третье. На приемной стороне с помощью переменного тока создают звук, колебания переводят с электрического «языка» на акустический. Вам, конечно, хорошо известны такие системы электросвязи, как телефон и радиотелефон. Обе они как раз и работают по схеме «звук — электричество —

звук». При телефонной связи электрическая копия звука передается по проводам. В системе радиосвязи электрическая копия путешествует от передатчика к приемнику в виде электромагнитных волн. Однако независимо от способа передачи электрического сигнала, в любой из этих систем должны быть переводчики, превращающие звуковые колебания в электрические (передающая сторона) и электрические в звуковые (приемная сторона).

Сейчас нам предстоит познакомиться с электро-акустическими переводчиками — микрофонами и громкоговорителями. Но прежде несколько слов о главном требовании, которое к ним предъявляется. Это требование можно сформулировать так: «Переводчик не должен врать».

Что нужно для того, чтобы громкоговоритель воспроизвел точно такой же звук, какой «услышал» микрофон? Для этого прежде всего необходимо, чтобы графики этих звуков были одинаковыми, чтобы у них был один и тот же спектральный состав. Ведь именно формой графика, спектральным составом отличаются одни звуки от других: звук «а» от «б», пионерская песня от старинного вальса.

Задача неискаженной передачи звука распадается на три основные части. Во-первых, нужно без искажений преобразовать звук в ток. Нужно, чтобы график тока был в точности похож на график звука, чтобы спектр тока (ток сложной формы можно представить как сумму синусоидальных токов) в точности соответствовал спектру звука. Во-вторых, нужно, чтобы весь спектр сложного тока, все его составляющие без изменения пропорции прошли по всем электрическим цепям. В-третьих, сложный ток должен быть без искажений преобразован в звук.

К сожалению, наши переводчики не всегда пунктуальны. В процессе преобразований «звук-ток» и «ток-звук», впрочем, так же, как и при передаче электрической копии по линии связи, могут возникать искажения спектра, которые, естественно, означают искажение звука.

Что такое „плохо“?

Возможны три вида искажений спектра: нелинейные, частотные и фазовые. Мы с вами будем обращать внимание только на первые два вида (нелинейные и частотные), так как третий вид искажений — фазовые — наше ухо практически не замечает.

Из-за нелинейных искажений в спектре сигнала, в дан-

ном случае в спектре звука, излучаемого громкоговорителем, появляются посторонние составляющие (рис. 16). Пример: перед микрофоном звучит чисто синусоидальный тон с частотой 100 гц, а громкоговоритель воспроизводит сложный, то есть уже непохожий, искаженный звук с составляющими 100 гц, 200 гц, 300 гц и т. д. Грубо говоря — перед микрофоном играет скрипка, а слышится тромбон.

Источником подобных искажений может быть любой элемент — например, микрофон или громкоговоритель — с нелинейной характеристикой. Сейчас мы попытаемся выяснить, что означает и к чему приводит это качество — нелинейность.

Нелинейность можно встретить в любом природном явлении: она играет важную роль в работе многих технических и особенно электронных устройств. Однако для того, чтобы не уходить далеко в сторону, мы познакомимся с нелинейной характеристикой на примере самого популярного «переводчика» — электродинамического преобразователя, который выступает как в роли микрофона, так и в роли громкоговорителя. Главные детали этого преобразователя — магнит, катушка и связанный с нею легкий упругий диффузор (рис. 13, 14, 1 и 20, 1).

Вы знаете, что вблизи катушки, по которой проходит ток, возникает магнитное поле с явно выраженными полюсами — северным и южным. Если поместить катушку нашего преобразователя в поле постоянного магнита (рис. 13) и пропустить

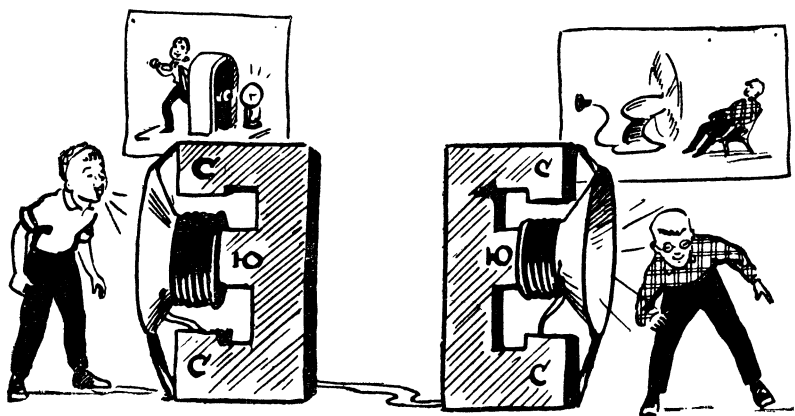


Рис. 13. Электродинамический преобразователь, подобно генератору, может преобразовать звук в ток (микрофон) либо, подобно двигателю, ток в звук (громкоговоритель).

по ней переменный ток, то в результате взаимодействия магнитных полей катушка придет в движение. При этом «танец» будет в точности следовать за «музыкой», отклоняясь, катушка будет следовать за всеми изменениями тока. Связанный с катушкой диффузор подобно струне увлечет за собой окружающий воздух и создаст звуковые волны — акустическую копию переменного тока. Так работает электродинамический громкоговоритель, иногда для краткости называемый динамиком.

Громкоговоритель — это своеобразный двигатель, превращающий электроэнергию в механическую работу. Микрофон можно смело назвать генератором, так как в нем происходит обратный процесс — за счет энергии звуковых колебаний создается ток.

Известно, что если двигать проводник в магнитном поле, то в результате электромагнитной индукции (наведения) на концах этого проводника появится э. д. с. (электродвижущая сила). Подключим к проводнику нагрузку, то есть создадим замкнутую электрическую цепь, и под действием наведенной э. д. с. в цепи пойдет электрический ток. Чем быстрее движется проводник, тем больше наведенная э. д. с., тем больше и ток в цепи.

Когда на электродинамический преобразователь попадают звуковые волны, они увлекают за собой диффузор, и он колеблется, повторяя все изменения звукового давления. Вместе с диффузором приходит в движение расположенная в магнитном поле катушка, и в ее цепи появляется ток — электрическая копия звуковых колебаний. Так работает электродинамический микрофон.

Работу громкоговорителя и микрофона можно проиллюстрировать с помощью графиков. Один из таких графиков приведен на рис. 15. Он показывает, как диффузор громкоговорителя отклоняется от условной средней линии положения покоя. Из графика видно, что, чем больше ток, тем дальше отклоняется диффузор, а токам разного направления соответствует отклонение в разные стороны (вперед-назад). Приведенный график часто называют амплитудной характеристикой.

Обратите внимание: при сравнительно небольших изменениях тока, в пределах от -2 до $+2$ а, график представляет собой прямую линию. В таких случаях обычно говорят, что зависимость между отклонением диффузора и током в катушке носит линейный характер. Как видите, на линейном участке отклонение растет прямо пропорционально току. Увеличение тока на 1 а всегда дает отклонение на 0,5 мм.

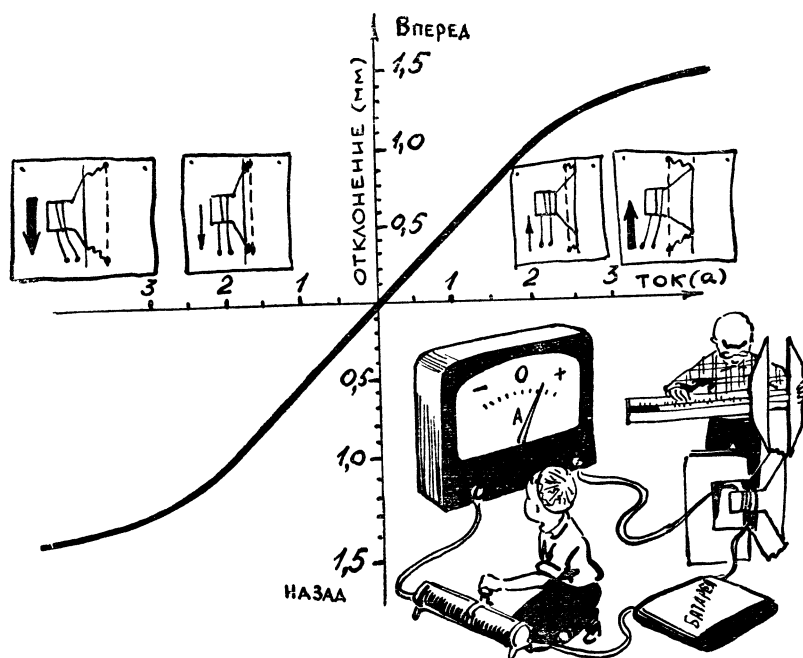


Рис. 15. В некотором интервале (на этом рисунке от -2 а до $+2\text{ а}$) амплитудная характеристика громкоговорителя линейна: отклонение диффузора прямо пропорционально току в звуковой катушке.

Для токов, больших, чем 2 а , линейный характер зависимости уже нарушается, на графике появляются изогнутые (нелинейные) участки, так называемые загибы. Появление их объясняется очень просто — ток не может беспредельно отклонять диффузор, иначе в какой-то момент он просто сорвется с места и улетит на Луну¹. Диффузор закреплен достаточно прочно, и амплитуда его отклонений ограничена. Вот почему после некоторого значения тока (в нашем примере 2 а) отклонение становится все меньше и меньше и, наконец, при токе 3 а почти совсем прекращается. Именно об этом и говорят нелинейные участки — загибы на графике.

До тех пор пока громкоговоритель работает на линейном участке (ток не более 2 а) и отклонение прямо пропорционально току (каждый ампер отклоняет диффузор на $0,5\text{ мм}$),

¹ В этой шутке есть доля правды. При чрезмерно большом токе, то есть при перегрузке громкоговорителя, иногда случается, что диффузор или катушку буквально срывает с места.

преобразование «ток — звук» происходит без нелинейных искажений — переводчик «не врет». Именно об этом рассказывает тройной график на рис. 16. С подобными графиками нам предстоит встретиться во всех разделах книги, а поэтому есть смысл сразу же выяснить, как они строятся и о чем говорят.

Основой совмещенного тройного графика (рис. 16) является уже знакомая нам (рис. 15) амплитудная характеристика громкоговорителя (*А*), показывающая, как отклонение диффузора зависит от тока в катушке. Снизу к этой характеристике пристроен график тока (*Б*). Он показывает, как меняется ток с течением времени. График тока очень похож на графики колебаний струны (рис. 1) и звукового давления (рис. 4). На рис. 16 график тока выглядит несколько непривычно только потому, что мы его положили набок. Сделано это для того, чтобы ось тока легла параллельно такой же оси на амплитудной характеристике громкоговорителя. Теперь мы можем быстро и легко определять отклонение диффузора для любого момента времени: достаточно перебросить мостик — пунктирную линию от графика тока к характеристике громкоговорителя.

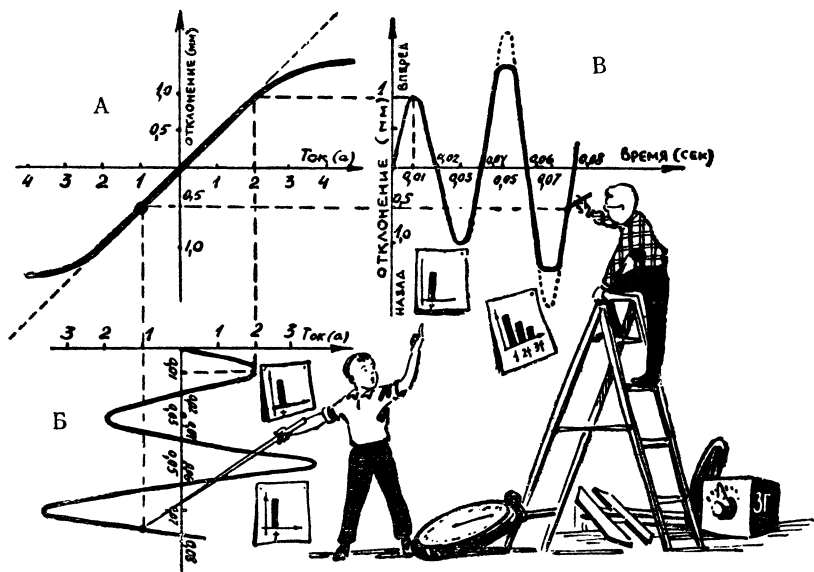


Рис. 16. Если ток в звуковой катушке выходит за пределы линейного участка, возникают нелинейные искажения: изменяется форма сигнала, и в его спектре появляются посторонние составляющие.

Попробуем сделать последний, третий шаг — построить график отклонения (B), который покажет, как колеблется диффузор, в какую сторону и насколько он отклоняется в тот или иной момент. Последовательность построения такова: выбираем какой-либо момент времени на графике отклонений (например, $0,01 \text{ сек}$); берем такой же момент времени на графике тока; находим для этого момента времени величину тока ($+2 \text{ а}$); по характеристике громкоговорителя находим соответствующее этому току отклонение диффузора (1 мм); переносим найденную величину на график отклонений и делаем отметку против выбранного значения времени ($0,01 \text{ сек}$).

Сделав достаточно большое количество таких построений, мы и получим график отклонений диффузора. Подобные тройные графики часто строят на основе характеристики электронной лампы, полупроводникового прибора, трансформатора и т. д.

График для первого периода, то есть до момента $0,04 \text{ сек}$, показывает, что если громкоговоритель работает на линейном участке амплитудной характеристики, то отклонение и ток имеют одинаковую форму кривой, а значит, и одинаковый спектральный состав.

Совсем иначе обстоит дело, если переменный ток выходит на нелинейный участок характеристики (амплитуда тока более 2 а). В этом случае (во время второго периода колебаний, от $0,04$ до $0,08 \text{ сек}$) прямая пропорция между отклонением диффузора и током в катушке нарушается, верхушки графика отклонения получаются приплюснутыми, форма кривой изменяется и в спектре появляются новые составляющие. Появление этих новых составляющих (в нашем случае это гармоники с частотой $2f$, $3f$ и т. д.) является следствием нелинейности характеристики (в нашем случае — характеристики громкоговорителя) и называется нелинейным искажением сигнала (в нашем случае — звука). Если бы характеристика была линейной, то форма кривой не была бы искажена и в спектре не оказалось бы посторонних составляющих.

В заключение нам остается договориться о количественной оценке — ввести коэффициент нелинейных искажений $K_{н.и.}$. Этот коэффициент (иногда его называют «клирфактор» — показатель ясности — и обозначают K_j) показывает, насколько сильны новые, появившиеся в результате искажений составляющие, сколько процентов общей мощности приходится на их долю. Вот как подсчитывается этот коэффициент:

$$K_{н.и.} = \frac{\text{мощность новых составляющих сигнала (звука)}}{\text{общая мощность сигнала (звука)}} \cdot 100\%.$$

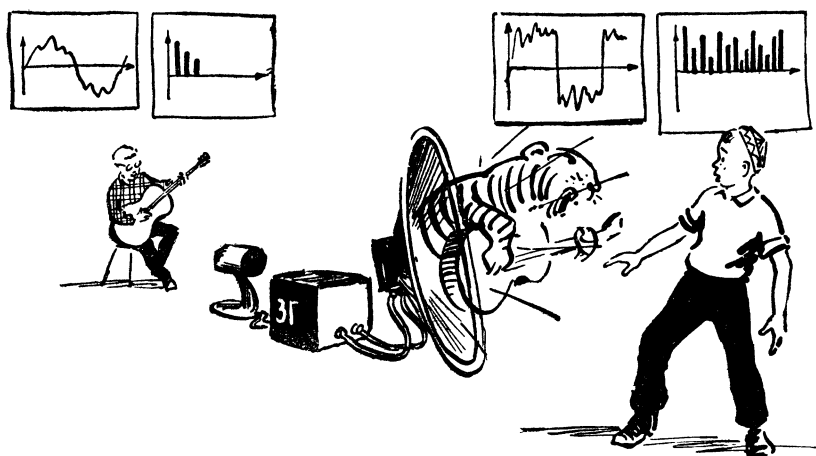


Рис. 17. В результате нелинейных искажений звук становится хриплым, дребезжащим, загрязненным посторонними призвуками.

Существуют приборы, которые, анализируя спектр на входе и на выходе какого-либо устройства, могут очень точно измерить коэффициент нелинейных искажений. Предварительно отметим, что при воспроизведении музыки ухо обычно замечает нелинейные искажения уже начиная от 4—7%. При больших значениях $K_{н.и}$ нелинейные искажения заметны сильнее. Они меняют тембр звука, создают посторонние призвуки и неприятное хрипение (рис. 17). Особенно неприятны нелинейные искажения, когда, кроме гармоник (их частота кратна основной), появляются составляющие с комбинационными частотами.

Как видите, нам пришлось провести большую подготовительную работу и затратить довольно много времени, чтобы пояснить, что такое нелинейные искажения. О том, что такое частотные искажения, рассказать намного проще — это просто неодинаковое, «несправедливое» отношение к составляющим различных частот. Пример: подводим к громкоговорителю три синусоидальных переменных тока с разными частотами и с одинаковой — подчеркиваем, с одинаковой (!) — амплитудой, а он, громкоговоритель, создает три звука разной — заметьте, разной (!) — силы (рис. 18). Это значит, что громкоговоритель вносит частотные искажения — неодинаково хорошо преобразует в звук переменные токи разных частот.

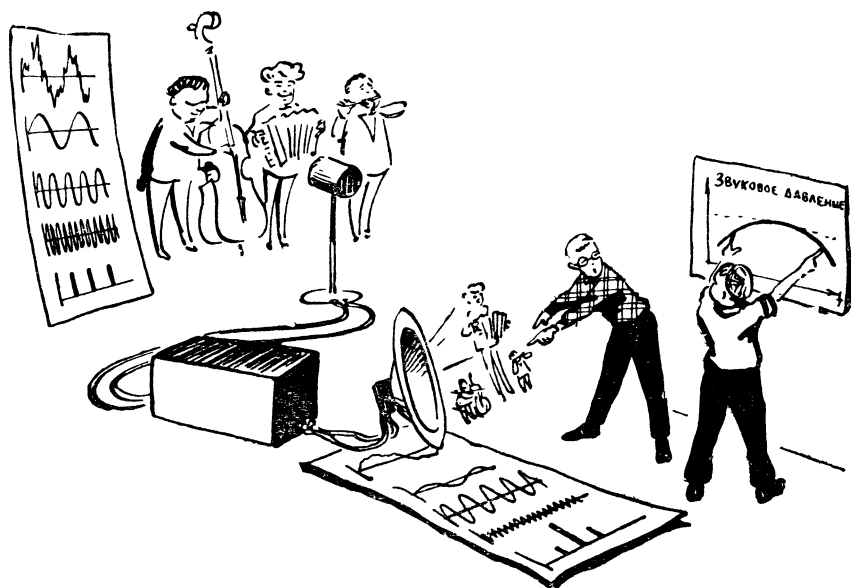


Рис. 18. В результате частотных искажений меняется соотношение между составляющими сложного звука, меняется его тембр, ослабляется звучание некоторых инструментов.

Причины частотных искажений громкоговорителя различные. Вот одна из них: на высших частотах начинает сказываться инерция диффузора, он не поспевает за быстрыми изменениями тока и поэтому с повышением частоты все хуже излучает звук.

Чтобы можно было судить о частотных искажениях в каком-либо устройстве, в том числе в громкоговорителе и микрофоне, чаще всего рисуют его частотную характеристику. Частотная характеристика громкоговорителя (рис. 19) показывает, как изменяется звуковое давление или сила звука, если менять частоту переменного тока в звуковой катушке, поддерживая неизменной его амплитуду.

Опорной точкой частотной характеристики договорились считать частоту 1000 гц. Работу громкоговорителя или микрофона на других частотах сравнивают с тем, что они дают на частоте 1000 гц, и, исходя из этого, говорят о завале или подъеме частотной характеристики, то есть об ослаблении или усилении тех или иных составляющих.

Четыре возможные частотные характеристики показаны

на рис. 19, внизу справа. На первой из них (а) завалены низшие частоты, на второй (б) — высшие. К сожалению, в реальном случае оба эти недостатка объединяются: обычно завалены как высшие, так и низшие частоты (в).

Звуковое давление или силу звука, как правило, указывают в децибелах, и это позволяет довольно просто оценить степень подъема (обозначают знаком «+»), либо завала (знак «—») характеристики, степень частотных искажений. За нулевой уровень принимают звуковое давление (силу звука) на частоте 1000 гц.

Иногда вводят коэффициент частотных искажений — $K_{ч.и.}$, который показывает, на сколько децибелов (или, что то же самое, во сколько раз) сила звука на той или иной частоте сильнее или слабее, чем на частоте 1000 гц. Так, если указано, что $K_{ч.и.-200} = 20 \text{ дб}$, а $K_{ч.и.-5000} = -10 \text{ дб}$, то это означает, что при одном и том же токе в звуковой катушке сила звука на частоте 200 гц будет в 100 раз (на 20 дб) больше, а на

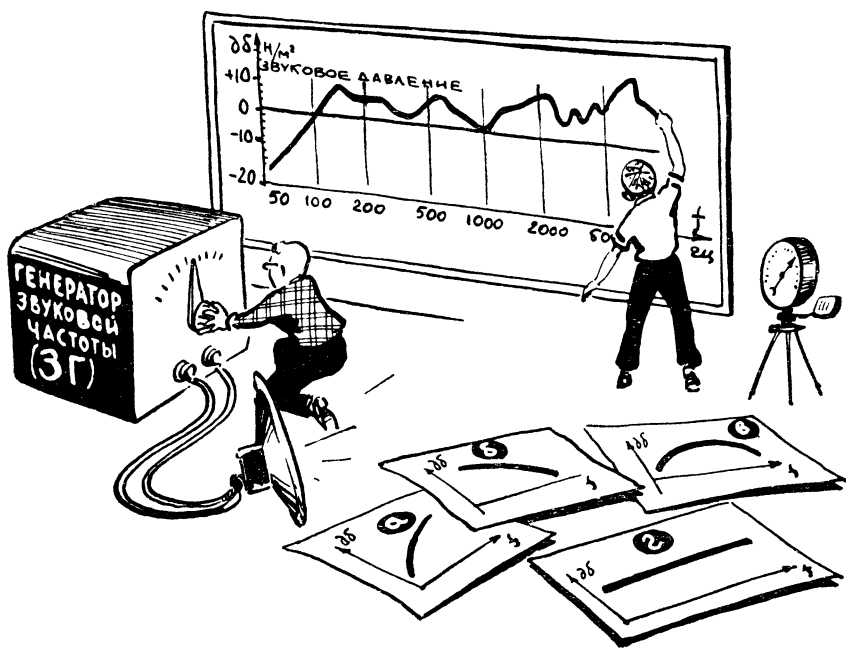


Рис. 19. Частотная характеристика громкоговорителя показывает, как изменяется звуковое давление при изменении частоты тока (синусоидального) в звуковой катушке; величина тока на всех частотах одинакова.

частоте 5 кгц в 10 раз (на 10 дб) меньше, чем на опорной частоте 1000 гц.

По частотной характеристике легко определить значение $K_{ч.и}$ для любой частоты.

Частотные искажения, так же как и нелинейные, приводят к изменению формы сигнала (в частности, звука), к изменению его спектра. Однако в результате частотных искажений никаких новых составляющих не возникает, а лишь меняется соотношение старых. При этом резко меняется тембр звука, из оркестра исчезают целые группы инструментов, неузнаваемыми становятся голоса певцов. Завал низших частот резко ослабляет звучание контрабаса, барабана, рояля. Если завалены высшие частоты, то прежде всего исчезают скрипки и флейты, звук становится глухим, бубнящим.

Конечно, нам хотелось бы, чтобы частотная характеристика всех наших переводчиков и других звеньев системы передачи звука была идеальной, то есть имела бы вид прямой линии во всем диапазоне от 16 гц до 22 кгц (рис. 19, г.). В этом случае соотношение между всеми слышимыми составляющими сложных звуков оставалось бы неизменным и мы были бы гарантированы от изменений тембра и других подобных неприятностей. Но (опять эти «но»!) создание идеальной частотной характеристики во всем диапазоне слышимых частот — задача чрезвычайно сложная, и эту сложность вы вскоре почувствуете сами. Конструкторы, конечно, стремятся к равномерной частотной характеристике, но в разумных пределах. В дорогих и сложных системах высококачественного звучания диапазон воспроизводимых частот должен быть весьма широким. В простых, недорогих установках приходится идти на значительное сужение диапазона, а значит (что поделаешь!), на заметные частотные искажения, на ухудшение качества звучания.

В результате большого числа экспериментов было предложено все аппараты для воспроизведения звука разделить на четыре класса (не путайте с классами приемников — здесь нет прямого совпадения) и для каждого из них установить такую полосу частот:

Высший класс — от 30—40 гц до 14—15 кгц (неискаженное воспроизведение звука); неравномерность характеристики — 6 дб.

Первый класс — от 50 гц до 10 кгц (высококачественное воспроизведение звука); неравномерность характеристики — 6 дб.

Второй класс — от 100 гц до 6 кгц (воспроизведение среднего качества); неравномерность характеристики — 16 дб.

Третий класс — от 150—200 гц до 4 кгц (воспроизведение низкого качества); неравномерность характеристики — 16 дб.

Переход в каждый следующий, более высокий класс, например из третьего во второй или из второго в первый, связан со значительным усложнением аппаратуры. Оправдано ли это? Стоит ли затрачивать энергию, время, средства на то, чтобы на несколько килогерц расширить частотную характеристику?

Для разборчивого воспроизведения речи вполне пригодна аппаратура третьего класса. Как правило, нас удовлетворяет даже обычный телефон, где верхняя граничная частота составляет 2,5 кгц, а иногда даже 1,5 кгц. Голос собеседника при этом очень сильно искажен, однако обычно это нас не огорчает — главное, чтобы был понятен смысл сказанного.

Совсем иначе обстоит дело с воспроизведением музыки. Здесь мы уже не можем сказать: «Искажения? Пустяки! Главное, чтобы можно было догадаться, какая мелодия...» При воспроизведении музыки искажения, и в первую очередь частотные, могут оказаться той самой ложкой дегтя, с которой и бочка меда не нужна. Во всяком случае, аппаратура третьего класса воспроизводит музыку с весьма заметными искажениями, и звучит эта музыка, прямо скажем, плохо.

Правда, точных границ между «хорошо» и «плохо» никто не устанавливал — заметность частотных искажений, так же как и нелинейных, зависит от многих факторов и в том числе от вкуса слушателя, его музыкальности, тренировки, тонкости слуха и, если хотите, от настроения и характера. Есть люди, для которых «лишь бы играло», «лишь бы музыка», а то, что под эту музыку даже не всякий цирковой слон согласится танцевать, — для них это несущественно. Наверняка никто из нас не захочет есть пирожное, в которое кондитер по рассеянности вместо сахара и крема положил горчицу и перец. А вот музыку, в каждый звук которой композитор вложил определенный смысл, определенные мысли и чувства, мы иногда готовы проглотить, не замечая «перца» и «горчицы». О качестве звучания, о высокой верности воспроизведения звука мы еще не раз будем вспоминать. Но сейчас, поскольку к слову пришлось, хочется посоветовать: сравните звучание карманного приемника (от него многого не потребуешь, здесь главное — габариты, вес, экономичность) и хорошей радиолы первого или даже второго класса. Такое сравнение наверняка поможет вам понять, «на что идут деньги», зачем мы строим сложную и дорогую звуковоспроизводящую аппаратуру высоких классов, почему добиваемся минимальных частотных и нелинейных искажений.

Мы с вами в самом общем виде познакомились с принципом работы главных переводчиков, с некоторыми характеристиками их работы. Теперь поговорим о конкретных типах громкоговорителей и микрофонов, применяемых в радиолубительской аппаратуре. Начнем с микрофонов.

Все начинается с микрофона

Данные некоторых распространенных микрофонов приведены в табл. 7. В ней наряду с уже знакомыми нам характеристиками — полоса частот и неравномерность частотной характеристики (рис. 21) — вы встретите и неизвестные. Среди них — чувствительность. Она показывает, какое напряжение дает микрофон под действием звукового давления 1 н/м^2 .

Таблица 7

Микрофоны

Тип микрофона	Полоса частот (гц)	Неравномерность (дб)	Чувствительность (мв на 1 н/м^2)	Сопротивление нагрузки (ом)	Направленность
МДО-1	150—8000	15	0,63	250	ОН
МД-62	100—10 000	12	0,2	250	НН
МД-59	50—15 000	8	0,63	250	НН
МД-57	50—13 000	10	0,63	250	НН
МД-44	100—8000	12	0,63	250	ОН
МДМ-1	100—5000	12	2,5	3000	ОН
МД-41	100—5000	25	30	500 000	НН
МД-47	100—10 000	20	15	500 000	НН
ДЭМ-4м	300—3000	20	10	500 000	ОН
ДЭМШ-1	400—4000	20	0,5		
„Слух“ (с. а.)	100—5000	20	40		
МК-10	300—3500	20	1 000		
МК-59	300—5000	20	200		
ТОН-1 (тел.)	500—5000	20	50		

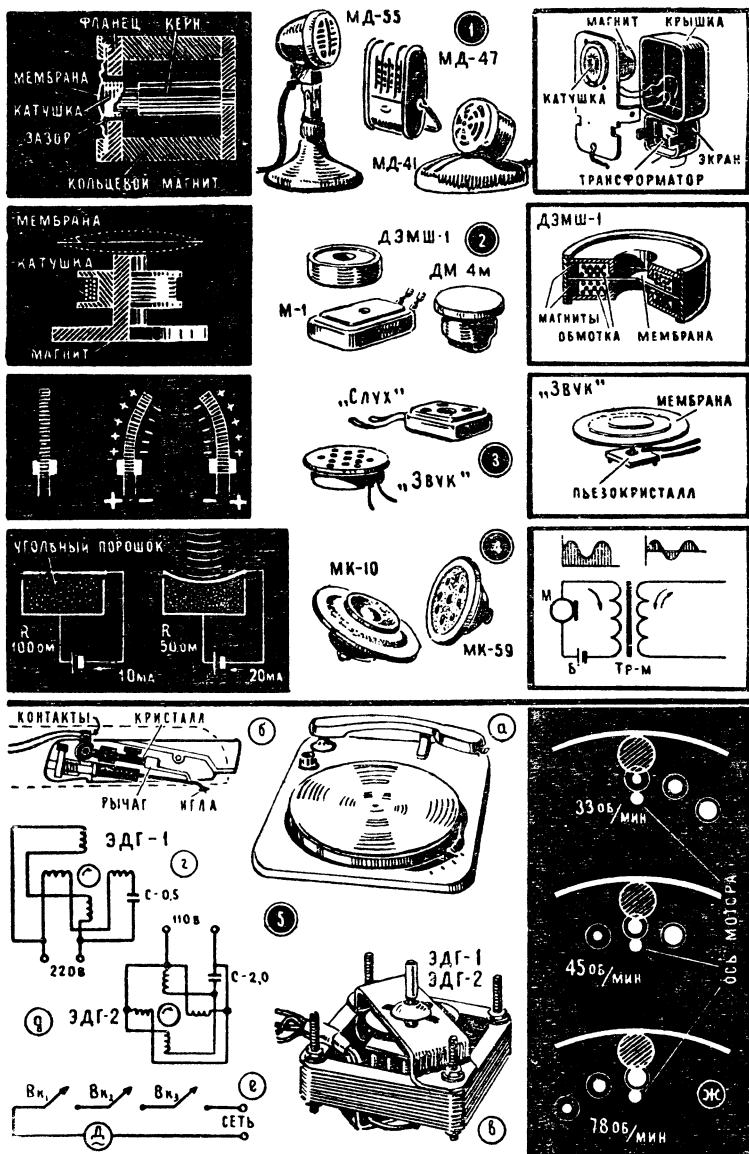


Рис. 20. Микрофон и электропроигрыватель.

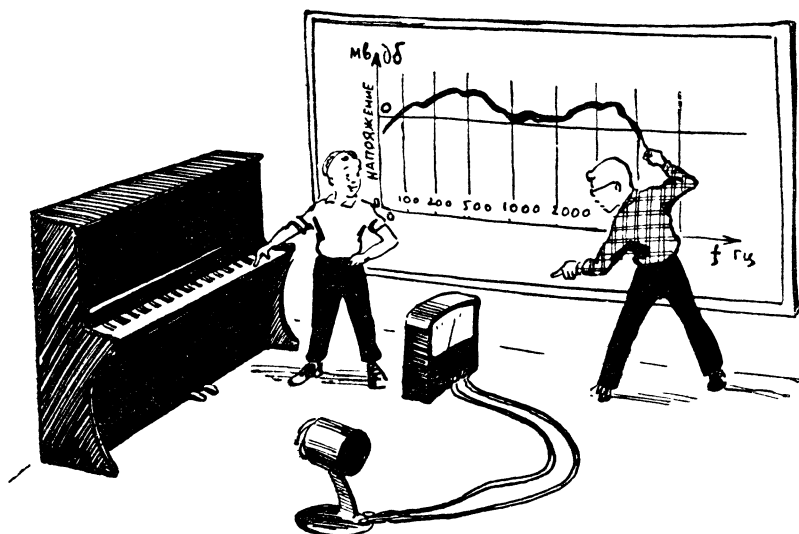


Рис. 21. Частотная характеристика микрофона показывает, как зависит выходное напряжение от частоты звука при неизменном звуковом давлении.

Чем лучше микрофон преобразует звуковую энергию в электрическую, тем больше его выходное напряжение при одном и том же звуковом давлении, тем, следовательно, выше чувствительность [3].

В табл. 7 указано также рекомендованное сопротивление нагрузки, то есть сопротивление, на которое должна работать звуковая катушка микрофона. Если сделать сопротивление нагрузки больше, то возрастут искажения, а если меньше — снизится чувствительность.

Есть микрофоны (они называются направленными), которые по-разному реагируют на звуки, идущие с различных направлений. Иногда такие микрофоны очень удобны — они, например, хорошо «слышат» голос певца и «не обращают внимания» на шум в зале. Можно построить своего рода карту, которая покажет, как меняется чувствительность при изменении направления звука. Такая карта (рис. 22) называется диаграммой направленности. Ее легко получить, если обойти с источником звука вокруг микрофона и одновременно измерять выходное напряжение. Наиболее часто встречаются диаграммы трех видов: круговая (ненаправленный микрофон —

НН), кардиоидная, то есть напоминающая очертания сердца (однаправленный микрофон — ОН), и «восьмерка» (двухнаправленный микрофон — ДН). Сокращенные обозначения вида направленности приведены в таблице.

Среди всех электродинамических микрофонов (МД) есть несколько типов (МД-41, МД-47, МД-55) с весьма высокой чувствительностью. Она достигается благодаря тому, что внутри микрофона установлен миниатюрный трансформатор или автотрансформатор, повышающий выходное напряжение. Без такого трансформатора чувствительность микрофона резко падает и мало отличается от чувствительности других динамических микрофонов.

Высокое рекомендованное сопротивление нагрузки микрофонов также всегда связано с использованием трансформаторов.

Микрофонный трансформатор повышает выходное напряжение в 15—25 раз. Вот данные одного из таких трансформаторов (микрофон МД-47). Первичная обмотка — 140 витков, провода ПЭЛШО = 0,25; вторичная обмотка — 3500 витков, провода ПЭВ = 0,13; сердечник — кольцо, свернутое из пермаллоевой ленты шириной 9 мм. Для того чтобы защи-

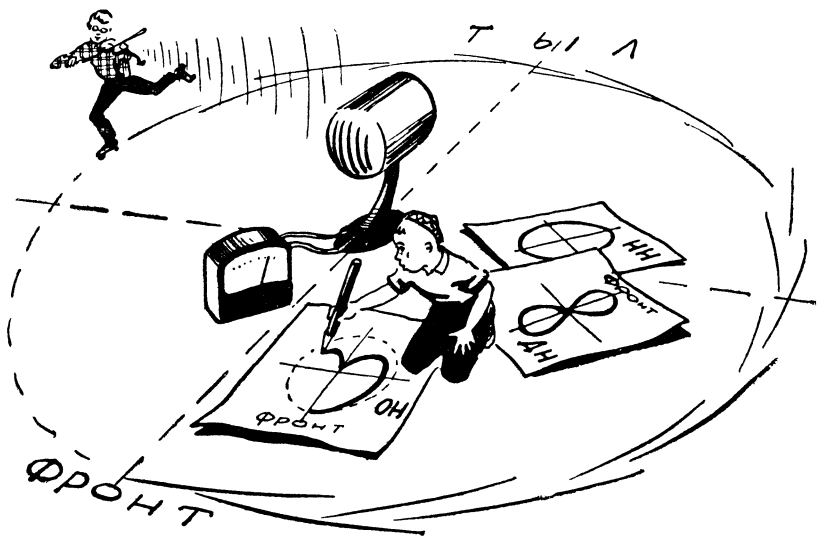


Рис. 22. Диаграмма направленности микрофона показывает, как зависит его чувствительность от направления, с которого приходит звук. Различают микрофоны ненаправленные (НН), однаправленные (ОН) и двухнаправленные (ДН).

тить трансформатор от внешних электрических и магнитных полей, его прячут в экран из толстого (до 5—8 мм) пермаллоя или мягкой стали. С той же целью оба провода, которые выходят из микрофона, заключены в экранирующий чулок.

В последние годы получили распространение миниатюрные электромагнитные микрофоны М-1 (для транзисторных слуховых аппаратов), ДЭМШ-1 и ДЭМ-4м. По своему устройству они напоминают хорошо всем известный электромагнитный преобразователь — головной телефон (наушник). Основой здесь являются постоянные магниты, прилегающая к ним неподвижная катушка с весьма большим числом витков и легкая подвижная стальная мембрана (рис. 20, 2).

Электромагнитные преобразователи устроены так, что колебания мембраны приводят к изменению магнитного поля катушки, и на ее концах появляется э. д. с. И наоборот, если пропустить по катушке низкочастотный переменный ток, то мембрана придет в движение и создаст звуковые волны. Это значит, что электромагнитные переводчики, так же как и электродинамические, могут работать как в качестве микрофона, так и в качестве громкоговорителя (здесь, пожалуй, вместо «громко» правильнее было бы поставить «тихо»). Головной телефон (ТОН-1) мы ввели в таблицу не только для сравнения. Когда под руками не найдется ничего другого, как говорят радисты, «в аварийном случае», он может взять на себя и роль переводчика-микрофона.

Особую группу составляют так называемые пьезомикрофоны (рис. 20, 3). «Сердце» такого микрофона — кристалл с пьезоэлектрическим эффектом. При сжатии или растяжении этого кристалла на нем появляется электрическое напряжение. Благодаря этому пьезокристалл прекрасно справляется с обязанностями переводчика: под действием звуковых волн, то есть под действием переменного звукового давления, создает переменное напряжение — электрическую копию звука. Иногда любители применяют пьезомикрофоны от слуховых аппаратов «Звук», «Слух» и «Кристалл».

В таблице вы найдете и микрофонные капсюли от телефонных аппаратов (МК-10, МК-59). Вы, очевидно, знаете, как работают эти переводчики. Под действием звуковых волн меняется давление на угольный порошок, которым заполнен капсюль (рис. 20, 4), меняется плотность, а значит, и электрическое сопротивление порошка. Если пропустить через капсюль ток, то, согласно закону Ома (величина тока зависит от сопротивления цепи), он будет меняться, превращаясь в электрическую копию звука.

Сам по себе угольный капсюль — это еще не микрофон,

к нему необходимо добавить источник постоянного тока, например батарейку на 1—1,5 в. Кроме того, капсюль обычно включают через трансформатор (*Тр-м*), который отделяет переменный ток от постоянного. Постоянный ток, как известно, через трансформатор не проходит, и поэтому во вторичную обмотку (обмотка II) попадает лишь основная продукция микрофона — переменное напряжение низкой частоты. Существуют и другие схемы включения угольных микрофонов (рис. 68, 7).

Главное достоинство угольных микрофонов — высокая чувствительность — определяется тем, что на создание электрической копии звука расходуется энергия батареи. Начальную величину тока, от которой сильно зависит чувствительность, устанавливают в зависимости от общего сопротивления капсюля. Для низкоомных капсюлей (сопротивление до 50 ом) рекомендуется сила тока до 80 ма, для среднеомных (70—150 ом) — не более 50 ма и для высокоомных (150—300 ом) — не более 25 ма. Если уменьшить начальный ток, уменьшится и чувствительность, но при этом снизятся все виды искажений.

Самое главное, что нужно знать об электромагнитных телефонах (наушниках) и угольных капсюлях, — это то, что их нельзя вынимать из телефонных аппаратов и особенно из телефонов-автоматов. Тот, кто выдернет капсюль или наушник из действующего телефона, — самый настоящий преступник. Сам того не зная, он может стать даже убийцей. Не верите? А вы представьте себе, как ночью люди мечутся от одного испорченного телефона к другому, тщетно пытаясь вызвать «скорую помощь» или пожарную машину. . .

Наушники и капсюли стоят недорого, и не так-то уж сложно их купить. Ну, а если вы не найдете их в магазине, обратитесь на любой телефонный узел, в любую воинскую часть связи, и вам там наверняка не откажут.

Вы уже, очевидно, обратили внимание на то, что вся табл. 7 разделена на три части. В первую попали так называемые профессиональные микрофоны, предназначенные для студий радиовещания, телевидения и звукозаписи, для концертных залов. Любители такие микрофоны применяют редко: они нужны лишь тогда, когда все остальное оборудование, в том числе и студия, где установлен микрофон, достойны его высоких качественных показателей.

Третья, самая нижняя часть таблицы отводится микрофонам, для которых характерны сравнительно большие искажения, особенно частотные. Для речевых передач эти микрофоны еще пригодны, а вот музыку могут сильно исказить.

Наиболее широко радиолюбители применяют динамические микрофоны, данные которых приведены в средней части табл. 7. В этих микрофонах простота, надежность и сравнительно невысокая стоимость сочетаются с вполне удовлетворительными характеристиками. Любительские микрофоны обычно отличаются высокой чувствительностью (за счет трансформатора) при довольно широкой полосе частот.

У микрофона есть много «коллег», которые так же, как и он сам, создают электрические копии звуковых колебаний. Разница лишь в том, что микрофон, образно говоря, переводит на электрический язык то, что слышал сам, а его «коллеги» специализировались на переводе письменных источников. Вы уже, очевидно, догадались, что «коллеги», о которых идет речь, — это считывающие устройства в системах звукозаписи: магнитные головки, звукоосцилляторы, фотоэлементы. Многие «коллеги» одновременно являются близкими «родственниками» микрофона, так как очень похожи на него по своему устройству и принципу действия.

Записать звук — это значит создать своего рода график —

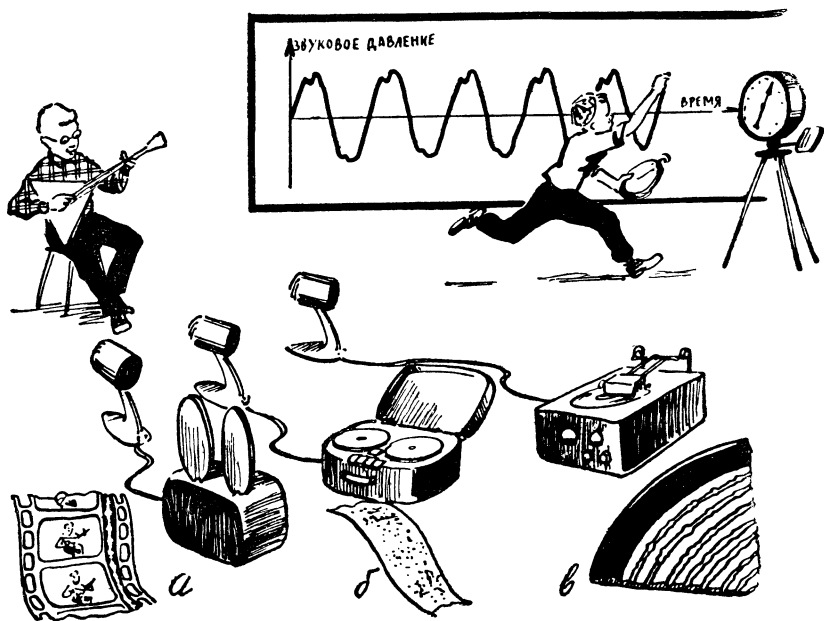


Рис. 23. Записать звук — это значит создать своего рода график (фонограмму), где тем или иным способом будет отмечено, как менялось звуковое давление с течением времени.

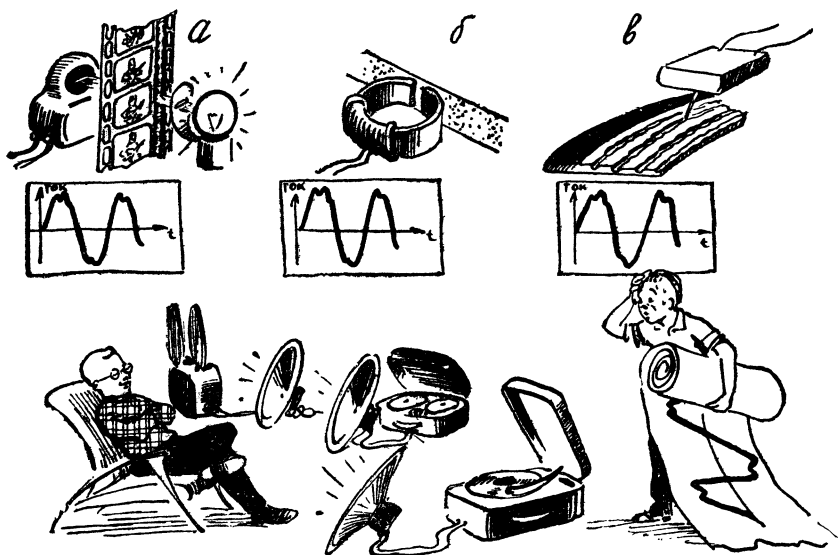


Рис. 24. При воспроизведении звука считывающее устройство (фотоэлемент, магнитная головка, звукоосниматель) «просматривает» фонограмму и создает электрический сигнал — копию звука. В дальнейшем эта электрическая копия превращается в звук.

его называют фонограммой, в котором каким-то образом отражались бы изменения звукового давления. Так, фонограмма звукового кино — это узкая прозрачная полоска (рис. 23, а, 24, а), ширина которой меняется, чем-то напоминая кривую на обычном графике звука. От ширины прозрачной полоски зависит количество света, попадающего на фотоэлемент. Поэтому, когда пленка движется перед фотоэлементом, ток в его цепи меняется, превращаясь в электрическую копию записанного звука. В реальных киноустановках с фотоэлемента получают низкочастотное напряжение 0,5—5 мв.

Магнитная фонограмма — это тоже своего рода график, нарисованный «магнитными чернилами». Изменения звукового давления отражены в изменениях намагниченности стальной проволоки или специальной пленки с тонким слоем окислов железа. Чем громче звук, чем выше амплитуда звукового давления, тем сильнее магнитный след, оставленный на фонограмме в процессе записи. Пленка движется мимо тонкой щели магнитной головки (катушка на сердечнике), плотно прилегая к ней (рис. 24, б). При этом меняется магнитное поле, которое пленка создает в сердечнике, и в катушке на-

водится переменный ток. Ток повторяет все изменения намагниченности пленки, то есть в итоге все изменения звукового давления. Как видите, воспроизводящая магнитная головка по принципу действия чем-то напоминает электромагнитный микрофон (рис. 24, б). Типичные головки развивают низкочастотное напряжение до 0,5—10 мв.

Самая простая, самая популярная и, пожалуй, самая удобная фонограмма — это обычная граммофонная пластинка. Звук записан на пластинке (диске) в виде тонкой извилистой спиральной канавки, а «считывание» осуществляет звукосниматель, игла которого тщательно «ощупывает» канавку (рис. 23, в, 24, в).

В последние годы достигнуто весьма высокое качество грамзаписи. В частности, частотная характеристика фонограммы лежит в пределах 100 гц — 16 кгц при неравномерности до 20 дб. А еще недавно частота 4,5 кгц считалась предельной. С появлением долгоиграющих пластинок в значительной мере уменьшился главный недостаток грамзаписей — высокий уровень собственных шумов.

Современные звукосниматели очень напоминают пьезоэлектрический микрофон. Игла, двигаясь по звуковой канавке, колеблется, следуя за всеми ее изгибами. Колебания иглы передаются пьезокристаллу, и на нем появляется переменное напряжение низкой частоты. Внешний вид, устройство и основные детали одного из распространенных звукоснимателей показаны на рисунке 20, 5, б. Вот некоторые цифры, характеризующие его работу: вес звукоснимателя, приведенный к концу иглы, не превышает 5—12 г; диаметр кончика иглы для обычных пластинок 20 мк, для долгоиграющих — 8 мк; амплитуда колебаний иглы, соответствующая самым громким звукам, — 30 мк, самым тихим — 0,3 мк; этим колебаниям соответствует напряжение на кристалле 2 и 200 мв; рекомендованное сопротивление нагрузки звукоснимателя 100—500 ком.

На этом мы заканчиваем знакомство с микрофоном, его «коллегами» и «родственниками». Настала очередь громкоговорителей.

Громкоговоритель

Конструктивной основой электродинамического громкоговорителя (рис. 14, 1) можно считать штампованный корпус из довольно толстой (0,5—2 мм) листовой стали. К нему прикреплена магнитная система, которая чаще всего имеет форму стакана или скобы. Сам постоянный магнит изготовлен из

специальных сплавов АЛНИ, АНМ, АНКО, в которые входит железо, алюминий, никель, а в последний сплав — еще и кобальт. В последнее время широко применяется магнитная керамика — фероксдур. Это особым образом спрессованные порошки окислов железа и бария, сильно намагниченные и спекшиеся при высокой температуре. Керамические магниты официально называют МБА — магниты бариевые анизотропные. Магнитную систему конструируют так, чтобы самое сильное поле было в зазоре между керном и фланцем, то есть там, где находятся витки звуковой катушки.

Звуковая катушка намотана на плотном бумажном или картонном каркасе и вся вместе с обмоткой пропитана бакелитовым лаком. Обмотка выполнена медным проводом диаметром 0,1—0,12 мм (малая мощность) или 0,15—0,2 мм (мощность более 1 *ва*). Провод уложен в два, а иногда и четыре слоя, чтобы оба вывода были направлены в сторону диффузора. Наиболее распространены катушки с сопротивлением 2—12 *ом* (табл. 8), и поэтому динамические громкоговорители часто называют низкоомными. В последнее время, правда, начинают появляться и высокоомные динамики, но о них будет отдельный разговор (стр. 234).

Рассмотрим некоторые характеристики громкоговорителя.

Громкоговоритель неодинаково хорошо превращает в звук электрические сигналы разных частот, иными словами, вносит частотные искажения. Частотная характеристика громкоговорителя в основном определяется размерами, конструкцией, материалом, способом подвески диффузора. Материалом для диффузора, как правило, служит бумажная масса, часто с примесью шерсти; основная технология — литье, штамповка. Громкоговорители с небольшим диффузором плохо воспроизводят низшие частоты и хорошо высшие — небольшой, подвижный, легкий диффузор послушно следует за самыми быстрыми изменениями тока. Диффузор большого диаметра, наоборот, плохо воспроизводит высшие частоты, так как его «дальние районы» не успевают за быстрыми движениями звуковой катушки. Зато громкоговорители с большим диффузором хорошо воспроизводят низшие частоты, и их часто называют низкочастотными.

Частотная характеристика в области низших частот в огромной степени зависит от резонансных свойств подвижной системы громкоговорителя. Диффузор, звуковая катушка, центрирующая шайба образуют самую настоящую колебательную систему, своего рода гитарную струну. Частота собственных колебаний этой «струны» обычно лежит в пределах 30—300 *гц*. Если подвести к громкоговорителю переменный

Таблица 8

Электродинамические громкоговорители

Тип громкогово- рителя ¹	Полоса частот (гц)	Резонансная частота (гц)	Неравномерность (дб)	Полное сопротивление (ом) на частоте 1000 гц	Габариты (мм)	Вес (г)
1ГД-9	100—7000	95	14	6,5	156 × 98 × 56	250
1ГД-28	200—10 000	150	15	6,5	156 × 98 × 41	200
	100—10 000	95				
2ГД-3	70—10 000	80	14	4,5	∅ 152 × 69	400
		100				
2ГД-28	70—10 000	80	15	4,5	∅ 152 × 55	250
		100				
3ГД-2	80—6000	80	15	4	∅ 202 × 100	1200
3ГД-7	80—7000	90	14	4,5	204 × 134 × 77	650
3ГД-28	80—8000	80	18	4,5	204 × 134 × 55	410
4ГД-1	60—12 000	60	14	4,5	∅ 202 × 100	600
		80				
4ГД-28	60—12 000	60	15	4,5	∅ 202 × 71	535
		80				
5ГД-10	50—12 000	50	15	4,5	∅ 252 × 126	1700
5ГД-14	70—12 000	70	14	4,5	254 × 170 × 100	700
5ГД-28	100—10 000	90	18	4,5	254 × 170 × 68	540
		90				
10ГД-17	40—8000	50	14	4,5	∅ 295 × 140	1500
10ГД-18	50—8000	50	12	8	324 × 212 × 128	2000
ВГД-1	800—15 000	270		5	∅ 150 × 64	230
3ГД-15	1000—15 000	270		4,5	∅ 105 × 64	230
1ГД-1РРЗ	4000—13 000	1200		8	∅ 105 × 63	260
1ГД-1ВЭФ	2000—15 000	190		2,5	∅ 90 × 57	200
2ГД-8ВЭФ	80—7000	90		3,4	∅ 152 × 75	500
5ГД-1РРЗ	80—10 000	65		4	260 × 180 × 108	750
6ГД-1	60—16 000	65		1,2	∅ 222 × 96	500
6ГД-1РРЗ	60—6 500	48		7	327 × 225 × 130	1300

¹ Первая цифра названия указывает мощность громкоговорителя в вольтамперах.

Мощность громкоговорителя ВГД-1 равна 3 ва.

ток сложной формы, то подвижная система за счет резонанса будет подчеркивать те составляющие этого тока, частота которых равна частоте собственных колебаний. Поэтому в районе резонансной частоты (частота собственных колебаний) будет некоторый подъем частотной характеристики (рис. 14, б). Такой подъем иногда полезен (рис. 33).

Однако у этой красивой медали, как и у всякой другой, есть и обратная сторона. После резонанса появляется своего рода обрыв на частотах ниже резонансной, — громкоговоритель практически перестает работать. Вот почему при выборе низкочастотных громкоговорителей стараются подобрать экземпляр с самой низкой резонансной частотой и сместить завал частотной характеристики как можно левее, в область низших частот.

Но и это еще не все.

Резко выраженный резонанс подвижной системы — явление неприятное, и его стараются приглушить, даже если он попадает на самые низшие частоты. При воспроизведении реальных звуков — речи и музыки — громкоговоритель почти все время работает в импульсном режиме, воспроизводит звуковые импульсы, толчки. После каждого такого толчка подвижная система будет некоторое время совершать сво-

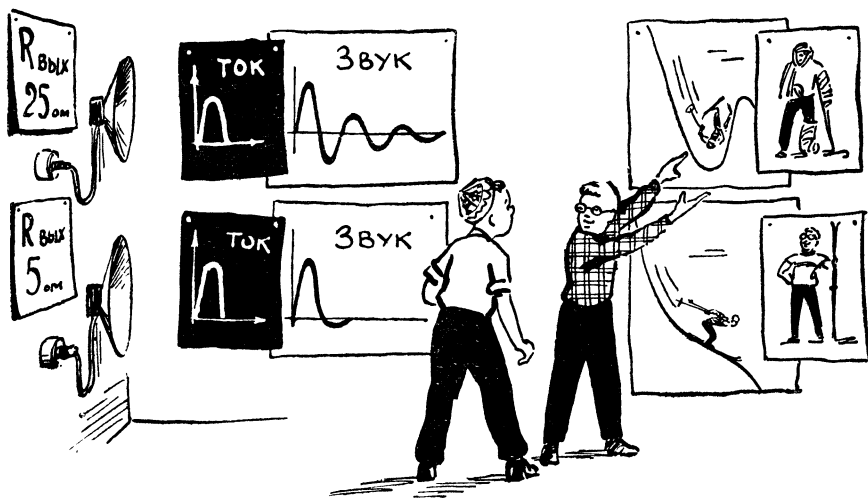


Рис. 25. В громкоговорителе с сильно выраженными резонансными свойствами под действием импульсных сигналов возникают свободные колебания диффузора, появляются посторонние призвуки и, следовательно, увеличиваются нелинейные искажения.

бодные колебания (вспомните кинофильм о колебаниях струны) и излучать при этом свои собственные призвуки (рис. 25). Чтобы избавиться от этого неприятного явления или, по крайней мере, ослабить его, подвижную систему стараются демпфировать — создать в ней дополнительные потери энергии и резко сократить время свободных колебаний. Демпфирование осуществляется несколькими путями и в том числе с помощью так называемого внешнего оформления громкоговорителя — ящиков, футляров, щитов и т. п.

Чтобы улучшить демпфирование, можно также шунтировать звуковую катушку. При этом, чем меньше шунтирующее сопротивление (рис. 30, 7, а), тем больше потери в колебательной системе, тем хуже ее резонансные свойства, тем, следовательно, лучше демпфирование. Правда, всякий постоянный шунт наряду с полезным делом — демпфированием — будет приносить заметный вред: отбирать мощность, предназначенную для звуковой катушки. Здесь напрашивается такой вывод: не включать отдельный «пожиратель» колебательной энергии, а подобрать источник сигнала таким образом, чтобы он сам сильно шунтировал звуковую катушку своим выходным сопротивлением.

Мы увидим дальше, что источником сигнала для громкоговорителя почти всегда является ламповый или транзисторный усилитель. Среди прочих характеристик такого усилителя важное значение имеет его выходное сопротивление. Чем меньше это сопротивление, тем лучше демпфирован громкоговоритель, подключенный к усилителю (рис. 25).

Качество работы громкоговорителя в большой степени зависит от центровки звуковой катушки. Даже незначительная асимметрия, небольшое смещение оси значительно повышает все виды искажений, не говоря уже о том, что может вызвать «затирание» витков о фланцы магнитной системы (рис. 14, 1, г). Центровка звуковой катушки осуществляется с помощью эластичной гофрированной шайбы из пропитанного лаком шелковистого материала.

Иногда встречаются и другие типы центрирующих шайб (рис. 14, 1, в).

Коэффициент нелинейных искажений для конкретных типов громкоговорителей в таблицах не указывают. Предполагается, что для любого динамического громкоговорителя при номинальной мощности коэффициент $K_{н.н}$ на средних частотах составляет 5%, на высших — 3%, а на низших частотах — 7% и даже 10%. Эти данные соответствуют номинальной мощности громкоговорителя.

Считается, что повышенные искажения на низших частотах

тах малозаметны. Основания для такого на первый взгляд странного вывода дает статистика. Оказывается, что в реальном случае при воспроизведении музыки и речи мощность низкочастотных составляющих в среднем сравнительно невелика, сами по себе они редко выходят на нелинейные участки амплитудной характеристики.

В табл. 8 приведена величина сопротивления звуковой катушки громкоговорителя на частоте 1000 гц ($z_{\text{зв}}-1000$). Эта оговорка нужна потому, что полное сопротивление катушки z носит сложный характер: в нем отражены затраты энергии на излучение звука, учтено индуктивное сопротивление катушки x_L , потери в проводе $R_{\text{зв}}$ и другие виды потерь. Некоторые из этих составляющих сильно зависят от частоты и могут меняться в несколько раз (рис. 14, 4). Вот почему, называя величину сопротивления катушки, приходится указывать, к какой частоте оно относится. Кстати, если вам попадется громкоговоритель, данных которого нет в таблице, то величину $z_{\text{зв}}-1000$ можно приближенно определить самому. На средних частотах и на частоте 1000 гц полное сопротивление $z_{\text{зв}}$ обычно на 10—20% больше активного сопротивления провода $R_{\text{зв}}$, а эту величину можно измерить омметром.

В дальнейшем, смирившись с некоторой неточностью, будем считать, что полное сопротивление равно активному $R_{\text{зв}}$.

Важная характеристика громкоговорителя — его номинальная (это слово имеет примерно тот же смысл, что и «нормальная», «расчетная») электрическая мощность $P_{\text{зв, ном}}$ — мощность, которая находится на границе допустимых нелинейных искажений. Если подвести к громкоговорителю мощность $P_{\text{зв}}$ больше номинальной (рис. 26), то колебания диффузора попадут в область сильной нелинейности и $K_{\text{н.и}}$ превысит допустимую величину (5—7%). И наоборот, если подводимая мощность меньше номинальной, то и нелинейные искажения значительно меньше допустимых.

Вы уже, очевидно, обратили внимание, что в табл. 8 мощность указана не в привычных единицах — ваттах (вт), а в незнакомых нам пока единицах — вольтамперах (ва). Прежде чем говорить о различии этих единиц мощности, отметим их сходство.

Как известно, мощность P — это произведение напряжения U на ток I . Мощность, потребляемая громкоговорителем $P_{\text{зв}}$, — это произведение напряжения, подведенного к звуковой катушке, $U_{\text{зв}}$ на величину тока в ней $I_{\text{зв}}$ (рис. 30, 8).

Если напряжение равно 1 в , а ток 1 а , то мощность равна 1 вт , то есть количественно вольт, умноженный на ампер

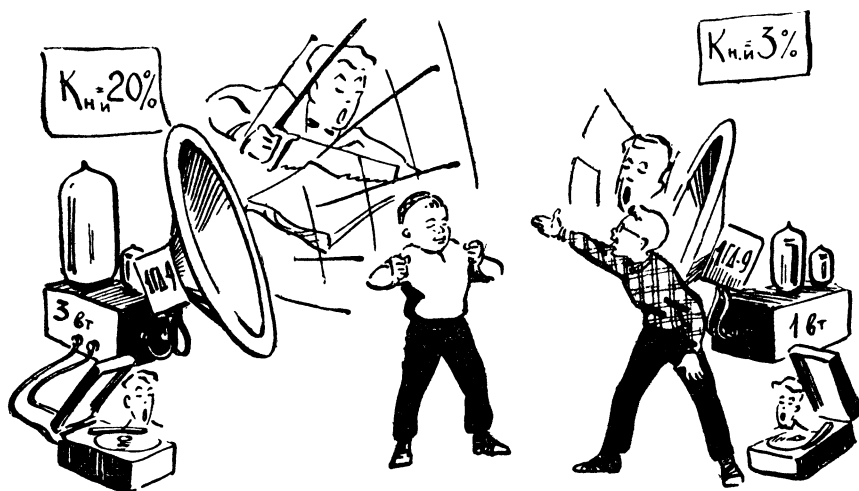


Рис. 26. Мощность, подводимая к громкоговорителю, не должна превышать его номинальной мощности, так как при перегрузке резко возрастают нелинейные искажения.

(вольтампер), равен ватту. Зачем же, спросите вы, пользоваться двумя равными по величине единицами? Недостаточно ли одной? Две единицы — *вт* и *ва* — введены для того, чтобы показать некоторое качественное отличие, показать, что существуют два сорта мощности: активная мощность (измеряется в ваттах) и реактивная мощность (измеряется в вольтметрах).

Активная мощность — это то, что громкоговоритель забирает навсегда: она затрачивается на излучение звуковых волн, на нагрев провода катушки, то есть эта мощность расходуется необратимо. Примером реактивной мощности может служить то, что «забирает» собственное магнитное поле катушки. Слово «забирает» мы взяли в кавычки потому, что магнитное поле навсегда электрической мощности не потребляет. Когда переменный ток нарастает, то он затрачивает энергию на создание магнитного поля. Но оно полностью возвращает «долг», когда ток начинает уменьшаться. Итак, реактивная мощность не расходуется, а просто перекачивается от генератора к нагрузке — в нашем примере к звуковой катушке и обратно. Реактивная мощность зависит от реактивного (в нашем случае индуктивного) сопротивления и меняется с частотой.

Для того чтобы отличить активные, потребляемые ватты от реактивных, последние называют вольтамперами. Эта же

единица используется для обозначения полной мощности, в которую входит реактивная и активная составляющие. Нужно сказать, что на средних частотах указанная в табл. 8 полная мощность на 80—90% состоит из активной составляющей, так как большую часть энергии громкоговоритель забирает навсегда. Поэтому в дальнейшем мы будем считать мощность, которая подводится к громкоговорителю, чисто активной и обозначать ее в ваттах, а на реактивную мощность там, где это только возможно, не будем обращать внимания. Кстати говоря, это наше решение прямо вытекает из того, что мы пренебрегаем индуктивной составляющей полного сопротивления катушки и считаем, что полное сопротивление $Z_{зв} = 1000$ примерно равно активному $R_{зв}$.

В заключение отметим, что номинальная мощность громкоговорителя входит в его название — первая цифра указывает величину $P_{зв, ном}$ в ваттах (строго говоря, в вольтамперах). Так, например, название 1ГД-9 обозначает: «громкоговоритель динамический на 1 ва». В название может входить еще и третья буква — «В» — высокочастотный и «Р» — ру-

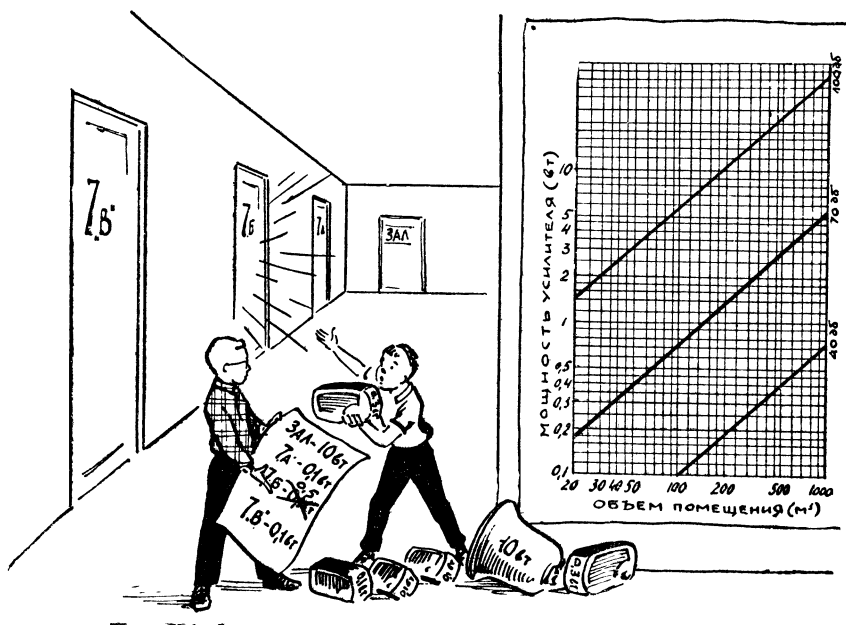


Рис. 27. Мощность, необходимая для того, чтобы озвучить то или иное помещение, зависит от его объема, а также от необходимого уровня громкости и уровня внутренних шумов.

порный и др. Последняя цифра — это конкретный тип громкоговорителя. Вторая группа букв (они встречаются редко) указывает завод-изготовитель (РРЗ — рижский радиозавод; завод ВЭФ и др.).

До сих пор речь шла о подводимой к громкоговорителю электрической мощности, то есть о том, что получает наш переводчик. Ну, а что он дает взамен? Как использует полученную электроэнергию? Насколько эффективно превращает ее в звуковую? Скажем прямо — хвастаться здесь нечем. Коэффициент полезного действия динамического громкоговорителя очень мал: 2—3%. Это значит, если подвести к звуковой катушке электрический сигнал мощностью 1 *вт*, то диффузор создает звуковые волны мощностью всего в двести сотых ватта. О продукции громкоговорителя можно судить по среднему звуковому давлению, отнесенному к расстоянию 1 *м* [4].

На рис. 27 приведен график, который показывает, какую мощность должны получать громкоговорители, чтобы они были достаточно хорошо слышны в том или ином помещении.

Этот график, конечно, нельзя считать непоколебимой нормой — он дает лишь примерное представление о необходимой мощности. Так, для помещения, сильно поглощающего звук (комната, заставленная мебелью, заполненный зал и т. д.), может понадобиться значительно более мощный звук, чем для такого же пустого. Многое зависит от уровня шумов, возникающих в самом помещении или проникающих извне. Например, когда в вашем классе идет шумный спор, то вы не услышите громкоговоритель, если к нему подвести мощность 2—3 *вт*. Но когда шум стихнет, то и слабый громкоговоритель, к которому подводится 0,25 или даже 0,1 *вт*, будет слышен достаточно громко (рис. 29).

Заканчивая разговор о мощности громкоговорителя, сделаем три заключительных замечания.

Первое. Характеризуя работоспособность громкоговорителя, мы всегда будем приводить только величину его электрической мощности, то есть мощности электрического сигнала, подводимого к громкоговорителю. Если известен к. п. д., то в случае необходимости можно легко определить и акустическую мощность.

Второе. В табл. 8 указана номинальная мощность — тот «потолок», выше которого начинается область сильных нелинейных искажений. Ясно, что этот «потолок» должен соответствовать самым громким звукам. Но статистика показывает, что самые громкие звуки бывают не так уж часто, и поэтому средняя мощность, которая подводится к громко-

ворителю, а значит, и средняя мощность звуковых волн оказываются обычно в 5—10 раз меньше номинальной. Иногда особенно экономные конструкторы, учитывая, что пиковая (максимальная) звуковая мощность — явление редкое, допускают некоторую перегрузку громкоговорителя. Пример: к громкоговорителю с номинальной мощностью 1 *вт* подводят сигнал с пиковой мощностью 1,5 *вт*, а то и 2 *вт*. В такие моменты нелинейные искажения очень велики и единственным утешением является то, что подобное «безобразие» бывает очень редко. Там, где главной задачей является высококачественное звучание, даже самые кратковременные перегрузки недопустимы.

Третье. В ряде случаев для снижения $K_{н.и}$ применяются громкоговорители с запасом мощности. Пример: к пятиваттному громкоговорителю подводят 3 *вт*. Уменьшения звуковой мощности при этом не происходит: электрический сигнал мощностью 3 *вт* с помощью пятиваттного громкоговорителя создает такую же звуковую мощность, как и с помощью трехваттного.

К этим замечаниям нужно было бы добавить еще одно: о влиянии на мощность громкоговорителя его внешнего оформления. Однако вопрос этот настолько важен, что для его освещения не стоит ограничиваться коротким замечанием — здесь есть о чем рассказать подробно.

Внимание — ящик!

Радиолюбители могут создать свой вариант знаменитой андерсеновской сказки о голом короле. Главным героем этой сказки будет электродинамический громкоговоритель — Его Величество Динамик Первый. Это действительно король-динамик — с роскошной королевской частотной характеристикой (без завалов), с «заграничным» резонансом (резонансная частота составляет 10 *гц*, то есть выходит за границу слышимого звука) и, конечно, с аристократической степенью (хорошее демпфирование).

Включили радиолюбители громкоговоритель, слушают, как поет Его Величество, слушают и громко восхищаются:

«Ах, какой тембр!»

«Ах, какие басы!»

«Ах, как плачут скрипки! . . .»

А каждый, между прочим, про себя думает, что никаких басов, никакого особого тембра не слышно, что звучит король-динамик очень плохо.

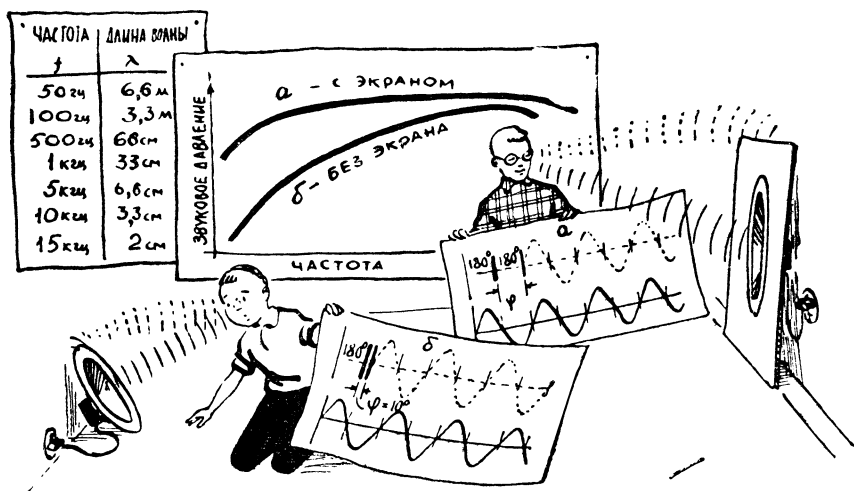


Рис. 28 Акустический экран удлиняет путь обратной звуковой волны (пунктир), создает дополнительный сдвиг фаз и превращает противофазную обратную волну в синфазную.

Думают так радиолюбители, а сказать об этом стесняются — скажешь, а тебя же засмеют, и выйдет, что ты ничего в динамиках не понимаешь...

И вдруг, почти так же, как и у Андерсена, к радиолюбительской компании подходит мальчик ясельного возраста и говорит такие слова: «Плохо у вас, дяденьки, радио играет, а все потому, что без коробочки». Тут все замечают, что громкоговоритель в спешке действительно забыли вставить в ящик. Вспоминают, что «без одежды» ни один динамик, даже Его Величество Король, не будет хорошо звучать, не сможет показать всех своих достоинств.

Мы с вами не будем следить за дальнейшим развитием событий в сказке «Голый Динамик», а лучше выясним, каким образом и в какой степени внешнее оформление, в том числе и ящик, влияет на качество звучания [5].

Начнем с того, что громкоговоритель может сам ослаблять свое же собственное излучение. В тот момент, когда диффузор сжимает перед собой воздух, двигаясь вперед, сзади диффузора создается разрежение. И наоборот, в момент отступления разрежение создается впереди диффузора, а сжатие — позади. Иными словами, диффузор одновременно излучает две звуковые волны, причем сдвинутые по фазе на

180° (рис. 3, в). Если обе эти волны с тем же сдвигом фаз упадут к нашему уху, то мы вообще ничего не услышим — противофазные волны просто скомпенсируют друг друга (рис. 28, б).

В реальном случае полного «взаимного пожирания» звуковых волн не происходит хотя бы потому, что в направлении вперед громкоговоритель излучает более сильную волну. А вот резкое ослабление звука из-за противофазного излучения мы наблюдаем на средних и особенно на низших звуковых частотах.

Рисунок поясняет, почему это неприятное явление в основном затрагивает область низших звуковых частот. Вы видите, что волна, возникающая сзади диффузора, приходит к слушателю более длинным путем (пунктирные линии), то есть с некоторым опозданием. На высших звуковых частотах, когда период мал, из-за этого опоздания появляется дополнительный сдвиг фаз, и практически получается, что враги становятся друзьями: обе, в прошлом противофазные, волны действуют согласованно, в фазе. На средних и особенно на низших частотах опоздание составляет лишь небольшую часть периода, и заметного дополнительного сдвига фаз не получается. Таким образом, из-за противофазного излучения падает звуковая мощность (по статистике она в основном приходится на средние частоты) и появляется сильный завал частотной характеристики в области низших частот.

Способ устранения этих недостатков напрашивается сам собой: нужно просто искусственно увеличить опоздание задней волны. Сделать это проще всего с помощью акустического экрана, который радиолюбители иногда неправильно называют отражательной доской. Размеры и форма экрана подбираются так, чтобы создать необходимое опоздание, необходимый дополнительный сдвиг фаз передней и задней волн на всех частотах. Лучшие результаты дает акустический экран с несимметричным расположением громкоговорителя.

Материалом для экрана может служить толстая (5—10 мм) фанера или доска; снаружи его закрывают декоративной тканью. Размеры экрана выбирают по графику рис. 29, 1, а с учетом нижней граничной частоты. Не имеет смысла рассчитывать акустический экран, так же как и другие «одежды», на те частоты, которые громкоговоритель не в состоянии воспроизвести.

Некоторые преимущества дает установка треугольного экрана в верхнем углу комнаты (рис. 29, 1, з). В этом случае сами стены в какой-то степени увеличивают действующую поверхность экрана и улучшают воспроизведение низших ча-

стот. И все же акустический экран «в чистом виде» применяют сравнительно редко.

Наиболее привычное внешнее оформление громкоговорителя — ящик — можно рассматривать как складной экран: он также создает нужное опоздание задней волны (рис. 28). Ящик — это довольно сложная акустическая система, чем-то напоминающая резонаторы музыкальных инструментов. От размеров, формы и материала ящика во многом зависит качество звучания.

Так, например, ящик с открытой задней стенкой можно приравнять к обычному акустическому экрану (рис. 29 1, б, в).

Ящик с закрытой задней стенкой уже по-другому влияет на частотную характеристику. Воздух в замкнутом объеме меняет упругость подвижной системы громкоговорителя и повышает ее резонансную частоту.

Однако ящики с закрытой стенкой иногда все же находят применение. Правильно выбрав размеры такого ящика (график на рис. 29, 2, а) и заполнив весь его объем звукопоглощающим материалом, например минеральной, стеклянной или обычной хлопчатобумажной ватой, можно получить хорошую компенсацию за несколько подпорченную частотную характеристику. Такой ящик с звукопоглотителем будет отлично демпфировать громкоговоритель. Что же касается завала на нижних частотах, то его, как вы увидите дальше (стр. 130, рис. 33, 35, 36 и др.), можно будет в некоторой степени скомпенсировать.

Дальнейшим развитием идеи закрытого ящика является акустический фазоинвертор (фазовращатель). Он позволяет осуществить эффективное демпфирование с помощью звукопоглотителя, то есть снижает нелинейные искажения и в то же время резко улучшает частотную характеристику в трудной области — в области нижних частот. Фазоинвертор рассчитывают таким образом, чтобы на самых низших частотах, вблизи резонанса громкоговорителя, он обеспечил синфазное, то есть согласованное, излучение звука как от самого диффузора, так и от специального окна в нижней части ящика (рис. 29, 2, б, в, е, ж). Размеры ящика простейшего фазоинвертора можно определить по графику рис. 29, 2, г. Расстояние от осевой линии окна до ближайшей стенки ящика составляет 100—200 мм. Площадь окна при окончательной регулировке подбирается опытным путем с помощью подвижной заслонки. Значение такой регулировки иллюстрируется примером частотных характеристик на рис. 29, 2, д. Эти характеристики соответствуют трем разным положениям заслонки, закрывающей окно фазоинвертора.

Для изготовления больших ящиков, в том числе и фазоинверторов, используют доски и многослойную фанеру от 8 мм и толще. Можно применить и более тонкий материал, в том числе фанеру толщиной 5 мм и даже 4 мм. Разумеется, в этом случае для ящика должен быть построен прочный каркас. В последнее время многие любители считают, что лучший материал для акустических ящиков — толстые плиты из прессованной стружки. Стенки ящика должны быть хорошо подогнаны, прочно скреплены шурупами и столярным клеем; все щели и трещины перед наружной покраской необходимо тщательно зашпаклевать. Помните, что дребезжание каких-либо частей ящика будет восприниматься как искажение звука. Если ящик предназначен для установки на полу, то под него нужно подложить прокладки из толстой (20—30 мм) резины. Высокочастотные громкоговорители рекомендуют сзади прикрыть плотными, лучше железными колпаками.

Фазоинвертор изнутри обязательно нужно покрыть звукоизолирующими материалами. Это может быть поролон, вата, пробка, войлок, многослойные покрытия из материи, картона, рубероида или битумной мастики. Толщина покрытия 10—40 мм.

В случае если в закрытом ящике или фазоинверторе установлено несколько громкоговорителей, то расчет по графикам (рис. 29, 2, г) производят, исходя из диаметра «суммарного диффузора». Чтобы приблизительно подсчитать этот диаметр, нужно сложить площади всех диффузоров и из полученной суммы извлечь квадратный корень.

На рис. 29 показаны некоторые акустические агрегаты — ящики, в каждом из которых установлено несколько громкоговорителей. На рис. 29, 3 схематически показано устройство агрегата радиолы «Люкс» («Дружба»), на рис. 29, 4 — один из агрегатов радиолы «Ригонда», а на остальных рисунках (5, 6) — модельные акустические агрегаты, сконструированные радиолюбителями. О том, как громкоговорители какого-либо агрегата соединяются между собой и как они подключаются к источнику сигнала, будет рассказано дальше.

Вы уже, конечно, догадались, что использование нескольких громкоговорителей в одном акустическом агрегате нужно не только для того, чтобы получить большую номинальную мощность. Разумно комбинируя громкоговорители, можно получить весьма равномерную и широкую частотную характеристику. Хорошо, если «на общее ухо» работают высокочастотные и низкочастотные громкоговорители, в том числе несколько низкочастотных громкоговорителей с разными резонансными частотами.

Кроме повышения мощности и выравнивания частотной характеристики, «коллектив» громкоговорителей улучшает еще один показатель звуковоспроизведения — диаграмму направленности. Так же как и микрофон по-разному улавливает звук, идущий с различных направлений (рис. 22), громкоговоритель, в зависимости от направления, по-разному излучает звуковые волны. Диаграмма направленности громкоговорителя показывает, во сколько раз слабее звук, излучаемый в том или ином направлении, по сравнению со звуком, излучаемым вдоль главной оси вперед (перпендикулярно диффузору). Диаграмма направленности в горизонтальной плоскости чем-то напоминает цветок с лепестками разной величины. С увеличением частоты «главный лепесток», направленный вперед, становится все более острым. Это значит, что если вы будете слушать громкоговоритель в стороне от главной оси, то получите значительно большую дозу частотных искажений, чем ваш товарищ, который сидит прямо перед громкоговорителем (рис. 72).

Острая диаграмма направленности имеет еще один недостаток: создает впечатление, что звук исходит из одной точки. Вообще-то говоря, это правда — звук действительно к нам в основном приходит только от диффузора громкоговорителя. Но в большинстве случаев обман будет казаться более естественным, чем такая правда.

При воспроизведении речи или сольного пения звук, идущий из одной точки, — естественное явление. Иногда даже кажется, что диктор или певец находится именно в том углу комнаты, где установлен громкоговоритель. А вот при воспроизведении музыки в исполнении ансамблей (оркестр, хор) трудно представить себе, что все музыканты и певцы сгруппировались на небольшом пятачке сцены. В этом случае более естественным будет казаться объемный звук, не привязанный к той точке, где находится диффузор громкоговорителя. Самая простая из популярных систем объемного звука называется системой ЗД (рис. 73). Ее можно встретить во многих магнитофонах, радиоприемниках и радиолах, выпускаемых в настоящее время.

Но бывает и так, что направленность громкоговорителя является его достоинством. В основном это относится к мощным источникам звука, установленным в больших залах или на площадях. Здесь зачастую приходится излучать звуковые волны в одном определенном направлении: например, от сцены в глубину зала. В этом случае обычно применяют рупорные громкоговорители или направленные звуковые колонки (табл. 9).

Таблица 9

Звуковые колонки, радиальные и рупорные громкоговорители

Тип колонки или громко- говорителя	Мощность и количество головок	Общая мощ- ность (ва)	Направлен- ность	Полоса частот (гц)	Неравномер- ность (дб)	Полное сопротивление (ом) на частоте 1000 гц при напряжении			Вес (кг)
						30 в	120 в	240 в	
8КЗ-1	2 <i>вт</i> × 4	8	ОН	180—6000	15	112	1800		6,5
10КЗ-1	2 <i>вт</i> × 8	10	ОН	120—8000	15	90	1440	5760	15
10КЗ-2	2 <i>вт</i> × 8	10	ОН	120—8000	15	90	1440	5760	10
25КЗ-1	4 <i>вт</i> × 8	25	ОН	100—8000	15	36	576	2300	19
25КЗ-2	4 <i>вт</i> × 8	25	ОН	100—8000	15	36	576	2300	20
10ГДН-1	4 <i>вт</i> × 4	10	НН	80—8000	15	90	1440	5760	12
25ГДН-1	10 <i>вт</i> × 4	25	НН	80—8000	15	36	576	2300	24
ДГР-25	1 шт. НЧ + + 3 шт. ВЧ	25	НН	150—5000	20		576	2300	50
Р-10		10	ОН	250—4000	20	90	1440	5760	6
10ГРД-5		10	ОН	200—4000	15	90	1440	5760	7
25ГРД-1		25	ОН	100—6000	15	36	576	2300	15
25ГРД-2		25	ОН	120—5000	15	36	576	2300	15
50ГРД-8		50	ОН	120—5500	15	18	228	1150	18
50ГРД-9		50	ОН	100—6000	15	18	228	1150	25
100ГРД-1	25 <i>вт</i> × 2	100	ОН	120—5500	15	9	144	576	30
Р-100	50 <i>вт</i> × 2	100	ОН	200—3000	20		144	576	54

Рупорный громкоговоритель (рис. 14, 5) очень похож на уже знакомый нам диффузорный и в то же время принципиально отличается от него. Сходство в том, что и здесь и там источником звуковых колебаний является электродинамическая система (ее называют звуковой головкой), состоящая из магнита и звуковой катушки с диффузором. Главное различие связано с тем, что не только диффузор, но и сам рупор участвует в излучении звуковых волн и определяет главные характеристики громкоговорителя. Благодаря применению рупора, к. п. д. громкоговорителя значительно повышается и достигает 6—8%.

Долгое время среди рупорных динамических громкоговорителей самым популярным был десятиваттный Р-10. У любителей он получил название «колокольчик». Сейчас на смену ему пришел рупорный громкоговоритель 10ГРД-5 (первая цифра, как обычно, обозначает мощность). К этим громкоговорителям так же, как и к другим мощным излучателям, подводят низкочастотный электрический сигнал с напряжением 30 в, 120 в или 240 в (табл. 9). Это довольно большое

напряжение, и его приходится подавать на звуковую катушку через понижающий трансформатор. В «колокольчике» и громкоговорителе IOГРД-5 понижающий трансформатор находится прямо под кожухом и так же, как и другие ответственные детали, герметически закрыт. Это необходимо для того, чтобы громкоговорители, установленные на улице, безотказно работали при любой погоде.

Вас, по-видимому, интересует, зачем нужно подводить к громкоговорителю высокое напряжение, а затем понижать его с помощью трансформатора? Почему нельзя сразу подводить к громкоговорителю электрический сигнал с низким напряжением?

На второй вопрос хочется ответить вопросом: а для чего с электростанций мы передаем электроэнергию высокого напряжения и строим для этого специальные высоковольтные линии? Зачем сначала повышаем электрическое напряжение до десятков и сотен тысяч вольт, а затем понижаем его до 120 или 220 в? Делается все это для того, чтобы уменьшить потери энергии при передаче ее на большие расстояния.

Электрическая мощность в одинаковой степени зависит от тока и от напряжения. Поэтому одну и ту же мощность можно передать по линии при высоком напряжении и малом токе или, наоборот, при низком напряжении и большом токе. Что выгоднее? Выгоднее передача энергии при небольшом токе: чем больше ток, тем сильнее он греет соединительные провода, тем больше электроэнергии теряется по пути и меньше ее приходит на конечную станцию. Перед тем как отправить электроэнергию в дальнее путешествие, мы для того и повышаем напряжение, чтобы уменьшить ток, а вместе с ним уменьшить и потери в линии передачи. Мощные рупорные громкоговорители, как правило, установлены на значительном расстоянии от источника электрического сигнала, и во избежание больших потерь этот сигнал выгоднее транспортировать, предварительно повысив его напряжение.

Тогда возникает другой вопрос: а почему нельзя это повышенное напряжение подавать сразу на звуковую катушку? Для чего нужен понижающий трансформатор? В качестве ответа сделаем небольшой расчет.

Если при мощности 10 вт подвести к звуковой катушке напряжение 120 в, ток в ней примерно будет равен 0,08 а ($I = P : U$, рис. 31, 8, б). По закону Ома определяем необходимое сопротивление катушки. Оно равно около 1500 ом ($R = \frac{U}{I}$, рис. 30, 5, ж). Сравнительно небольшой ток позво-

ляет использовать для намотки весьма тонкий провод, например $PЭ = 0,05$, каждый метр которого имеет сопротивление около 9 *ом*. Чтобы получить сопротивление 1500 *ом* на каркас звуковой катушки, нужно намотать более 170 *м* такого провода, и вся обмотка будет весить почти 3 *г*. Изготовить звуковую катушку с такими данными можно, но очень сложно. Куда проще применить трансформатор, который понизит напряжение, повысит ток и при этом во много раз уменьшит необходимую величину сопротивления звуковой катушки.

В качестве примера приводим данные звуковой катушки громкоговорителя Р-10: номинальная мощность 10 *вт*; номинальное напряжение на катушке около 4,5 *в*; номинальный ток в катушке около 2,2 *а*; сопротивление катушки $Z_{зв-1000}$ около 2 *ом* (для постоянного тока сопротивление катушки $R_{зв} = 1,7$ *ом*); провод $PЭ = 0,21$; длина провода 3,5 *м*; вес обмотки 0,8 *г*; число витков 39.

Попутно прикинем, каковы будут потери, если подводить к громкоговорителю сигнал низкого напряжения, то есть отказаться от понижающего трансформатора. Двухпроводная линия из провода диаметром 1 *мм* протяженностью всего 50 *м* имеет сопротивление около 2 *ом*. При токе 2,2 *а* потери на этой линии составят почти 10 *вт* ($P = I^2R$). То есть для того чтобы громкоговоритель получил 10 *вт*, в линию нужно подать 20 *вт* — мы вынуждены мириться с потерей половины энергии. В то же время при напряжении 120 *в* при токе 0,08 *а*, потери не будут превышать 0,15 *вт*, то есть 1,5% от передаваемой мощности.

Подведем итоги. При передаче электроэнергии, в том числе и низкочастотного сигнала для громкоговорителя, на большие расстояния нужно повышать напряжение, чтобы уменьшить потери. К громкоговорителю нужно подводить напряжение, пониженное с помощью трансформатора, так как только в этом случае можно применять простые по конструкции и надежные катушки с малым сопротивлением. Кроме того, применение трансформатора дает еще одно преимущество: сделав первичную обмотку секционированной, можно подводить к ней различные напряжения; в нашем примере 30 *в*, 120 *в*, 240 *в*. Благодаря секционированной обмотке мы фактически имеем три трансформатора с разным соотношением витков, то есть с разными коэффициентами трансформации — 0,15 (при повышении напряжения 7), 0,04 (25) и 0,02 (50).

Некоторые рупорные громкоговорители (10ГДН-1, 25ГДН-1, ДГР-25) имеют круговую диаграмму направленности в горизонтальной плоскости, то есть равномерно излу-

чают во все стороны (рис. 14, 7, а). Такие громкоговорители обычно устанавливают в парках, скверах, на стадионах.

В последние годы наряду с мощными рупорными излучателями широко применяются направленные и ненаправленные звуковые колонки (рис. 14, 2, табл. 9). В них используются обычные диффузорные громкоговорители, подключенные ко вторичной обмотке понижающего трансформатора. Последняя буква в названии колонки означает вид внешнего оформления: 1 — металлическое оформление, 2 — деревянное. Звуковая колонка весьма проста по устройству, и ее довольно легко изготовить своими силами.

При подключении громкоговорителей звуковой колонки к трансформатору, точно так же, как и в любом другом случае включения совместно работающих громкоговорителей, необходимо произвести их фазировку (рис. 14, 3). Иными словами, нужно добиться того, чтобы диффузоры всех громкоговорителей двигались согласованно, синфазно. Фазировку можно выполнить, если подключать громкоговорители постепенно, по одному, и, меняя местами провода, по которым подводится низкочастотное напряжение, прислушиваться, в каком случае агрегат работает лучше. Фазировку можно осуществить и с помощью низковольтного источника постоянного тока, например с помощью гальванического элемента на 1,5 в. Громкоговорители между собой нужно соединить таким образом, чтобы при подключении к элементу все диффузоры отклонялись в одну и ту же сторону (рис. 14, 3, б).

Все члены «микрофонного семейства» — звукоусилители, магнитные головки, динамические, угольные, электромагнитные и другие типы микрофонов — дают на выходе электрический сигнал весьма небольшой мощности. Обычно мощность электрической копии измеряется тысячными, а чаще миллионными долями ватта. В то же время для нормальной работы воспроизводящих приборов — громкоговорителей — нужны мощности, измеряемые единицами, десятками, а иногда и сотнями ватт. Иными словами, для того чтобы «накормить» громкоговоритель, нужно иметь мощность в миллионы раз большую, чем может дать микрофон или кто-либо из его «родственников». Из этого трагического несоответствия вместо «ахов» и «охов» нужно сделать простой и деловой вывод — между переводчиками, воспринимающими звук, и переводчиками, воспроизводящими его, необходимо включить усилитель электрических сигналов.



Г л а в а I I I

ОДНОТАКТНЫЕ УСИЛИТЕЛИ

Прежде чем говорить об усилении и усилителях электрических сигналов, полезно задуматься над некоторыми простыми, на первый взгляд даже наивными вопросами. В чем состоит сущность усиления? Каким способом осуществляется усиление электрических сигналов? Чем отличается усиленный сигнал от усиливаемого, в чем они похожи? И что вообще означает слово «усиленный» применительно к электрическому сигналу?

Начнем с последнего вопроса. Когда мы говорим об усилении сигнала, то прежде всего имеем в виду усиление, выражаясь точнее, увеличение мощности. Совершенно ясно, что при усилении мощности обязательно возрастает ток или напряжение — ведь именно они и определяют мощность (рис. 30, 8, б). Но только по одной из этих величин — только по току или только по напряжению — нельзя судить, усиливается сигнал или нет. Вспомните, что обычный трансформатор может повысить переменное напряжение во сколько угодно раз, однако мы не считаем, что он усиливает сигнал. Во сколько раз трансформатор повышает напряжение, во столько же раз он понижает ток, и поэтому мощность на вы-

ходе не возрастает — усиления сигнала нет. Да и откуда на выходе трансформатора может появиться усиленная мощность? Чтобы увеличить мощность, нужен источник дополнительной энергии.

Теперь попробуем взяться за дело с другого конца. Предположим, что у нас есть необходимый источник электроэнергии — мощная гальваническая батарея. Может ли она сама по себе усилить электрический сигнал? Конечно, нет. Батарея может дать необходимую энергию, но не в том виде, в каком нужно. Батарея дает постоянный ток, а электрический сигнал — это переменный ток, причем не просто переменный, а ток сложной формы, со сложным характером изменения. Именно эта сложность и отличает одни сигналы от других, именно в ней скрыты неповторимые тембры шалепинского голоса, тайные шорохи ночного леса или многоголосье большого симфонического оркестра. Мы сможем считать, что добились цели, добились усиления, если заставим батарею отдавать энергию в виде сложного по форме тока, в виде своего рода мощной копии усиливаемого сигнала.

Наряду с источником энергии в усилителе обязательно имеется управляющий (часто говорят: усилительный) элемент. Именно с его помощью мы управляем мощными потоками энергии, копируя все изменения слабого сигнала. Пример простейшего управляющего элемента — обычный водопроводный кран. Легким поворотом рукоятки крана можно управлять мощным потоком воды и таким путем создать своего рода сложный водяной сигнал.

При усилении электрических сигналов роль управляющего элемента чаще всего выполняет электронная лампа или транзистор. В ряде случаев применяют и другие усилительные (управляющие) приборы — магнитный, диэлектрический, криотронный (сверхпроводниковый). Все эти приборы можно сравнить с переменным сопротивлением, включенным в цепь мощного источника тока. Мы затрачиваем сравнительно небольшую мощность (усиливаемый сигнал), чтобы менять величину этого сопротивления, а в результате получаем значительные изменения мощности в цепи, куда это сопротивление включено. С помощью такого сопротивления (лампа, транзистор и т. п.) легко управлять мощным источником электроэнергии и «рисовать» в его цепи сложный электрический сигнал.

Итак, усиление электрического сигнала практически сводится к созданию его мощной копии. Энергию для этой мощной копии дает дополнительный источник, в нашем примере — батарея. Слабый (усиливаемый) сигнал может управлять ра-

ботой мощного источника с помощью своеобразного рычага — электронной лампы, транзистора или другого управляющего прибора. При этом необходимо выполнить два условия. Условие первое: копия должна быть мощнее оригинала — в этом-то и состоит смысл усиления. Условие второе: копия действительно должна быть копией — форма графиков входного и выходного сигналов должна быть одинаковой. Нужно заметить, что в ряде случаев второе условие выполняется не очень строго, а иногда даже умышленно нарушается. Однако в усилителях низкой частоты (сокращенно НЧ), конечная цель которых создать мощную копию для воспроизведения звука, второе условие остается непоколебимым.

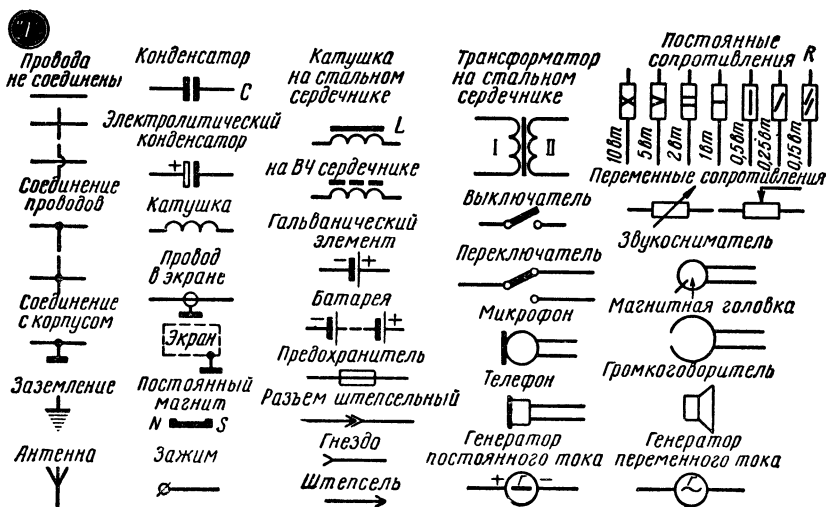
Таковы общие идеи, общие принципы усиления. Теперь посмотрим, как они воплощаются в конкретных приборах и аппаратах, в конкретных схемах усилителей.

Шаг назад

Эта книга рассчитана на радиолюбителей, знакомых с элементами электротехники, радиотехники, электроники и имеющих некоторый опыт в конструировании приемников и усилителей.

Во всяком случае, предполагается, что вы знакомы с типичной схемой простейшего двухлампового усилителя НЧ (рис. 44), знаете, как его собрать и наладить. Этот усилитель будет своего рода стартовой линией — от него мы будем постепенно, шаг за шагом, двигаться дальше, разбирая более сложные и более совершенные схемы и конструкции. Взглянув на «линию старта», — на схему рис. 44, вы не встретите в ней каких-либо неясностей и сочтете себя вполне подготовленными к тому, чтобы немедленно отправиться в путь. И все же не торопитесь. Многим из вас наверняка полезно перед стартом сделать шаг назад и хотя бы мельком оглянуться на тот путь, который привел вас от основ электротехники к практическим схемам электронных усилителей [6, 7]. На рис. 30 показаны некоторые этапы этого пути. Ниже даются короткие пояснения к рисункам и формулам.

1. Здесь приведены некоторые утвержденные Государственным стандартом (ГОСТ) условные обозначения для электрических схем. Чтобы не загромождать чертежи длинными надписями, громкоговорители, микрофоны, конденсаторы, переключатели, дроссели обозначают сокращенно буквами: *Гр, М, С, П, Др*. Цифра-индекс рядом с буквой — это порядковый номер детали для данной схемы.



3

Тера - Т(Т) - 10^{12}
 Гига - Г(Г) - 10^9
 Мега - М(М) - 10^6
 Кило - К(к) - 10^3
 Гекто - г(г) - 10^2
 Дека - да(да) - 10^1
 Деци - д(д) - 10^{-1}
 Санти - с(с) - 10^{-2}
 Милли - м(м) - 10^{-3}
 Микро - мк(мк) - 10^{-6}
 Нано - н(н) - 10^{-9}
 Пико - п(п) - 10^{-12}

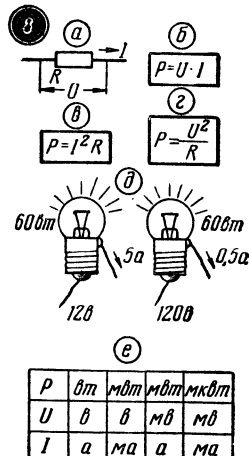
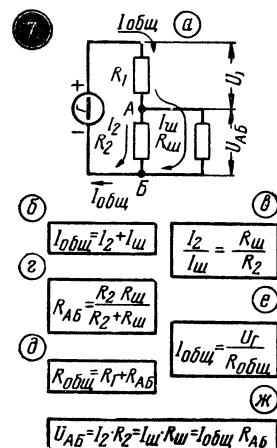
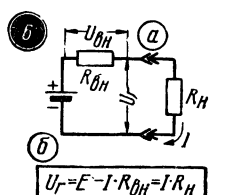
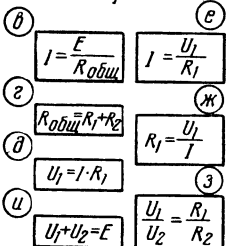
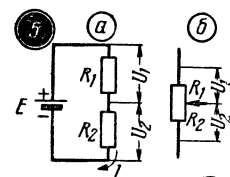
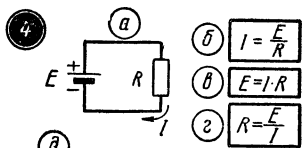


Рис. 30. Элементы электрорадиотехники.

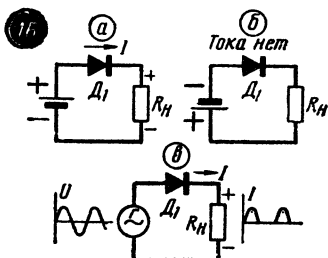
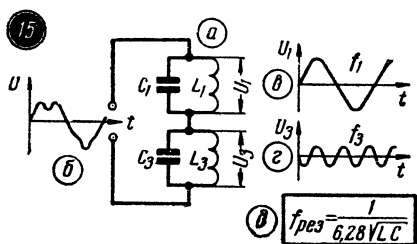
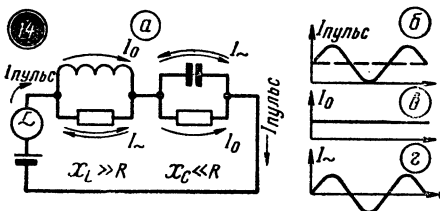
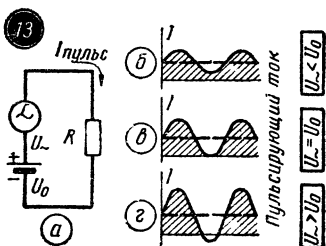
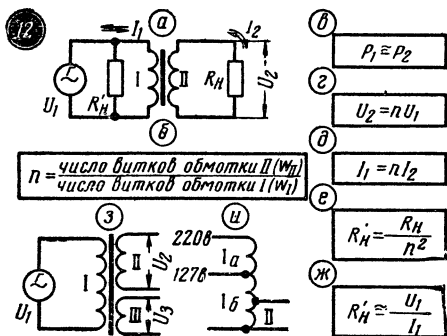
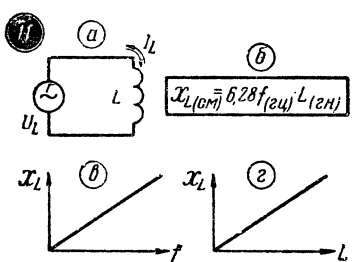
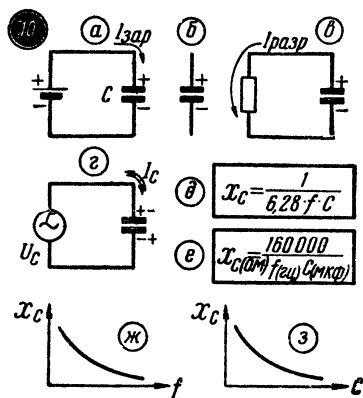
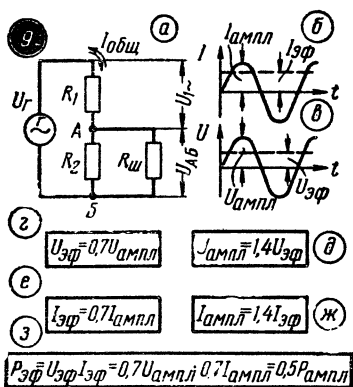


Рис. 30. Продолжение.

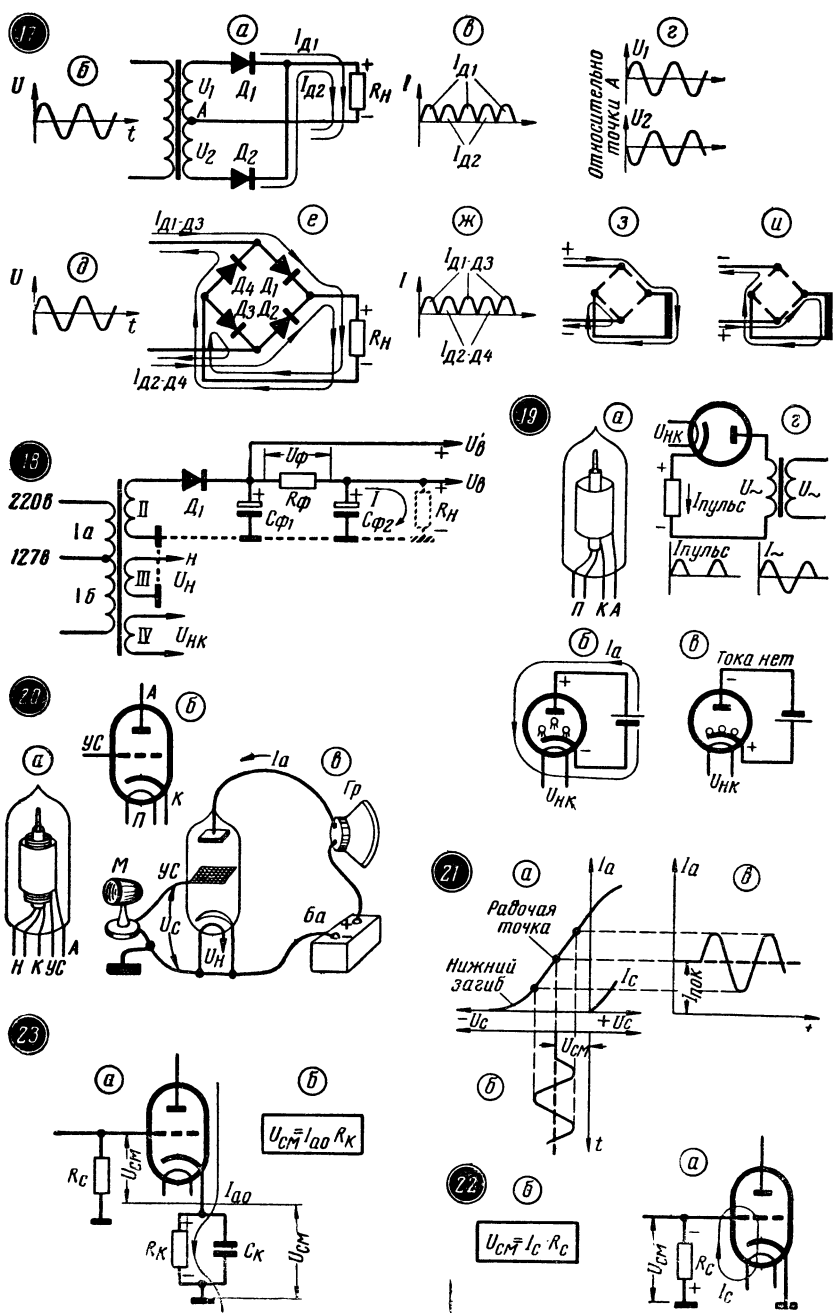


Рис. 30. Продолжение.

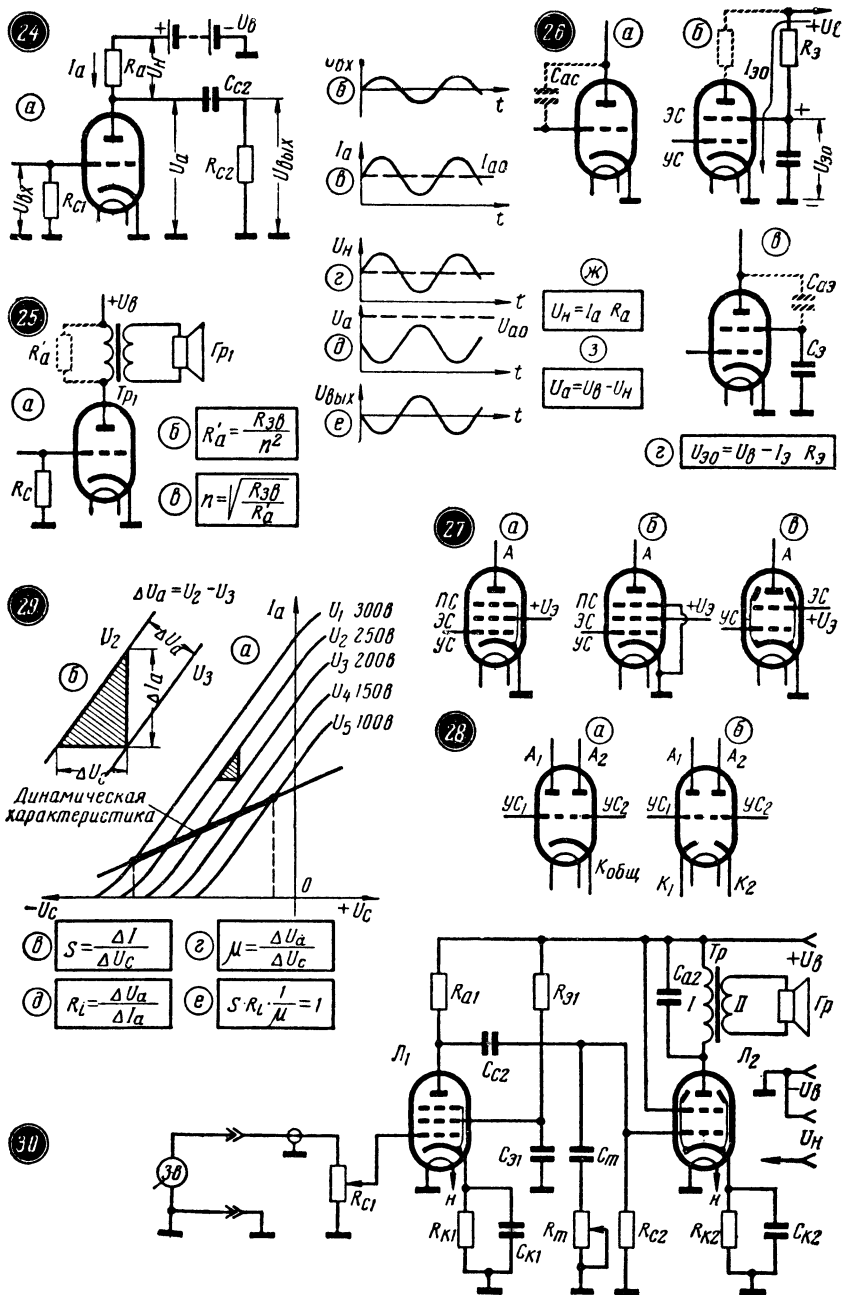


Рис. 30. Продолжение.

Сокращенно обозначают также величины сопротивлений и конденсаторов. Вместо слова «килоом» пишут букву «к», вместо слов «ом» и «мегом» вообще ничего не пишут. Чтобы не спутать омы с мегомами (ошибка в миллион раз!), сопротивление в мегомах всегда выражают в виде десятичной дроби, а проще — в виде цифры с запятой. При этом, разумеется, сопротивление в омах должно быть округлено до целого числа.

Если цифра с запятой относится к емкости конденсатора, то это значит, что емкость указана в микрофарадах (*мкф*). Емкость в пикофарадах (*пф*) выражают целым числом — цифрой без запятой. Иногда рядом с емкостью конденсатора указывают напряжение, на которое он рассчитан.

Примеры.

$R - 100$	означает 100	ом	$C - 100$	означает 100	<i>пф</i>
$R - 100\text{ к}$	»	100	ком	$C - 100,0$	» 100 <i>мкф</i>
$R - 100,0$	»	100	Мом	$C - 0,1$	» 0,1 <i>мкф</i>
$R - 0,1$	»	0,1	Мом,	$C - 100,0 \times 20\text{в}$	означает
то есть 100 ком.				100 <i>мкф</i> с рабочим напряжением 20 в.	

С помощью условных обозначений составляют принципиальную схему приемника, усилителя, магнитофона, где показаны соединения всех его элементов, показаны все электрические цепи аппарата.

2. Опытный специалист может многое прочесть на принципиальной схеме. Он узнает, на каких участках какие действуют напряжения, где ослабляется, а где усиливается сигнал, по каким цепям проходят токи. Чтобы было удобнее (обратите внимание — это делается только для удобства!) «водить пальцем» по схеме и следить за прохождением постоянного (пульсирующего) тока, для него введено условное направление — от «плюса» к «минусу». Это пришлось сделать потому, что заряды в электрических цепях и приборах движутся в двух направлениях: электроны — от «минуса» к «плюсу», положительные заряды — от «плюса» к «минусу». Рассматривая схемы, необязательно знать, какие заряды в действительности создают ток. Можно считать, что ток — это всегда движение положительных зарядов и, конечно, всегда от «плюса» к «минусу».

3. Единица э. д. с. и напряжения — вольт (*в*), тока — ампер (*а*), мощности — ватт (*вт*) или вольтампер (*ва*), сопротивления (*ом*), емкости — фарада (*ф*), индуктивности — генри (*г*), частоты — герц (*гц*), электрического заряда — кулон (*к*). Часто пользуются более крупными или более мелкими

единицами: например, такими, как киловатт (*квт*), или микроампер (*мка*). Их образуют прибавлением соответствующей приставки (в скобках — сокращенное латинское написание) к основной единице.

Пример. $1 \text{ мка (микроампер)} = 10^{-6} \text{ а}$; $1 \text{ пф (пикофарада)} = 10^{-12} \text{ ф}$; $1 \text{ Мом (мегом)} = 10^6 \text{ ом}$.

4. Наверняка сейчас уже трудно найти человека, который не знал бы первой формулы (*б*). Это закон Ома. Чем больше э. д. с. E , то есть чем больше сила, выталкивающая заряды из генератора (в нашем примере из батарейки), и чем меньше сопротивление R цепи, то есть чем меньше эта цепь препятствует движению зарядов, тем больше ток I в цепи. Единица тока 1 а соответствует заряду 1 к (кулон = 6 280 000 000 000 000 зарядов электрона), проходящему через поперечное сечение проводника за 1 сек . Две другие формулы (*в*, *г*) предназначены для расчетов и получены из первой путем простейших алгебраических преобразований. Для облегчения вычислений можно пользоваться таблицей *д*. В каждом вертикальном столбце находятся «комплекты» единиц для расчетов по формулам закона Ома.

Примеры. Дано: $E = 4,5 \text{ в (4500 мв)}$; $R = 9 \text{ ком}$.

Находим: $I = 0,5 \text{ ма}$.

Дано: $I = 0,2 \text{ мка}$; $R = 10 \text{ Мом}$.

Находим: $E = 2 \text{ в}$.

5. Любая цепь, состоящая из нескольких последовательно соединенных сопротивлений (*5, а*) представляет собой делитель напряжения. Генератор (батарея) распределяет свои силы, и на каждом участке действует некоторая часть э. д. с., так называемое напряжение U на участке цепи. Напряжение на каком-либо участке тем больше, чем сильнее ток и чем больше сопротивление этого участка (*5, д*). А поскольку ток во всей цепи одинаков, то напряжение распределяется пропорционально величинам сопротивлений (*5, а, б, з*). Сумма всех напряжений равна величине э. д. с. (*5, и*). Соотношение между напряжением, током и сопротивлением на участке цепи (*5, д, ж, е*) аналогично формулам закона Ома (*4, б, в, г*).

Общее сопротивление последовательной цепи равно сумме сопротивлений участков (*з*). Если сопротивления резко отличаются по величине, то $R_{\text{общ}}$ примерно равно большему сопротивлению.

Примеры. Дано: $I = 50 \text{ ма}$; $R_1 = 20 \text{ ом}$; $R_2 = 1 \text{ ком}$.

Находим: $U_1 = 1 \text{ в}$; $U_2 = 50 \text{ в}$; $R_{\text{общ}} = 1020 \text{ ом} \approx R_2$.

Дано: $R_1 = 2 \text{ Мом}$; $R_2 = 3 \text{ Мом}$; $E = 10 \text{ в}$.

Находим: $U_1 = 4 \text{ в}$; $U_2 = 6 \text{ в}$; $R_{\text{общ}} = 5 \text{ Мом}$.

6. Шутя можно сказать, что величина э. д. с. — типичное очковитательство. Дело в том, что в любом генераторе есть собственные внутренние потери $R_{вн}$, и на них расходуется часть э. д. с. ($U_{вн}$). Поэтому в «рабочей обстановке» при замкнутой цепи напряжение U_r на выходе генератора (часто говорят: на зажимах) всегда меньше, чем э. д. с. С увеличением нагрузки (увеличить нагрузку — это значит уменьшить R_n), то есть с увеличением потребляемого тока I_n , напряжение на зажимах падает (6, б).

Примеры. Дано: $E = 4,5$ в; $R_{вн} = 2$ ом; $I_n = 0,5$ а.

Находим: $U_{вн} = 1$ в; $U_r = 3,5$ в.

Дано: $E = 4,5$ в; $R_{вн} = 2$ ом; $I_n = 2$ а.

Находим: $U_{вн} = 4$ в; $U_r = 0,5$ в.

7. Если участки цепи в простейшем случае сопротивления соединены параллельно (7, а), то общий ток, проходя через них, разветвится — большая часть тока пойдет по пути наименьшего сопротивления (7, б, в). Обычно одно из сопротивлений по каким-то причинам считают главным, а второе называют шунтом, ответвлением. Подключение шунта и ответвление некоторой части общего тока от главного пути называют шунтированием. Чем сильнее зашунтирован главный участок R_2 (то есть чем меньше $R_{ш}$), тем меньшая часть общего тока идет по основному пути.

При параллельном соединении общее сопротивление (7, г) всегда меньше наименьшего из сопротивлений, а при большой разнице между R_2 и $R_{ш}$ примерно равно наименьшему. Если $R_2 = R_{ш}$, то общее сопротивление равно половине одного из них.

Анализ сложных электрических цепей чем-то напоминает игру в шахматы — нужно одновременно удерживать в памяти довольно много данных, предвидеть события на много ходов вперед. Для иллюстрации сказанного попробуйте уменьшить $R_{ш}$ на нашей довольно простой схеме. При этом уменьшится R_{AB} и, как следствие, снизится общее сопротивление всей цепи (7, д), возрастет ток $I_{общ}$, а это, в свою очередь, увеличит напряжение U_1 . К этому выводу, правда, можно было прийти и более коротким путем: если уменьшить $R_{ш}$, то изменится соотношение сопротивлений делителя $R_1 : R_{AB}$, а значит, и соотношение напряжений $U_1 : U_{AB}$ (5, з).

Примеры. Дано: $U_r = 240$ в; $R_1 = 40$ ком; $R_2 = 40$ ком; $R_{ш} = 40$ ком.

Находим: $R_{AB} = 20$ ком; $R_{общ} = 60$ ком; $I_{общ} = 4$ ма; $U_1 = 160$ в; $U_{AB} = 80$ в; $I_{ш} = 2$ ма; $I_2 = 2$ ма.

Уменьшим $R_{ш}$ до 1 ком. При этом $R_{AB} = 980$ ом \approx

$\approx R_{\text{ш}}; R_{\text{общ}} = 41 \text{ ком}; I_{\text{общ}} = 5,9 \text{ ма}; U_1 = 234 \text{ в}; U_{\text{АБ}} = 6 \text{ в}; I_2 = 0,15 \text{ ма}; I_{\text{ш}} = 5,75 \text{ ма}.$

8. Мощность P , потребляемая каким-либо участком электрической цепи (8,а), в равной степени зависит и от тока I и от напряжения U на этом участке (8, б). Чем больше напряжение, тем бóльшую работу выполняет каждый движущийся заряд; чем больше ток, тем более массовый характер носит движение зарядов, большее число «работников» проходит по проводнику в единицу времени. Все это говорит о том, что одну и ту же мощность можно получить при большом токе и малом напряжении или, наоборот, при большом напряжении и малом токе (8,д). Подставляя в формулу мощности выражения для I или U , взятые из закона Ома для участка цепи (5, д, е), получаем удобные расчетные формулы (8, в, з). Табл. 8, е аналогично табл. 4, д дает комплекты единиц для расчетов мощности.

Примеры. Дано: $U = 120 \text{ в}; I = 0,5 \text{ а}.$

Находим: $P = 60 \text{ вт}.$

Дано: $U = 220 \text{ в}; I = 0,28 \text{ а}.$

Находим: $P = 60 \text{ вт}.$

Дано: $I = 5 \text{ ма} (0,005 \text{ а}); R = 20 \text{ ком} (20\,000 \text{ ом}).$

Находим: $P = 0,5 \text{ вт}.$

Дано: $U = 250 \text{ мв} (0,25 \text{ в}); R = 10 \text{ ком} (10\,000 \text{ ом}).$

Находим: $P = 6,25 \text{ мквт}.$

9. Взглянув на графики 9, б и в, вы, очевидно, сразу поняли, что мы начинаем новую главу воспоминаний. Ее можно было бы назвать: «Что нужно постоянно помнить о переменном токе». На графиках показан синусоидальный переменный ток и такое же напряжение. Практически мы будем почти всегда иметь дело с переменными токами сложной формы. Эффективными называют такое значение тока или напряжения, которое говорит о его способности выполнять работу в среднем за весь период. Ясно, что эффективное значение меньше амплитудного: ведь амплитуда — это довольно редкое явление, своего рода трудовой рекорд. Когда приводят данные генератора или потребителя электроэнергии, одним словом, почти всегда, когда говорят о переменном напряжении, токе или мощности, имеют в виду только их эффективные значения $U_{\text{эф}}$, $P_{\text{эф}}$ и $I_{\text{эф}}$, которые для синусоидального тока легко перевести в амплитудные (9, з, д, е, ж, з). Монополия эффективных значений настолько укрепилась, что индекс «эф» теперь почти никогда не ставят. И если возле букв U , I , P нет индекса «эф», значит речь идет об эффективном значении.

Примеры. Дано: $U_{\text{эф}} = 127 \text{ в.}$

Находим: $U_{\text{ампл}} = 180 \text{ в.}$

Дано: $U_{\text{эф}} = 220 \text{ в.}$

Находим: $U_{\text{ампл}} = 310 \text{ в.}$

Дано: $U_{\text{эф}} = 6,3 \text{ в; } I_{\text{эф}} = 0,3 \text{ а.}$

Находим: $P_{\text{эф}} = 2 \text{ вт; } P_{\text{ампл}} = 4 \text{ вт.}$

Для переменного тока действительны те же соотношения между э.д.с., сопротивлением, напряжением, током и мощностью, которые были приведены для постоянного тока (рис. 30, 4, 5, 6, 7, 8). Однако эти соотношения действительны только для цепей, которые состоят из активных сопротивлений. Как только в цепи появляется так называемый реактивный элемент, например конденсатор или катушка, все электротехнические законы и правила приобретают уже совсем другой вид.

10. Постоянного тока конденсатор не пропускает — между его обкладками находится слой изолятора. Но когда конденсатор заряжается (10, а) и разряжается (10, в), в его цепи все-таки возникает кратковременный ток — заряды двигаются на обкладки или уходят с них. Под действием переменного напряжения циклы заряд-разряд происходят непрерывно, и в цепи конденсатора протекает переменный ток (10, г). Естественно, что величина тока зависит от напряжения: чем больше U_c , тем больше I_c . Кроме того, ток возрастает с увеличением частоты: чем больше f , тем чаще двигаются заряды «туда-обратно» и тем опять-таки больше I_c . Наконец, есть еще один способ увеличить ток: нужно взять конденсатор большей емкости. Чем больше емкость C , тем большее число зарядов накапливается на обкладках, тем интенсивнее их движение во время заряда и разряда. Учитывая все это, конденсатор представляют в виде некоторого условного сопротивления — емкостного сопротивления x_c , от которого зависит величина тока. Само же x_c зависит от частоты и емкости конденсатора (10, д, е, ж, з; формулы действительны только для синусоидального тока); с увеличением f или C величина x_c падает (ток возрастает). Сопротивление x_c называют реактивным. Оно не потребляет энергии, а лишь влияет на величину тока. Вместо примеров приводим таблицу значений x_c для некоторых частот и некоторых емкостей конденсатора (табл. 10).

11. Совсем иначе ведет себя в цепи катушка индуктивности. Ее общее сопротивление складывается из двух частей: активного сопротивления проводов и индуктивного сопротивления x_L . Индуктивное сопротивление x_L пришлось ввести потому, что катушка особым, «хитрым» способом влияет на величину тока — с помощью собственного магнитного поля

Таблица 10

Реактивные сопротивления

Значение C и L	Емкостное сопротивление x_C и индуктивное x_L на разных частотах					
	50 гц	200 гц	1 кГц	5 кГц	15 кГц	25 кГц
20 мкф	160 ом	40 ом	8 ом	1,6 ом	0,5 ом	0,3 ом
1 мкф	3,2 ком	800 ом	160 ом	32 ом	10 ом	6,4 ом
0,025 мкф	130 ком	32 ком	6,4 ком	1,3 ком	430 ом	260 ом
1000 пф	3,2 Мом	800 ком	160 ком	32 ком	10,6 ком	6,4 ком
50 пф	64 Мом	16 Мом	3,2 Мом	640 ком	210 ком	130 ком
1 гн	320 ом	1,3 ком	6,4 ком	32 ком	96 ком	160 ком
1 мгн	0,32 ом	1,3 ом	6,4 ом	3,2 ом	96 ом	160 ом

катушка сама в себе наводит э.д.с. («противо э.д.с. самоиндукции»), которая действует против напряжения генератора. Чем выше частота f и больше индуктивность катушки L , тем сильнее эта противодействующая э. д. с., тем, следовательно, больше x_L (табл. 10) и меньше ток. Величина индуктивности зависит от данных самой катушки. С увеличением числа витков и размеров сердечника индуктивность растет.

12. Катушка наводит э.д.с. не только сама в себе, но и в соседней катушке, если, конечно, та находится в сфере влияния магнитного поля. Весь процесс выглядит примерно так. К первой катушке (ее называют первичной обмоткой) подводится переменное напряжение, создающее переменный ток, под действием которого возникает переменное магнитное поле. Оно охватывает витки второй катушки (ее называют вторичной обмоткой) и наводит в ней переменное напряжение (если не учитывать потери, можно говорить о наведенной э.д.с.), под действием которого в цепи появляется переменный ток. Обратите внимание, как часто повторяется здесь слово «переменный», — напряжение во вторичной обмотке наводится только при изменении магнитного поля. Иногда об этом говорят так: «Постоянный ток не трансформируется».

Система из двух или нескольких связанных магнитным полем катушек — это и есть трансформатор. В дальнейшем мы будем говорить о трансформаторах, где все катушки связаны очень сильно — они находятся на общем стальном сердечнике. Соотношение токов и напряжений в обмотках опре-

деляется коэффициентом трансформации n . Трансформатор повышает напряжение, если $n > 1$, и понижает, если $n < 1$. Все это, разумеется, условно: трансформатор — машина обратимая, он может быть и понижающим и повышающим в зависимости от того, к каким обмоткам вы подключите генератор и нагрузку. Очень распространены трансформаторы с несколькими обмотками, дающие несколько различных напряжений (12,з). Диаметр провода для обмоток выбирают с учетом проходящего по ним тока (табл. 11).

Мощность P_1 , потребляемая трансформатором, а значит, и ток I_1 в первичной обмотке зависят от той мощности P_2 , которую потребляет нагрузка R_n . Если, например, уменьшить R_n , то есть увеличить I_2 , то одновременно возрастет общая потребляемая мощность P_1 и ток I_1 . Эту последнюю зависимость удобно выражать с помощью условного сопротивления R'_n (12,а,е), которое как бы вносится в первичную цепь из вторичной. Если трансформатор повышающий, то $R'_n < R_n$, а если понижающий, то $R'_n > R_n$. Любой короткозамкнутый виток или группа витков представляют собой недопустимо большую нагрузку и могут вывести из строя весь трансформатор. При разомкнутой вторичной обмотке (холостой ход) трансформатор практически ничего не потребляет.

Пример. Дано: обмотка I — 1200 витков; обмотка II — 60 витков;

$$U_1 = 120 \text{ в}; R_n = 10 \text{ ом.}$$

$$\text{Находим: } n = 0,05; U_2 = 6 \text{ в}; I_1 = 0,005 \text{ а}; I_2 = 0,1 \text{ а}; \\ P_1 \approx P_2 = 0,6 \text{ вт. Число витков на 1 в} = 10.$$

Трансформатор, в котором роль вторичной обмотки II выполняет часть первичной обмотки I, называется автотрансформатором (12,и). Часто в автотрансформаторе (а также в первичной обмотке трансформатора) делают несколько отводов, для того, чтобы на него можно было подавать несколько различных напряжений. Это, в частности, удобно, когда трансформатор должен работать от сети с изменяющимся напряжением. Секция с большим числом витков соответствует большому напряжению. Коэффициент n для автотрансформатора определяется так же, как и для трансформатора.

13. Во многих цепях электронных устройств протекает пульсирующий ток. Величина его меняется, как у переменного, а направление остается неизменным, как у постоянного. Чтобы получить пульсирующий ток, можно использовать два генератора — постоянного и переменного тока.

14. Независимо от того, каким способом был создан пульсирующий ток, можно довольно просто разделить его основ-

ные составляющие — постоянную I_0 и переменную I_{\sim} . Для этого применяют электрические фильтры — цепи, где эти составляющие встречают разное сопротивление. Так в фильтре RC конденсатор не пропустит постоянную составляющую и таким образом отделит ее от переменной. Фильтр RL рассчитывают так, чтобы для переменной составляющей x_L было намного больше R . Постоянная составляющая по катушке проходит почти беспрепятственно. Своеобразным фильтром является трансформатор — постоянная составляющая не наводит э.д.с. в его вторичной обмотке.

Т а б л и ц а 11

Медная проволока в эмаливой изоляции (ПЭ, ПЭВ, ПЭЛ, ПЭТ)

Диаметр (мм)	Сечение (мм ²)	Вес 100 м (г)	Сопротивление 1 м при 20° С (ом)	Допустимый ток при 2 а/мм ² (а)	Допустимый ток при 3 а/мм ² (а)
0,05	0,002	1,8	9,29	0,004	0,006
0,08	0,005	4,6	3,63	0,01	0,015
0,1	0,008	7,3	2,23	0,016	0,025
0,12	0,011	10,4	1,55	0,02	0,03
0,14	0,015	14	1,14	0,03	0,05
0,16	0,02	18,3	0,87	0,04	0,06
0,18	0,025	23,1	0,69	0,05	0,07
0,2	0,031	28,5	0,56	0,06	0,09
0,25	0,049	44,5	0,36	0,1	0,15
0,31	0,075	68,8	0,23	0,15	0,22
0,35	0,096	87,4	0,18	0,2	0,3
0,41	0,132	120	0,13	0,26	0,4
0,44	0,152	138	0,115	0,3	0,45
0,49	0,188	171	0,093	0,4	0,6
0,55	0,238	215	0,074	0,48	0,7
0,64	0,321	291	0,055	0,65	1,0
0,8	0,503	445	0,035	1,0	1,5
1,0	0,785	707	0,022	1,5	2,2
1,2	1,31	1022	0,0155	2,6	4
1,56	1,9	1712	0,0092	3,8	6
2,02	3,2	2875	0,0055	6,5	9,5
2,44	4,68	4210	0,0038	9,5	15

15. Фильтром является также колебательный контур — цепь, состоящая из конденсатора и катушки (15,а). Оба эти элемента являются накопителями энергии: в конденсаторе концентрируется электрическое поле, в катушке — магнитное. В процессе обмена энергией между накопителями (L и C) в

контуре протекает переменный ток определенной частоты. Чем больше L и C , тем медленнее происходит процесс обмена, тем ниже частота f_0 . Все это напоминает уже знакомые нам механические колебания струны. Подобно струне, контур резонирует на колебания, частота $f_{\text{рез}}$ которых равна его собственной f_0 (15, д). Благодаря этому с помощью колебательных контуров можно «вылавливать» отдельные синусоидальные составляющие (15, в, г) из электрического тока сложной формы (15, б).

16. Весьма распространенный процесс — выпрямление переменного тока начинается с превращения переменного тока в пульсирующий. Это можно сделать с помощью электрического вентиля — устройств, которое пропускает ток только в одну сторону (16, а, б).

17. Однополупериодный выпрямитель (16, в) работает через такт. Два таких выпрямителя, соединенных особым образом, дают двухполупериодную схему (17, а), которая использует оба полупериода переменного напряжения. Чтобы вентили двухполупериодной схемы работали поочередно, к ним нужно подвести два противофазных напряжения U_1 и U_2 . Их дает трансформатор с двумя одинаковыми вторичными обмотками или с одной обмоткой, имеющей удвоенное число витков и вывод от середины (средняя точка А). Мостовая (или мостиковая) схема (17, е) позволяет получить двухполупериодное выпрямление только с одним источником переменного напряжения, например с одной повышающей обмоткой. Для этого, правда, требуется уже не два, а четыре вентиля. Они соединены так, что пропускают ток по сопротивлению нагрузки только в одну сторону как во время положительного, так и во время отрицательного полупериода.

18. Выпрямитель переменного тока необходим для питания от сети ламповых приемников и усилителей. Наряду с вентилем в такой выпрямитель входят фильтры, которые помогают отбросить переменные составляющие пульсирующего тока и выдать «продукцию без брака» — выпрямленный ток (напряжение) без пульсаций. Чаще всего применяется П-образный RC -фильтр, в который входят электролитические конденсаторы $C_{\phi 1}$ и $C_{\phi 2}$ большой емкости. Для улучшения фильтрации желательно было бы увеличить и R_{ϕ} , однако величина его ограничена — на этом сопротивлении не должна теряться слишком большая часть выпрямленного напряжения (U_{ϕ}). Трансформатор, работающий в выпрямителе, называют силовым или сетевым.

19. Роль вентиля может выполнять электронная лампа — диод (двухэлектродная). Из ее баллона откачан воздух —

создан вакуум, в котором формируется направленный поток электронов. Источник электронов — катод K нагрет до высокой температуры подогревателем Π , своего рода электроплиткой. Именно в результате нагрева катода электроны выходят за его пределы (термоэлектронная эмиссия). Если между анодом A и катодом включить батарею так, чтобы на аноде был «плюс» (19, б), то в лампе появится анодный ток — движение электронов от катода к аноду. Не забывайте, что условное направление тока — от анода к катоду: так двигались бы в лампе положительные заряды. Под действием переменного напряжения в лампе появляется пульсирующий ток (19, г).

20. В простейшей усилительной лампе — триоде — на пути анодного тока установлена металлическая сетка (в современных лампах спираль). Управляющая сетка ($УС$) расположена близко к катоду, и поэтому напряжение, действующее между сеткой и катодом, весьма сильно влияет на величину анодного тока. К сеточной цепи (вход усилительного каскада) подключают источник усиливаемого сигнала, а в анодную цепь (выход каскада) включают нагрузку, где выделяется усиленный сигнал. Под действием входного сигнала меняется напряжение на сетке, и вместо постоянного анодного тока появляется ток сложной формы — нужная нам мощная копия. Энергию на ее создание дает анодная батарея. На анод триода всегда подают довольно высокое положительное напряжение U_a от анодной батареи или выпрямителя (50—250 в), а на накал — небольшое переменное напряжение U_n , для большинства ламп 6,3 в. Напряжение накала (его величину приблизительно указывает первая цифра в названии лампы) обычно получают от отдельной обмотки силового трансформатора. Для удобства монтажа вместо одного из проводов используют металлическое шасси приемника или усилителя, и на схеме подключение к этому общему проводу показывают как соединение с шасси. Подключение к шасси часто называют заземлением. Все напряжения принято указывать относительно шасси. Для краткости говорят: «напряжение на аноде», «напряжение на сетке» и т. д., имея при этом в виду напряжение между анодом и шасси, сеткой и шасси и т. д.

21. Работу усилительного каскада хорошо иллюстрирует объединенный график, похожий на тот, который мы строили для громкоговорителя (рис. 16). Основа графика — анодно-сеточная характеристика лампы (21, а), показывающая, как меняется анодный ток I_a при изменении напряжения на сетке U_c . К этой характеристике снизу мы пристраиваем график напряжения на управляющей сетке U_c . Располагаем его так, чтобы ось U_c совпала с такой же осью на ламповой характе-

ристике. Теперь, следуя по маршруту «график U_c — характеристика лампы», можно быстро и легко найти значение I_a для любого момента времени t . Полученное значение тока тут же переносится на третий график, показывающий, как изменяется I_a с течением времени (21, в).

Вспомните, что заход на криволинейные участки характеристики громкоговорителя — верхний и нижний загибы — приводил к нелинейным искажениям воспроизводимого звука. Точно так же работа на загибах ламповой характеристики приведет к тому, что форма графика I_a будет отличаться от формы графика U_c . Иными словами, в процессе усиления сигнала появятся нелинейные искажения. Для того чтобы не выходить за пределы нелинейного участка, на сетку вместе с сигналом подают «минус» постоянного напряжения — смещение $U_{см}$. Этот «минус» определяет рабочую точку — режим лампы при отсутствии входного сигнала. Отрицательное смещение подбирают так, чтобы «исходная позиция» (рабочая точка) соответствовала середине прямолинейного участка на ламповой характеристике. С одной стороны граница прямолинейного участка проходит там, где начинаются положительные напряжения на сетке. Как только на сетке появится «плюс», она начнет притягивать электроны, появится сеточный ток I_c , и это приведет к некоторому уменьшению анодного тока (верхний загиб). С другой стороны прямолинейный участок ограничен областью, близкой к запирающему лампы: при больших отрицательных напряжениях сетка вообще не пропускает электроны к аноду, и анодный ток прекращается (нижний загиб).

22. Чтобы создать отрицательное смещение, можно включить в цепь сетки очень большое сопротивление (10—20 *Мом*). Единичные электроны всегда попадают на сетку, даже при отрицательных напряжениях на ней. Этого небольшого тока (доли микроампер) достаточно, чтобы на большом R_c создать смещение в несколько вольт.

Сопротивление в сеточной цепи — сопротивление утечки R_c (чаще всего 0,5—1 *Мом*) должно быть включено всегда при любой другой схеме смещения, так как всегда должен быть путь, по которому электроны смогут вернуться с сетки на катод. Иначе, накопившись на сетке, они создадут там большой «минус» и запрут лампу.

23. Обычно отрицательное смещение создают с помощью катодного сопротивления R_k . Проходя по нему, анодный ток создает напряжение $U_{см} = I_{a0} \cdot R_k$. «Плюс» этого напряжения приложен к катоду, а «минус» через R_c — к сетке. Чтобы на R_k действовало только постоянное напряжение, переменную

составляющую замыкают через конденсатор C_k . Его емкостное сопротивление x_c должно быть меньше R_k на самой низкой из возможных частот f_{\min} — по крайней мере в 5—10 раз. При этом на более высоких частотах давно будет выполняться условие $x_c < R_k$.

Пример. Дано: $I_a = 50 \text{ ма}$; $U_{cm} = 10 \text{ в}$.

Находим: $R_k = 200 \text{ ом}$ (5, ж).

Задаемся: для 100 гц $x_c = 40 \text{ ом}$, в 5 раз меньше, чем R_k .

Находим: C не менее 50 мкф (табл. 10).

Мощность сопротивления R_k не менее $P_k \geq 0,5 \text{ вт}$ (рис. 8, в).

24. Усиление, которое дает каскад, так же, как выходная мощность $P_{\text{вых}}$ и выходное напряжение $U_{\text{вых}}$, зависит от величины сопротивления анодной нагрузки R_a . Чем больше R_a , тем больше напряжение, которое создает на нем анодный ток (5, д) и тем больше $P_{\text{вых}}$ и $U_{\text{вых}}$. В то же время чрезмерное увеличение R_a может ухудшить все эти показатели, а вдобавок еще и увеличить искажения. Вот почему для каждой лампы и каждого ее режима существует оптимальное (наивыгоднейшее) сопротивление нагрузки $R_{a, \text{опт}}$, при котором получается большое усиление, или малые искажения, или, наконец, удовлетворительно выполняются оба условия.

Если нагрузкой является обычное сопротивление, то приходится разделять постоянную и переменную составляющие анодного тока (напряжения) с помощью простейших фильтров. По цепочке $R_{c2} C_{c2}$ проходит часть переменной составляющей (только переменной — в цепи конденсатор!) анодного тока и создает на R_{c2} переменное напряжение $U_{\text{вых}}$. Оно и представляет собой выходной сигнал в чистом виде. Важно заметить, что в тот момент, когда растет U_c , то вместе с ним увеличиваются I_a и U_n , падение напряжения на нагрузке. В результате напряжение на аноде U_a уменьшается, то есть U_a и U_c изменяются в противофазе. По этому поводу принято говорить, что лампа поворачивает фазу на 180° (6, е).

25. Если нагрузкой лампы является низкоомный громкоговоритель, то его приходится включать в анодную цепь через трансформатор. Правильно рассчитав (6) коэффициент трансформации n , можно создать необходимое (обычно 2—10 ком) сопротивление нагрузки даже при небольшом (обычно 2—10 ом) сопротивлении звуковой катушки громкоговорителя.

Пример. Для лампы 6П14П при $U_b = 250 \text{ в}$ оптимальное сопротивление нагрузки $R_{a, \text{опт}} = 5,2 \text{ ком}$. Необходимо под-

ключить к лампе громкоговоритель 5ГД-10 с сопротивлением звуковой катушки 4,5 ом. Находим: $n = 0,03$.

26. Простейшая усилительная лампа — триод — имеет два существенных недостатка. Во-первых, анод и сетка образуют своего рода конденсатор $C_{ас}$, через который переменное напряжение попадает обратно из анодной цепи в сеточную. Во-вторых, анодное напряжение, хотя и меньше, чем сеточное, но все же довольно сильно влияет на анодный ток, а это заметно ухудшает усилительные свойства лампы. Для устранения этих недостатков между анодом и управляющей сеткой располагают еще одну — экранирующую — сетку (ЭС) и получают четырехэлектродную лампу — тетрод. На экранирующую сетку подают положительное напряжение $U_{э0}$. Оно всегда с равной силой подтягивает к аноду электроны, независимо от того, как меняется напряжение на самом аноде. Для переменного тока сетку заземляют: через конденсатор $C_э$ ее соединяют с катодом или с корпусом. Переменные токи, которые в триоде через междуэлектродную емкость $C_{ас}$ могли попасть в цепь управляющей сетки, в тетроде замкнутся по кратчайшему пути $C_{аэ} - C_э$ (26, в). Напряжение на экранирующую сетку и на анод, как правило, подают от одного источника. Чтобы снизить $U_{э0}$ по сравнению с $U_{а0}$ чаще всего включают гасящее сопротивление $R_э$. Постоянная и составляющая экранного тока (на экранирующую сетку тоже попадают электроны!), проходя по $R_э$, создают на нем некоторое напряжение ($U_{Rэ} = I_{э0} R_э$), которое вычитается из общего напряжения $U_в$. Емкость конденсатора $C_э$ выбирается из тех же соображений, что и C_k : для частоты $f_{мин}$ емкостное сопротивление должно быть значительно меньше, чем $R_э$. Чтобы снизить напряжение на экранирующей сетке, достаточно увеличить $R_э$.

Пример. Дано: $U_в = 250$ в; $U_{э0} = 100$ в; $I_{э0} = 0,5$ ма;
 $f_{мин} = 50$ гц.

Находим: $U_{Rэ} = 150$ в; $R_э = 300$ ком; $C_э$ не менее 0,1 мкф; $P_{Rэ} = 0,75$ мвт.

27. Дальнейшее улучшение усилительных свойств лампы достигнуто в пентоде (пятиэлектродная лампа). Третья сетка расположена вблизи анода и отталкивает, возвращает обратно к аноду так называемые вторичные электроны, которые идут против общего тока — от анода к «плюсу» на экранирующей сетке. Это неприятное явление называют динаatronным эффектом, а третью сетку — антидинаatronной или пентодной (ПС). Ее обязательно соединяют с катодом, причем у некоторых ламп это соединение сделано внутри баллона (27, а). Существует

еще один способ борьбы с динаatronным эффектом: лучевые тетроды (27, в) и пентоды сконструированы так, что первичные электроны идут к аноду концентрированными пучками (лучами) и сами возвращают вторичные электроны обратно на анод.

28. Из большого числа комбинированных ламп (в одном баллоне две совершенно самостоятельные лампы) в усилителях НЧ чаще всего используются двойные триоды с общим (28, а) либо раздельными катодами (28, б).

29. Справочные данные о лампе включают ее цоколевку (схему соединения электродов с ножками цоколя), рекомендованные режимы U_{a0} , U_{cm} , $U_{э0}$, номинальные токи для этих режимов I_{a0} , $I_{э0}$ и основные параметры лампы S , μ и R_i . Крутизна S (б, в) показывает, насколько сильно напряжение U_c влияет на величину анодного тока I_a . Коэффициент усиления μ — это число, показывающее, во сколько раз напряжение на сетке U_c влияет на анодный ток I_a сильнее, чем U_a . Внутреннее сопротивление R_i показывает, насколько изменяется I_a при изменении U_a . Греческая буква Δ (дельта) говорит о том, что речь идет о небольших изменениях величин U_c , U_a и I_a . Параметры лампы можно определить по семейству характеристик (29, а) — по нескольким графикам зависимости I_a от U_c , снятых для различных анодных напряжений. Эти графики снимают в идеальных условиях — когда лампа работает без анодной нагрузки. Если же включить нагрузку R_a , то одновременно с I_a будет меняться и U_a ; чем меньше отрицательное напряжение U_c на сетке, тем больше анодный ток, больше напряжение на нагрузке и меньше напряжение на самом аноде. Таким образом, реальная динамическая характеристика как бы объединяет несколько идеальных статистических характеристик и расположена более полого, то есть имеет меньшую крутизну, чем любая из них. Чем больше R_a , тем меньше крутизна динамической характеристики. Именно эту характеристику мы рисуем, когда строим объединенный график для реального усилительного каскада.

30. Для воспроизведения грамзаписей можно построить двухкаскадный усилитель НЧ. Главная задача второго (выходного) каскада — обеспечить достаточную выходную мощность. Для этого служат специальные выходные лампы (второй элемент обозначения — буква П), с довольно большим (десятки миллиампер) анодным током, высокой крутизной и сравнительно небольшим внутренним сопротивлением. Благодаря большому току лампа может создавать достаточно мощную электрическую копию (для распространенных типов ламп — 5—6 вт) входного сигнала. Однако для этого напря-

жение на сетке лампы должно достигать 2—10 в. Ни один из известных нам переводчиков (в частности, звукосниматель) такого напряжения дать не может, и поэтому перед выходным каскадом необходим по крайней мере еще один каскад — усилитель напряжения. Для него используют триоды или пентоды небольшой мощности. Первый каскад усиливает напряжение, полученное от звукоснимателя, в 50—150 раз и обеспечивает достаточно высокую чувствительность усилителя.

Почти все детали схемы 30, 30 должны быть вам знакомы. Среди них вы найдете выходной трансформатор Tr_v , цепочки смещения R_{k1} C_{k1} , R_{k2} C_{k2} , сопротивления утечки сетки R_{c1} , R_{c2} , анодную нагрузку R_{a1} , блокировочный конденсатор C_{a1} — гасящее сопротивление R_{a1} для установки необходимой величины U_a . Разделительный конденсатор C_{c2} защищает управляющую сетку L_2 от постоянного анодного напряжения и беспрепятственно пропускает усиленный сигнал. Переменное сопротивление R_{c1} выполняет роль регулятора громкости. Оно включено как делитель напряжения — на сетку подается часть напряжения, которое дает звукосниматель Z_v . Цепочка R_t C_t образует простейший регулятор тембра. Чем выше движок R_t , тем меньшая часть этого сопротивления включена в цепь, тем большую роль играет конденсатор C_t . Емкость его подобрана так, что C_t замыкает на шасси высшие частоты входного сигнала лампы L_2 и, следовательно, заваливает в этой области частотную характеристику. На низших частотах емкостное сопротивление конденсатора слишком велико, и он мало влияет на частотную характеристику на этом участке.

Рассмотрев схему двухкаскадного усилителя, мы вышли, наконец, на линию старта — копия этой схемы вместе со схемой выпрямителя и указанием данных всех деталей приведена на рис. 44. Здесь же показан один из вариантов монтажа усилителя. В усилителе применены силовой и выходной трансформаторы от приемника «Рекорд».

Усилитель — каким он должен быть?

Для того чтобы сравнивать различные схемы и конструкции усилителей, нужно прежде всего точно договориться о том, какие их качества нужно заносить в графу «хорошо», а какие в графу «плохо». Но еще раньше нужно сказать несколько слов о тех показателях, которые характеризуют работу усилителя (рис. 31).

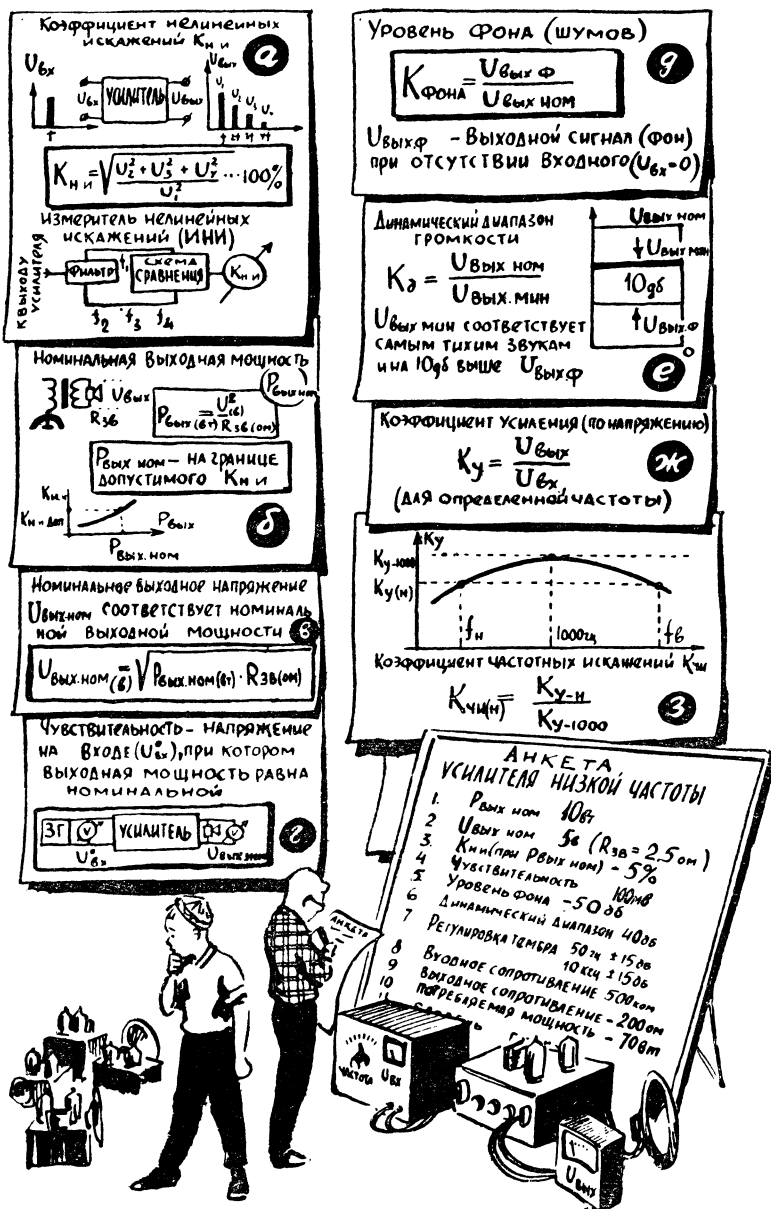


Рис. 31. Для оценки усилителя нужно знать его основные качественные показатели, в частности, номинальную выходную мощность, соответствующие этой мощности коэффициент нелинейных искажений, чувствительность, полосу воспроизводимых частот, допустимые в этой полосе частотные искажения, уровень фона, динамический диапазон громкости.

На вход усилителя НЧ с микрофона, звукоснимателя, магнитной головки и т. п. подается электрический сигнал — копия звука. Такой же сигнал, но, конечно, более мощный, должен появиться на выходе усилителя. Но, к сожалению, в процессе путешествия по усилителю форма сигнала искажается, несколько изменяется его спектр. Здесь мы встречаем уже знакомые виды искажений: нелинейные, частотные и фазовые. Но если раньше мы говорили об искажении звуковых колебаний, то теперь речь идет об искажении электрического сигнала. С точки зрения конечного результата это одно и то же — электрический сигнал превращается в звук, и все искажения в итоге достаются нашему слуху.

Источники частотных искажений — это реактивные элементы схемы — конденсаторы и катушки. Именно они оказывают разное сопротивление синусоидальным составляющим разных частот (рис. 30, 10, 30, 11) и таким образом нарушают соотношение между этими составляющими (рис. 32).

Однако если умело подойти к делу, этот недостаток можно обратить в достоинство. Можно так подобрать реактивные элементы схемы (обычно для этого используют RC -цепочки), чтобы скомпенсировать частотные искажения в других элементах усилительного тракта. Так, например, если громкоговоритель на какой-то частоте заваливает частотную характеристику на 10 дБ, а усилитель на той же частоте дает подъем на 10 дБ, то оба вида искажений компенсируют друг друга. Ровная, без завалов, частотная характеристика усилителя — это хорошо. Но еще лучше, если есть возможность с помощью регуляторов тембра менять эту характеристику в широких пределах и особенно создавать значительный подъем в области высших и низших частот. Усилитель работает «в коллективе», и мы ценим его не только за высокие «личные» качества, но и за то, что он умеет корректировать недостатки своих «коллег», в частности громкоговорителя (рис. 33).

К сожалению, с нелинейными искажениями дело обстоит не так. Возникая в различных элементах тракта, они суммируются, и поэтому нужно добиваться, чтобы на каждом участке $K_{н.и}$ был как можно меньше. В усилителе главные источники нелинейных искажений — это лампы и трансформаторы; их характеристики имеют явно выраженный нелинейный характер (рис. 15 и рис. 30, 21). Принимая ряд мер, удастся снизить $K_{н.и}$ в рядовых усилителях до 5—7% и в усилителях высшего класса до 1—2%.

Рост нелинейных искажений ограничивает увеличение мощности усилителя. Как правило, любой усилитель может отдать мощность большую, чем он отдает, но для этого нуж-

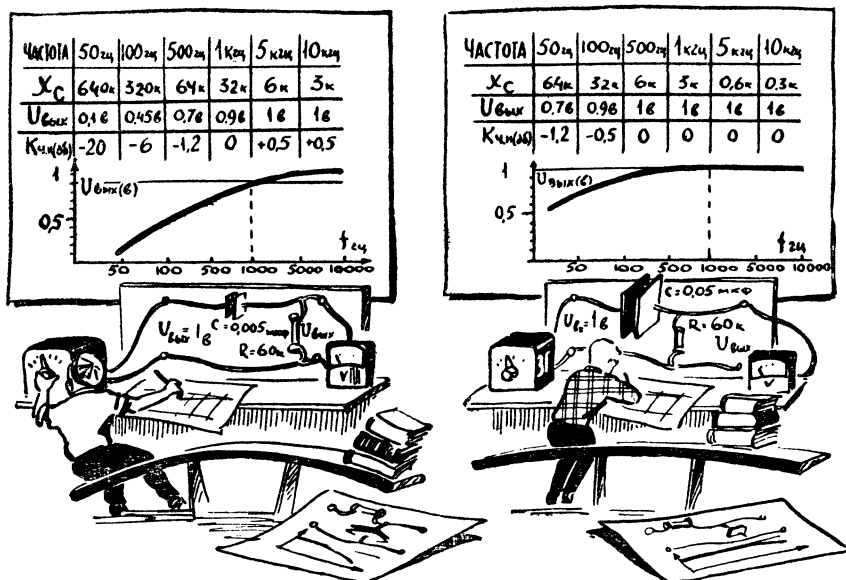


Рис. 32. Частотные искажения возникают из-за реактивных элементов — конденсаторов и катушек, сопротивление которых меняется с частотой; чем больше удельный вес реактивных сопротивлений, тем сильнее частотные искажения.

но залезть на нелинейные участки ламповых характеристик, и $K_{н.и}$ станет недопустимо большим. Поэтому номинальную мощность $P_{ном}$ усилителя определяют так: наибольшая мощность, при которой $K_{н.и}$ не превышает установленной для данного усилителя величины. Номинальная мощность — это «потолок», выше которого подниматься не стоит. Ясно, что этот «потолок» соответствует самым громким звукам, которые появляются не так уж часто. В среднем усилитель развивает мощность значительно меньше номинальной. Поэтому оказалось удобным ввести еще одну характеристику — нормальную мощность $P_{норм}$, которая составляет 10% от $P_{ном}$. Иногда удобно говорить о номинальном и нормальном выходном напряжении. Между ними существует такая связь: $U_{норм} \approx 0,3 U_{ном}$.

С учетом мощности определяют такую важную характеристику усилителя, как чувствительность. Численно она равна напряжению, которое надо подать на вход, чтобы выходная мощность была равна номинальной. Чем меньше это напряжение, тем лучше чувствительность усилителя. По данным,

приведенным в предыдущей главе, можно установить такие нормы чувствительности: усилитель для воспроизведения грамзаписей — 100—250 мв, усилитель для работы от динамического микрофона — 0,5—2 мв, магнитофонный усилитель — 5—10 мв (однодорожечная запись) или 0,5—5 мв (двухдорожечная запись).

С номинальной мощностью связана еще одна важная характеристика усилителя — динамический диапазон.

Чтобы без искажений передать звучание голоса и особенно оркестра, нужно не только воспроизвести звуковые колебания определенной формы, но и сохранить естественное соотношение между самыми тихими и самыми громкими звуками. Это соотношение называется динамическим диапазоном громкости или, коротко, просто динамическим диапазоном. Для речи динамический диапазон составляет 40 дб, а для симфонического оркестра намного больше — около 70 дб.

Казалось бы, нет никаких трудностей для того, чтобы воспроизвести большой динамический диапазон. Есть самый громкий звук, соответствующий номинальной мощности

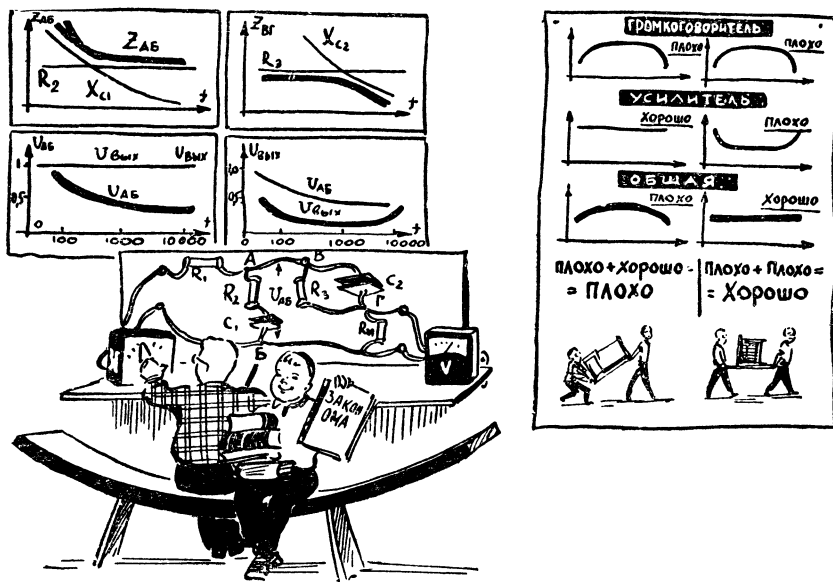


Рис. 33. Используя реактивные элементы (обычно конденсаторы в RC-цепочках), можно получить некоторый подъем на краях частотной характеристики и в какой-то степени скомпенсировать завал, создаваемый громкоговорящими.

усилителя (например, 10 вт), и самый тихий звук должен просто быть на 70 дб тише, то есть должен соответствовать в 10 миллионов раз меньшей мощности (1 мквт). Однако при большом динамическом диапазоне самый слабый звук оказывается слишком слабым — его вообще невозможно услышать. С одной стороны, этому мешает внешний шум — шум, проникающий из соседних помещений, с улицы. С другой стороны, сигналы, соответствующие самым тихим звукам, просто теряются в усилителе — их перекрывают собственные шумы усилителя и, в частности, фон переменного тока.

Фон может появиться из-за плохой фильтрации выпрямленного (анодного) напряжения. Но особенно опасным источником фона являются наводки от сети переменного тока. Провода, по которым переменный ток с частотой 50 гц течет к лампочке, к электроплитке и, наконец, к самому усилителю, — это своего рода передающие антенны. Они излучают электромагнитные волны и наводят во всех металлических предметах, в том числе и в электрических цепях усилителя, слабые переменные напряжения с частотой сети 50 гц. Обычно эти напряжения очень малы — десятки и сотни микровольт. В тех цепях, где проходит достаточно сильный сигнал, эти наводки вообще не заметны, но во входных цепях усилителя, где напряжение сигнала очень мало, наводки уже сравнимы с сигналом. Попад в входную цепь, наводки и весь дальнейший путь по усилителю проходят вместе с сигналом; в итоге громкоговоритель воспроизводит их в виде отвратительного монотонного гула. Это и есть фон переменного тока (рис. 31, д, 34).

Принято считать, что даже самый слабый сигнал (P_{\min}) должен на 10—20 дб превышать уровень шумов и фона усилителя НЧ. В этом случае фон и собственные шумы практически уже не слышны. Во всяком случае, они оказываются неумовимо слабыми в сравнении с сигналом. Но, к сожалению, мы не можем бесконечно уменьшать наводки — существует какой-то предел, ниже которого опуститься очень трудно. Даже для высококачественных усилителей допускается уровень фона на 46 дб ниже номинальной мощности, а для усилителей третьего класса допускается еще более сильный фон — на 32 дб ниже уровня $P_{\text{ном}}$.

Если принять, что самый слабый сигнал должен хотя бы на 10 дб превысить уровень фона, то получится, что усилитель первого класса способен воспроизвести динамический диапазон 36 дб (P_{\min} меньше $P_{\text{ном}}$ в 4000 раз), а усилитель третьего класса — всего 22 дб (по мощности около 200 раз). Как видите, даже у хороших усилителей динамический

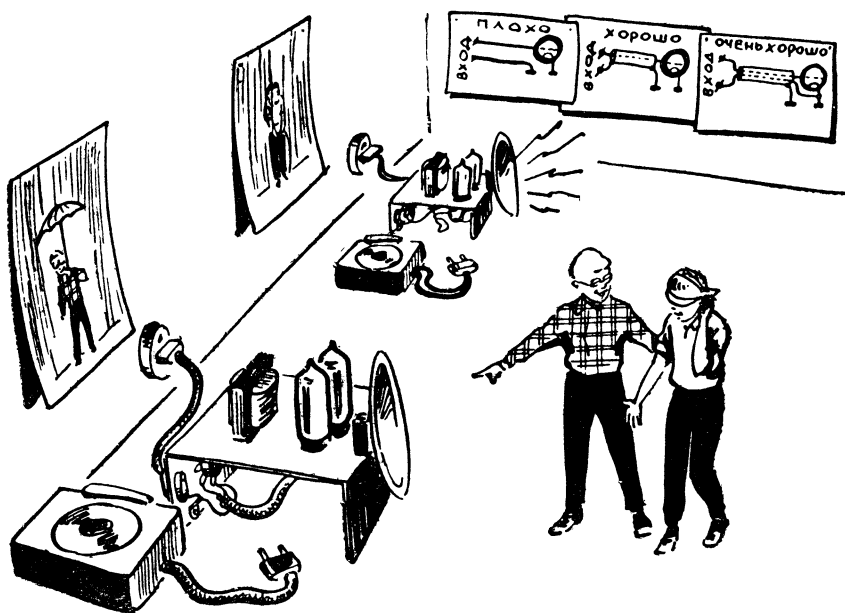


Рис. 34. Наиболее опасный источник фона — наводки переменного (сетевого) тока в цепях с низким уровнем сигнала. Для защиты от наводок входные цепи усилителя тщательно экранируют. Нужно снизить фон до такого уровня, чтобы на слух трудно было определить, включен ли усилитель.

диапазон оказывается значительно меньше, чем динамический диапазон воспроизводимых звуков (оркестр до 70 дб).

Поэтому звуковые программы, в первую очередь музыкальные, приходится искусственно сжимать, уменьшать интервал между самым громким и самым тихим звуками, между форте-фортиссимо и пиано-пианиссимо. Для грамзаписей принят динамический диапазон 45 дб, для радиовещания 35 дб, для радиовещания на УКВ с частотной модуляцией 40 дб. И хотя по сравнению с естественным динамическим диапазоном (70 дб) эти цифры представляются не очень-то большими, но для их реализации, для воспроизведения сжатого диапазона приходится весьма тщательно настраивать усилитель, принимать всевозможные меры для снижения фона и других электрических шумов.

К основным характеристикам относят также входное и выходное сопротивления усилителя. Входное сопротивление $R_{вх}$ шунтирует источник сигнала — микрофон, звукосниматель, магнитную головку — и определяет отбираемую

от этого источника мощность $P_{вх}$. Чем меньше $R_{вх}$, тем больше мощность, потребляемая во входной цепи (рис. 30, 8, 2). Для каскада, работающего без сеточных токов, а именно так и работают все усилители напряжения, входное сопротивление $R_{вх}$ практически равно сопротивлению утечки и составляет сотни тысяч килоом. Почти такую же величину имеет входное сопротивление оконечного каскада (усилитель мощности) тогда, когда выбор его рабочей точки (рис. 30, 21, а) исключает появление сеточных токов. Правда, в некоторых случаях оконечный каскад работает с сеточными токами, и в этом случае его $R_{вх}$ заметно снижается. Здесь действует старый добрый закон Ома: чем больше ток при неизменном напряжении, тем, следовательно, меньше сопротивление цепи.

Выходное сопротивление $R_{вых}$ каскада определяется двумя параллельно включенными сопротивлениями — нагрузкой R_a (для выходного каскада пересчитывается в анодную цепь) и внутренним сопротивлением лампы R_i . Чем меньше каждое из этих сопротивлений, тем меньше $R_{вых}$. Внутреннее сопротивление R_i лампы усилителя мощности (оконечный каскад), работающего на громкоговоритель, подключено (через выходной трансформатор) к звуковой катушке. Мы заинтересованы, чтобы R_i было как можно меньше — в этом случае лампа будет сильнее шунтировать звуковую катушку, будет лучше осуществлять электрическое демпфирование. А это, в свою очередь, срежет резонансные пики на частотной характеристике.

Фильтры и тембры

Почти все регуляторы тембра работают по одному и тому же принципу. Подбираются такие RC -цепи, которые за счет емкостного сопротивления конденсатора имеют разное сопротивление на различных частотах и благодаря этому создают завал или подъем какого-либо участка частотной характеристики. Затем, изменяя R , уменьшают или увеличивают удельный вес, долю емкостного сопротивления в общем сопротивлении цепи и таким образом регулируют степень завала или подъема.

Простейший регулятор тембра можно найти на схеме рис. 35, 1, а. Он в большей или меньшей степени заваливает частотную характеристику в области высших частот.

Можно построить корректирующие цепи для подъема частотной характеристики как в области высших, так и в области низших частот. На схеме рис. 35, 2, а показана простейшая корректирующая цепь, включенная на пути сигнала

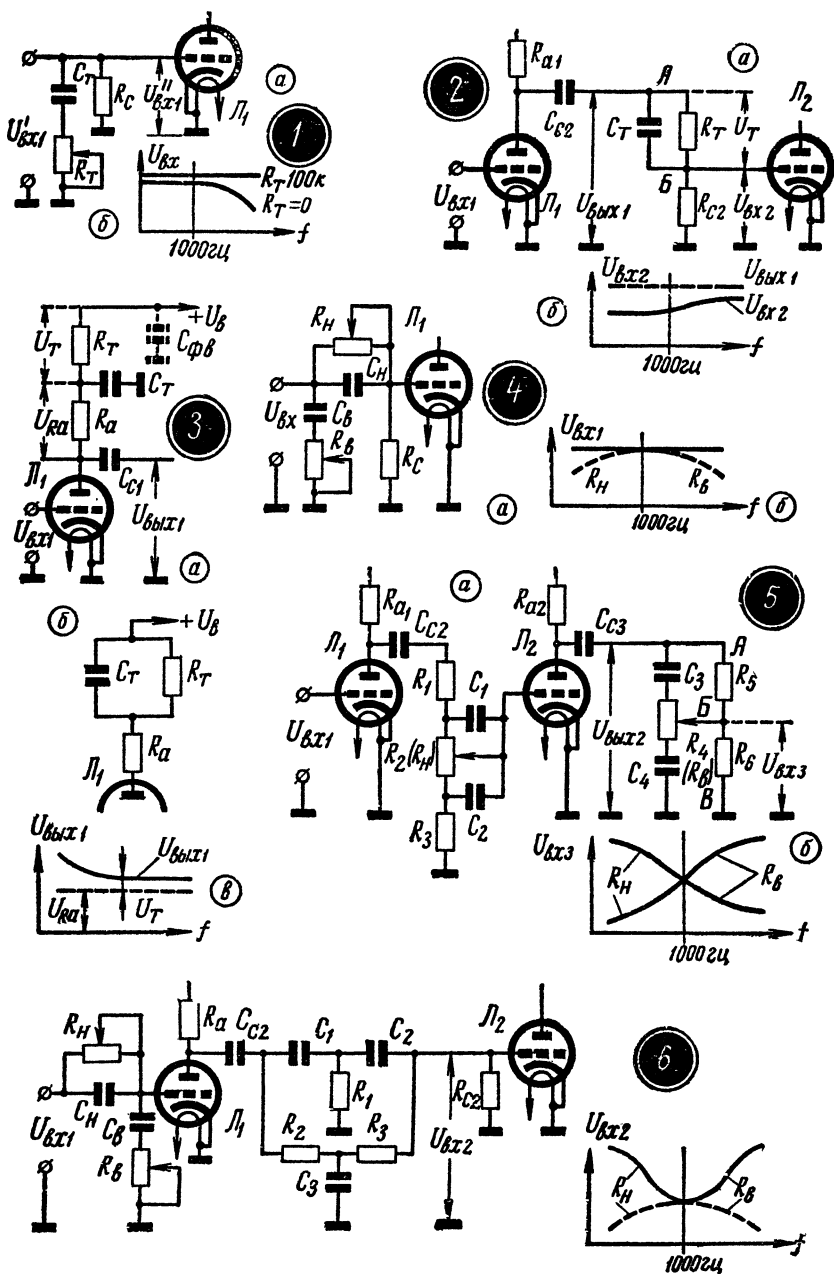


Рис. 35. Регуляторы тембра.

между усилительными каскадами (участок AB). Сопротивление R_T несколько снижает уровень сигнала, так как на этом сопротивлении теряется часть U_T выходного напряжения первого каскада ($U_{\text{вых1}}$). Шунтирующий конденсатор C_T подобран так, что на низших и средних частотах его сопротивление намного больше, чем R_T , и поэтому общее сопротивление участка AB примерно равно R_T . На высших частотах R_T уже заметно шунтировано емкостным сопротивлением, и общее сопротивление участка AB становится меньше. При этом, естественно, на участке AB теряется меньшая часть напряжения $U_{\text{вых1}}$, и на частотной характеристике в области высших частот появляется некоторый подъем (рис. 33).

На схеме рис. 35, 3, *а* анодная нагрузка первого каскада составлена из двух сопротивлений: R_a и R_T , причем одно из них зашунтировано конденсатором C_T . Для начала поясним, почему здесь нужно говорить о шунтировании, каким образом C_T оказывается подключенным параллельно R_T . Один конец C_T непосредственно подключен к R_T , а другой вывод конденсатора заземлен (соединен с корпусом). Но для переменного тока с корпусом соединен и верхний (по схеме) вывод R_T . На этот вывод с выпрямителя подается «плюс» выпрямленного напряжения ($+U_b$), а «плюс» выпрямителя всегда заземлен через конденсатор фильтра $C_{ф.в}$ (например, рис. 44 и 46). Емкость конденсатора фильтра достаточно велика, и можно считать, что верхний по схеме вывод R_T для переменного тока соединен непосредственно с шасси, а значит, и с C_T (рис. 35, 3, *б*).

Емкость конденсатора C_T подобрана с таким расчетом, чтобы на низших частотах его емкостное сопротивление было достаточно велико по сравнению с R_T , а на средних и высших частотах снижало общее сопротивление цепочки.

Практически это означает, что на низших частотах общее сопротивление нагрузки, которое складывается из R_a и сопротивления цепочки $R_T C_T$, оказывается больше, чем во всем остальном диапазоне. Благодаря увеличенному сопротивлению нагрузки усиление каскада на низших частотах повышается, то есть на частотной характеристике появляется подъем (рис. 35, 3, *в*).

Точным подбором корректирующих RC -цепочек удастся построить схемы регуляторов тембра, которые позволяют раздельно регулировать частотную характеристику в области высших и низших частот. Удастся получить весьма большую степень (глубину) регулировки, в частности от -20 дБ до $+20$ дБ. Знак « $-$ » соответствует завалу, а « $+$ » — подъему частотной характеристики. Таким образом, общая глубина

регулировки достигает ± 20 дБ (40 дБ), то есть позволяет изменять напряжение сигнала в 100 раз. Так же, как и для громкоговорителей, подъем и завал оценивают по отношению к частоте 1000 гц.

На рис. 35 приведены некоторые схемы отдельной регуляции тембров и соответствующие этим схемам частотные характеристики. Буквой «в» обозначено переменное сопротивление регулировки в области высших частот, буквой «н» — в области низших частот. Некоторые из этих схем применены в усилителях, описанных ниже (рис. 51 и рис. 61). Схемы рис. 35, 4 и 35, 5 построены на тех же принципах, что и простейшие корректирующие цепи.

Вот как работает регулятор тембра высших частот в схеме рис. 35, 5, а. Когда движок регулятора R_v находится в крайнем нижнем положении, сопротивление R_6 , с которого снимается напряжение $U_{вх3}$, зашунтировано конденсатором C_4 , а это приводит к срезанию высших частот. При верхнем положении движка R_4 конденсатор C_4 уже не влияет на частотную характеристику — он подключен к R_6 через все сопротивление R_4 . Но в этом случае сопротивление R_5 (участок АБ) оказывается зашунтированным конденсатором C_3 . В результате сопротивление участка АБ для высших частот уменьшается и большая часть переменного анодного напряжения $U_{вых}^2$ действует на участке БВ. Это равносильно подъему высших частот. Аналогично поднимает и заваливает частотную характеристику регулятор низших частот, включенный в сеточную цепь лампы. Главный недостаток схемы состоит в том, что многочисленные делители заметно снижают усиление каскада, и поэтому такие регуляторы можно применять только тогда, когда есть достаточный запас усиления.

Основой схемы рис. 35, 6, а является заграждающий фильтр, составленный из двух Т-образных ветвей: $R_1C_1C_2$ и $R_2R_3C_3$. Элементы этого фильтра подобраны с таким расчетом, что он как бы вырезает кусок частотной характеристики, создает резкий завал в области средних частот. Благодаря этому низшие и высшие частоты заметно приподняты. На долю регуляторов тембра достается сравнительно простая работа — они должны лишь заваливать частотную характеристику в соответствующем участке. А сделать это всегда проще, чем поднять ее.

В один из регуляторов тембра (рис. 36, 1, а) специально введен двойной триод, который в данном случае используется как одна усилительная лампа с отдельными входами и общей нагрузкой R_a . На сетки ламп подается одно и то же входное напряжение $U_{вх}$, но подается оно через разные

фильтры. Фильтр $R_1C_1R_2R_3$ ослабляет низшие частоты (чем ниже частота, тем больше емкостное сопротивление конденсатора C_1 , тем меньшая часть $U_{вх}$ попадает на сетку). Фильтр $R_4R_5R_6C_2$, наоборот, ослабляет высшие частоты — чем выше частота, тем сильнее цепочка R_5R_6 шунтируется конденсатором C_2 , тем, следовательно, меньшая часть $U_{вх}$ попадает на сетку. Таким образом, левый (по схеме) триод фактически является усилителем высших частот, а правый — усилителем низших частот. Сопротивление R_2 и R_5 — это обычные регуляторы громкости. Правда, обычными их можно назвать лишь по принципу действия — они подают на сетку некоторую часть подводимого напряжения. Но поскольку каждый из этих регуляторов работает лишь на одном из участков диапазона — на высших или на низших частотах, то они фактически являются эффективными регуляторами тембра. Приведенная схема — это первый шаг к двухполосным усилителям НЧ, о которых будет рассказано в пятой главе.

В заключение этого раздела, в основном посвященного регулировке тембра, остановимся на некоторых особенностях регулировки громкости. Не подумайте, что это оговорка или искусственное объединение разных тем — регулировка громкости и тембра самым непосредственным образом связаны между собой. Во всяком случае, должны быть связаны.

Прежде всего заметим, что переменное сопротивление регулятора громкости должно «знать» закон Вебера — Фехнера. Существуют три типа переменных сопротивлений: A , B и V (рис. 36, 4, a). Они отличаются характером зависимости коэффициента деления $R':R$ от угла поворота подвижного контакта 2. Чтобы регулировка громкости происходила плавно, чтобы повороту ручки регулятора на один и тот же угол всегда соответствовало одинаковое изменение громкости, нужно использовать в качестве регулятора сопротивление типа B с так называемой показательной кривой. По ходу кривой B видно, что при небольших углах поворота α , соответствующих сравнительно небольшой громкости, сопротивление R' , а вместе с ним и $U_{вх}$ меняется незначительно. По мере увеличения R' , то есть при регулировке в области более сильных звуков, сопротивление R' меняется более резко, и это, естественно, приводит к резкому изменению $U_{вх}$. Таким образом, при повороте ручки регулятора на определенный угол мы меняем $U_{вх}$ (а значит, в итоге и звуковое давление громкоговорителя!) в одно и то же число раз, и именно это дает ощущение одинакового изменения громкости.

При конструировании регулятора громкости нужно учитывать еще одну особенность слуха — резкое уменьшение

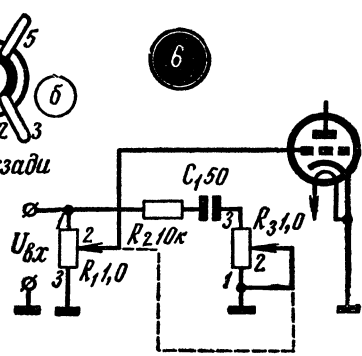
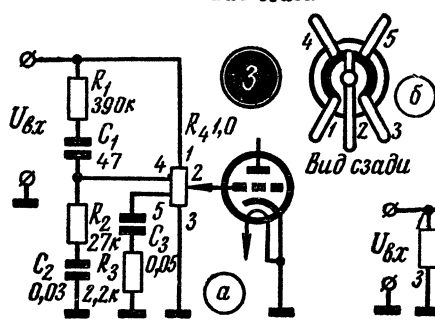
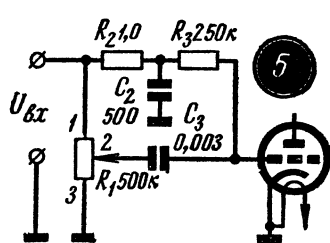
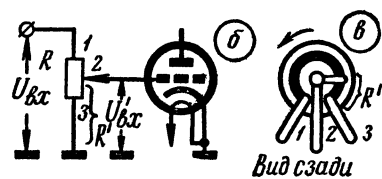
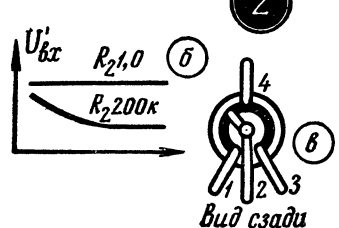
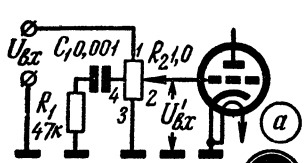
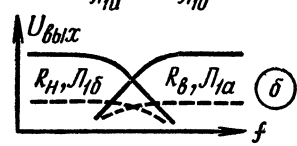
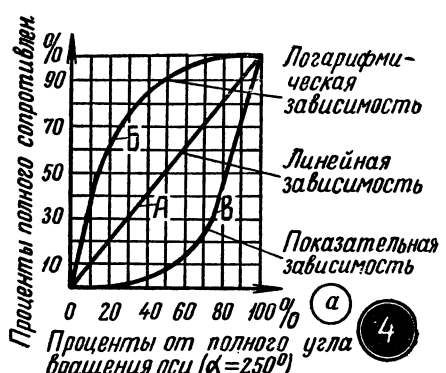
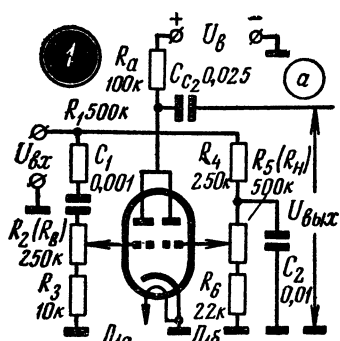


Рис. 36. Регуляторы громкости.

чувствительности на низших частотах. Если мы будем постепенно уменьшать громкость с помощью обычного регулятора, то в области самых тихих звуков одновременно, помимо нашей воли, будет происходить регулировка тембра — будут непропорционально ослабляться низшие частоты. Поэтому, уменьшая громкость, нужно одновременно вращать ручку регулятора тембра и поднимать частотную характеристику в области низших частот. Существуют схемы, где такой подъем осуществляется автоматически, — это схемы регуляторов громкости с тонкомпенсацией.

В наиболее распространенной из них (рис. 36, 2, а, в) используется переменное сопротивление R_2 с отводом 4, к которому подключена цепочка R_1C_1 . Она срезает высшие и средние частоты и таким образом создает некоторый подъем в области низших частот. Однако, когда напряжение $U'_{вх}$ снимается со всего делителя R_2 , цепочка R_1C_1 существенной роли не играет. Значение и влияние ее возрастают по мере того, как движок переменного сопротивления R_2 идет вниз (по схеме), приближаясь к зашунтированному участку 4—3. Аналогично работает и регулятор с двумя отводами (рис. 36, 3) и более сложной системой фильтрующих цепочек. Если в вашем распоряжении нет переменного сопротивления с отводами, можно сделать компенсированный регулятор громкости по простой схеме (рис. 36, 5) или по схеме (рис. 36, 6), где используются спаренные (то есть имеющие общую ось) переменные сопротивления R_1 и R_3 .

Уделив довольно много внимания элементам и цепям усилителя, с помощью которых можно исправить его частотную характеристику, нужно вспомнить и о тех элементах, которые могут частотную характеристику испортить. Это обычные RC -цепи, занимающие в усилителе самые ответственные «должности»: сопротивление нагрузки R_a , переходной конденсатор $C_{с2}$, сопротивление R_c , цепь автоматического смещения R_kC_k , цепь питания экранной сетки R_3C_3 и т. п. Чтобы цепи питания не вносили заметных частотных искажений, емкостное сопротивление конденсатора (его называют конденсатором развязки) должно быть на самой низкой частоте, во много раз (обычно считают достаточным в 5—10 раз) меньше, чем соответствующее активное сопротивление.

Чтобы лучше увидеть, как влияют на частотную характеристику другие элементы усилительного каскада, удобно рассмотреть его эквивалентную схему [8].

Анодной нагрузкой усилителя напряжения служит обычное сопротивление, и поэтому этот каскад называют реостат-

ным. На его эквивалентной схеме (рис. 37, а) лампа заменена условным генератором переменного тока G_{\sim} с внутренним сопротивлением R_i . Такую замену вполне можно допустить, так как для всех последующих цепей лампа действительно является всего лишь источником переменного тока — источником мощной копии усиливаемого сигнала. Эквивалентная схема составлена только для переменного тока, и поэтому один из выводов анодной нагрузки заземлен. Новым элементом является конденсатор $C_{ск}$ — входная емкость последующей лампы, к которой следует прибавить паразитную емкость монтажных цепей.

Основные цепи каскада образуют сложный делитель напряжения, который по-разному ведет себя на разных частотах. На высших частотах сопротивление конденсатора $C_{ск}$ уменьшается, он сильнее шунтирует R_{a1} , то есть уменьшает сопротивление нагрузки. Если R_{a1} будет значительно меньше емкостного сопротивления конденсатора $C_{ск}$, то общее сопротивление участка будет в основном определяться величиной R_{a1} и потому будет мало зависеть от частоты (рис. 30, 7, з). Отсюда напрашивается простой вывод: чтобы ослабить влияние $C_{ск}$ на высших частотах, нужно уменьшить R_{a1} , жертвуя усилением каскада.

Конденсатор C_{c2} вместе с участком $вг$ образуют делитель, на правой (по схеме) части которого действует выходное напряжение $U_{вых}$. С уменьшением частоты емкостное сопротивление конденсатора C_{c2} растет, и на нем действует все большая часть напряжения $U_{a\sim}$ и все меньшая часть этого напряжения приходится на долю $U_{вых}$. Иными словами, разделительный (переходный) конденсатор C_{c2} — один из виновников завала частотной характеристики в области низших частот. Чтобы уменьшить это вредное влияние C_{c2} , нужно, чтобы его емкостное сопротивление даже на самых низших частотах было значительно меньше, чем сопротивление участка $вг$. Вот почему в качестве C_{c2} используют конденсаторы сравнительно большой емкости — от 0,005 мкф (5000 пф) при большом сопротивлении R_{c2} и до 0,1 мкф (100 000 пф) при небольшом.

К разделительному конденсатору, независимо от его емкости, предъявляются два особых требования.

Во-первых, он должен быть рассчитан на сравнительно большое напряжение — не менее чем на 200—300 в. К этому конденсатору, кроме переменного, приложено еще и постоянное анодное напряжение U_{a0} ; если он будет пробит (короткое замыкание между обкладками), «плюс» высокого напряжения U_{a0} попадет на сетку лампы следующего каскада,

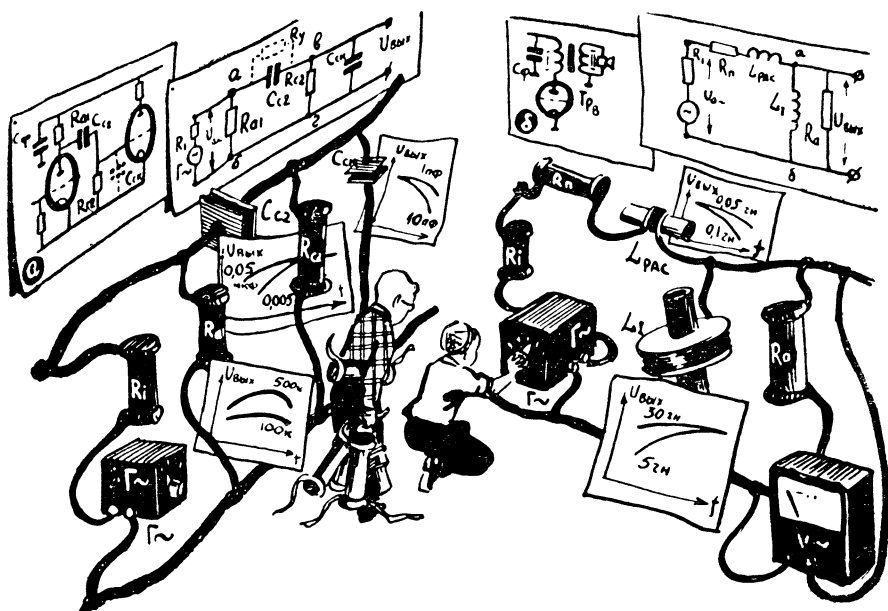


Рис. 37. Эквивалентные схемы реостатного (а) и трансформаторного (б) усилительных каскадов. Это сравнительно простые электрические цепи, на которых удобно анализировать поведение того или иного каскада на разных частотах.

При этом появится огромный анодный ток, и лампа L_2 выйдет из строя.

Во-вторых, сопротивление утечки конденсатора должно быть очень большим. Идеальных изоляторов нет, и прокладка между обкладками любого конденсатора в какой-то степени проводит ток. Поэтому нужно помнить, что параллельно конденсатору всегда подключена проводящая цепь — ее называют сопротивлением утечки R_y . Обычно сопротивление утечки очень велико — сотни и тысячи мегом, и в большинстве случаев им можно пренебречь. У электролитических конденсаторов R_y значительно меньше — сотни и даже десятки килоом, и это несколько ограничивает их применение. Сопротивление утечки R_y конденсатора C_c должно быть во много раз больше, чем R_{c2} . Оба эти сопротивления образуют делитель для постоянного анодного напряжения U_{a0} . И чем меньше R_y , тем значительнее та часть U_{a0} , которая действует на R_{c2} . Нетрудно сообразить, что это напряжение будет служить для последующей лампы положительным смещением, резко нарушающим режим каскада.

Как вы уже заметили, при выборе элементов усилительного каскада учитывается много различных факторов, причем зачастую противоречивых. Задавшись определенными начальными условиями: коэффициентом усиления (K_y) каскада, полосой воспроизводимых частот и допустимыми частотными искажениями, можно рассчитать все данные деталей — сопротивлений и конденсаторов, определяющих схему усилителя. Однако даже заметное отклонение какой-либо величины от расчетной, как правило, не приводит к неприятным последствиям. Так, например, увеличивать емкость конденсаторов C_s и C_k (рис. 30, 30) можно во сколько угодно раз; сопротивления R_a , R_s и R_c можно менять на 10—20%, не опасаясь значительных искажений и изменений коэффициента усиления; емкость конденсатора C_{c2} также можно значительно увеличить. Одно из ограничений связано с тем, что конденсаторы большей емкости имеют меньшее сопротивление утечки; сопротивление R_{k1} нежелательно сильно изменять по сравнению с расчетными данными, так как оно в большой степени определяет режим лампы. Для иллюстрации влияния различных элементов схемы на работу усилительного каскада в табл. 15 приводятся данные деталей к схеме простейшего реостатного усилителя (рис. 30, 30). Для расчета была выбрана полоса частот 100—6000 гц при неравномерности частотной характеристики ± 6 дб. Все данные приведены для двух напряжений на аноде +180 в и +300 в.

На рис. 37, б приведена весьма упрощенная эквивалентная схема усилительного каскада с трансформаторным выходом. Здесь R_n — сопротивление проводов, L_1 — индуктивность первичной обмотки трансформатора, R_a сопротивление нагрузки, пересчитанное в первичную цепь (рис. 30, 12). Катушка $L_{рас}$ — это условный элемент, который отображает рассеяние магнитного поля. Чем большая часть магнитного поля первичной обмотки охватывает витки вторичной обмотки, то есть чем сильнее связаны эти катушки общим магнитным полем, тем меньше $L_{рас}$.

В трансформаторном каскаде так же, как и в реостатном, к лампе подключен сложный делитель напряжения, одним из элементов которого является полезная нагрузка R_a . Во всех случаях желательно, чтобы сопротивление R_n было как можно меньше по сравнению с R_a . Чем меньше R_n , тем меньшая часть переменного напряжения $U_{a\sim}$, а значит, и мощности на нем теряются.

Индуктивность первичной обмотки L_1 шунтирует нагрузку. На высших частотах индуктивное сопротивление обмотки велико (рис. 30, 11), и оно мало влияет на общее сопротив-

ление участка ab . С уменьшением частоты индуктивное сопротивление катушки падает, и она все сильнее шунтирует нагрузку, уменьшает общее сопротивление участка ab , заставляя частотную характеристику на низших частотах. Чтобы предотвратить этот завал, нужно, чтобы индуктивность L_1 была достаточно большой, чтобы даже на самых низших частотах ее сопротивление было больше R_a . Обычно L_1 составляет десятки генри. Для получения такой большой индуктивности обмотки выходного трансформатора размещают на стальном сердечнике, и первичная обмотка содержит несколько тысяч витков.

Индуктивность рассеяния $L_{рас}$, наоборот, должна быть как можно меньше. С увеличением частоты на ней теряется все большая часть переменного напряжения $U_{a\sim}$, и из-за этого появляется завал частотной характеристики в области высших частот. При конструировании выходных трансформаторов принимают меры для уменьшения $L_{рас}$.

На обеих эквивалентных схемах остался неразобраннным лишь один элемент — внутреннее сопротивление лампы R_i . А вместе с тем выбор многих других элементов схемы, и в первую очередь сопротивления анодной нагрузки, в большой степени определяется величиной R_i . В практике приняты следующие ориентировочные нормы: для триодов R_a должно быть в два-три раза больше R_i , для пентодов — в три — пять раз меньше. В выходных каскадах желательно применять лампы с небольшим R_i , так как это улучшает демпфирование громкоговорителя. Именно поэтому в выходных каскадах иногда применяют мощные триоды, внутреннее сопротивление которых значительно меньше, чем у тетродов и пентодов. Правда, и у этих ламп можно заметно понизить величину R_i , применяя интересную схемную «хитрость» — отрицательную обратную связь.

Фокусы с фазами

Переменное напряжение на сетке управляет анодным током, и он создает на анодной нагрузке переменную составляющую напряжения. Это нормальная прямая связь сеточной и анодной цепи, связь через электронный поток в направлении сетка — анод. А теперь попробуем создать связь в обратном направлении. Возьмем часть мощности усиленного сигнала (мощной копии) и направим ее из анодной цепи в сеточную (рис. 38, рис. 39, 1). Давайте попытаемся выяснить, к чему это приведет.

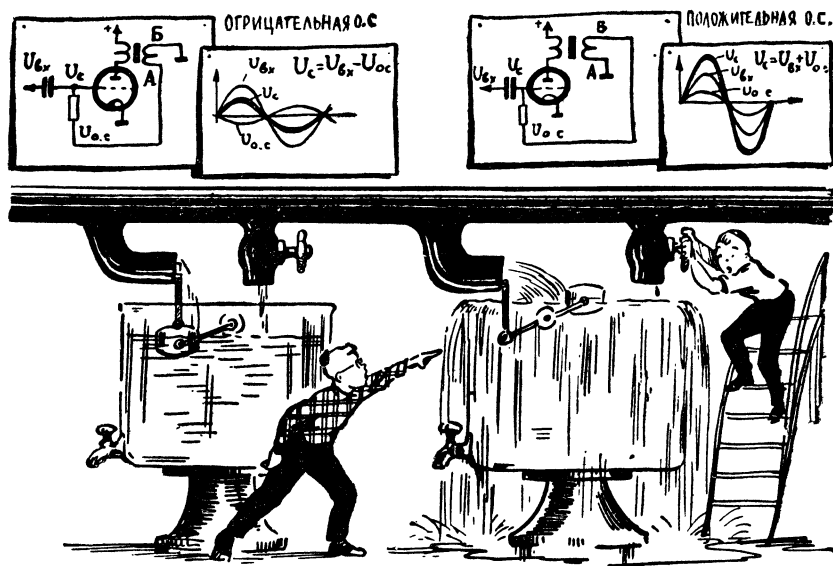


Рис. 38. Возвращая некоторую часть выходной мощности усилителя во входную цепь, мы вводим обратную связь. Если сигнал обратной связи содействует входному сигналу, обратная связь положительна, а если противодействует — отрицательна.

На рис. 39, 1, а показан один из способов введения обратной связи. Со специальной обмотки III выходного трансформатора Tr_v напряжение обратной связи $U_{o.c}$ подается в цепь управляющей сетки. Туда же, как обычно, подается напряжение $U_{вх}$ — сигнал, поступающий на вход усилителя с предыдущего каскада. Теперь напряжение U_c , действующее на сетке L_1 , складывается из двух напряжений — из $U_{вх}$ и $U_{o.c}$. Результат этого сложения прежде всего зависит от фазовых соотношений $U_{вх}$ и $U_{o.c}$.

Если оба напряжения совпадают по фазе, то они действуют согласованно и U_c больше $U_{вх}$ (рис. 39, 1, б, в). Такую обратную связь называют положительной. Она фактически повышает усиление каскада, так как «бесплатно» увеличивает входное, а значит, и выходное напряжение.

Если напряжения $U_{вх}$ и $U_{o.c}$ действуют в противофазе, то результирующее U_c оказывается меньше $U_{вх}$ (рис. 39, 1, г, д), а это фактически означает, что усиление каскада уменьшается. Такая обратная связь называется отрицательной. В обоих случаях для оценки влияния обратной связи вводят

коэффициент β (рис. 40), который показывает, какая часть выходного напряжения подается обратно в цепь управляющей сетки ($\beta = \frac{U_{o.c}}{U_{вх}}$). Чем больше β , тем сильнее, глубже об-

ратная связь, тем в большей степени она повышает (положительная) или понижает (отрицательная) усиление каскада. Часто вместо коэффициента β указывают другую величину. Она называется «глубина обратной связи» и численно

равна $1 + \frac{U_{o.c}}{U_c}$. Чем больше $U_{o.c}$ по сравнению с $U_{вх}$, тем меньше оказывается их разность U_c (отрицательная обратная связь), тем, следовательно, глубже обратная связь. Глубину обратной связи обычно выражают в децибелах. Если сказано, что глубина обратной связи составляет 20 дб, это значит, что $U_{o.c}$ в девять раз больше U_c , то есть $U_{вх}$, поступающее с предыдущего каскада, почти на 90% скомпенсировано отрицательной обратной связью.

В нашей схеме глубина обратной связи зависит от числа витков обмотки III: чем больше витков в этой обмотке, тем сильнее обратная связь.

В схеме рис. 39, 1, а довольно просто изменить характер обратной связи — положительную превратить в отрицательную, и наоборот. Для этого достаточно поменять местами выводы А и Б обмотки III. Если при заземлении вывода А получается положительная обратная связь, то при заземлении вывода Б она будет отрицательной. Объясняется это очень просто. Напряжение на обмотке III непрерывно меняется. Во время одного полупериода на выводе А действует «плюс», а на выводе Б — «минус». Во время следующего полупериода полярность меняется: на выводе А появляется «минус», на выводе Б — «плюс». В зависимости от того, какой из выводов заземлен, мы подаем на сетку «плюс» либо во время четных полупериодов, либо во время нечетных (это, разумеется, условное разделение). Таким образом, $U_{o.c}$ оказывается в фазе с напряжением $U_{вх}$ либо действует против него. Иными словами, меняя местами выводы А и Б, мы сдвигаем фазу напряжения $U_{o.c}$ на 180° (рис. 39, 1, б, в, г, д).

На первый взгляд может показаться, что в усилителях имеет смысл применять только положительную обратную связь. По крайней мере она дает выигрыш в усилении, в то время как при введении отрицательной обратной связи мы только проигрываем (рис. 39, 1, в). Однако более глубокий анализ показывает, что, проигрывая в усилении (как вы сейчас увидите, этот проигрыш легко вернуть), мы можем

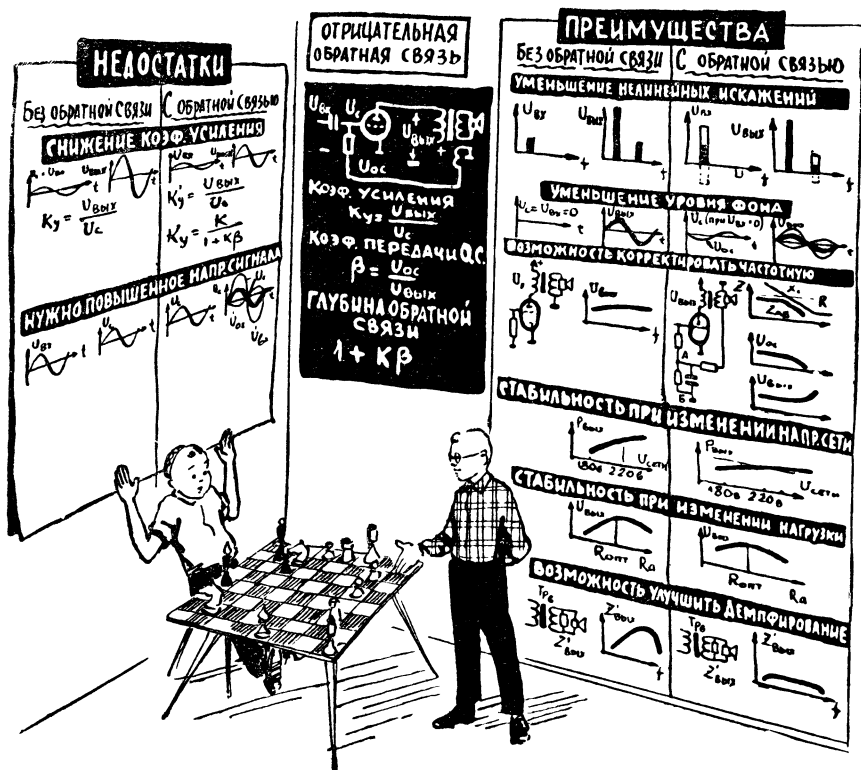


Рис. 40. Отрицательная обратная связь позволяет ослабить фон, уменьшить выходное сопротивление, повысить стабильность, улучшить частотную характеристику и, что особенно важно, понизить нелинейные искажения. Главные недостатки отрицательной обратной связи — пониженное усиление и необходимость большого входного сигнала — обычно отступают перед ее многочисленными достоинствами.

получить сразу несколько важных и крупных выигрышей. Прежде всего с помощью отрицательной обратной связи можно сделать то, чего никаким иным путем добиться невозможно, — снизить нелинейные искажения, возникающие в лампе и выходном трансформаторе (рис. 40).

В результате нелинейных искажений в спектре выходного сигнала появляются составляющие, в частности гармоники, которых во входном сигнале не было. По цепи обратной связи эти посторонние составляющие попадают на сетку лампы и оттуда наравне с входным сигналом управляют анодным

током. Теперь в анодном токе будет две группы посторонних вредных гармоник: первая из них возникает в самой лампе в результате нелинейных искажений, вторую мы создаем искусственно, управляя анодным током с помощью напряжения $U_{0.c}$. Из самого определения отрицательной связи следует, что обе группы составляющих противофазны, то есть посторонние гармоники анодного тока, пробравшись по цепи обратной связи на командный пункт лампы — на управляющую сетку, используют ее усилительные свойства и сами же себя ослабляют. Правда, одновременно уменьшается и напряжение основного сигнала — обратная связь не разбирает, где «свои», где «чужие», и одновременно ослабляет все составляющие выходного напряжения. Однако ослабление основного сигнала — дело поправимое: нужно просто повысить напряжение, поступающее от предыдущего каскада. Если нет необходимого запаса усиления, стоит даже добавить еще один каскад — усилитель напряжения. Выигрыш, который дает применение отрицательной обратной связи, обычно стоит такой жертвы. Она позволяет уменьшить коэффициент нелинейных искажений в несколько раз. Но не только это дает нам отрицательная обратная связь.

До сих пор мы считали, что обратная связь имеет одинаковую глубину на всех частотах. Однако совсем необязательно всегда выполнять это условие. Включив в цепь отрицательной обратной связи уже знакомые нам фильтры, можно завалить или поднять частотную характеристику на том или ином участке. Это хорошо видно на примере включения в цепь обратной связи простейших регуляторов тембра (рис. 39, 5, а). Цепочки $R_n C_n$ и $R_v C_v$ — это уже знакомые нам регуляторы тембра; первый из них в большей или меньшей степени ослабляет низшие частоты, второй — высшие (рис. 35, 4). Точно так же действуют эти цепи и в схеме рис. 39, 5, а. Однако результат здесь получается совсем иным.

Что значит ослабить отрицательную обратную связь на той или иной частоте? Это значит ослабить на этой частоте мешающее действие напряжения $U_{0.c}$ и таким образом повысить усиление. Иными словами, усиление обратной связи приводит к завалу (рис. 39, 5, б) частотной характеристики, а ослабление — к подъему (рис. 39, 5, в).

В цепь обратной связи включают не только регуляторы тембра, но и корректирующие RC -цепочки из постоянных сопротивлений и конденсаторов.

Мы начали разговор о достоинствах отрицательной обратной связи, отметив, что с ее помощью можно понизить внутреннее сопротивление лампы и тем самым улучшить демп-

фирование громкоговорителя. Прежде чем говорить о том, как это делается, придется отметить, что существуют две разновидности отрицательной обратной связи: связь по напряжению и связь по току, или, иначе, параллельная и последовательная обратная связь.

Рассмотрим две наиболее распространенные схемы подачи обратной связи. В первой из них (рис. 39, 2, а) напряжение $U_{o.c}$ возникает на катодном сопротивлении R_k . Это обычное сопротивление автоматического смещения, не заблокированное конденсатором (рис. 30, 23). Проходя по R_k , анодный ток создает на нем напряжение U_k , которое действует между катодом и корпусом, а значит, между катодом и сеткой. По мере увеличения $U_{вх}$ растет I_a , а вместе с ним растет и U_k . Что же касается фазы этого напряжения, то здесь все зависит от «точки зрения». Если мы измеряем напряжение U^* относительно земли (шасси), то $U_{вх}$ и U_k ($U_{o.c}$) действуют синфазно. Если же измерять U_k относительно катода, то оно противофазно $U_{вх}$. Все это настолько очевидно, что, по-видимому, не требует объяснений. Напряжение всегда действует между двумя точками, и если в точке а мы отмечаем «плюс» относительно б, то это одновременно означает, что в точке б будет «минус» относительно а. Подобно этому, человек, живущий на первом этаже, считает, что весь дом находится над ним, а жильцу с последнего этажа кажется, что дом находится под ним.

Чтобы легче было уловить фазовые соотношения в сложной схеме, радиолюбители обычно рассматривают все цепи в момент положительного напряжения на сетке. Рассуждения ведутся примерно так: «Если на сетке «плюс», то анодный ток растет, на катоде растет «плюс», а на корпусе, то есть фактически на сетке — «минус»...»

Рассуждая так, мы приходим к выводу, что напряжение $U_{o.c}$, действующее на катодном сопротивлении R_k , создаст отрицательную обратную связь. Определяя фазу, мы обязаны смотреть на это напряжение со стороны катода. Только при этой «точке зрения» мы определим фазу напряжения на сетке, которая через R_c соединена с корпусом.

Схема рис. 39, 2, а — это одна из схем обратной связи по току — здесь напряжение U_k ($U_{o.c}$) непосредственно зависит от переменной составляющей анодного тока I_a . Обратная связь по току увеличивает внутреннее сопротивление лампы (разумеется, только в данной схеме и в данном режиме), и поэтому ее стараются не применять в выходном каскаде, работающем на динамический громкоговоритель.

В схеме (рис. 39, 3, а) на сетку в качестве $U_{o.c}$ подается

часть переменного анодного напряжения $U_{a\sim}$. Между анодом и катодом включен делитель R_{ac} R_c , на части которого (R_c) и действует напряжение $U_{o.c.}$. В данном случае обратная связь получается отрицательной потому, что напряжение на сетке и на аноде сдвинуты по фазе на 180° , то есть противофазны. Это одна из многих схем обратной связи по напряжению: $U_{o.c.}$ непосредственно зависит от $U_{a\sim}$, так как является его частью. Обратная связь по напряжению уменьшает выходное сопротивление каскада и поэтому применяется очень широко, в том числе и в выходных каскадах, работающих на динамический громкоговоритель.

Еще одно достоинство отрицательной обратной связи: она делает усилитель менее капризным, его режимы в меньшей степени зависят от изменения питающих напряжений, от изменения нагрузки на выходной каскад. Последнее обстоятельство особенно важно для усилителей радиоузлов, так как в процессе работы радиоузла нагрузка его оконечных каскадов может сильно изменяться. Представьте себе, что во время какой-нибудь неинтересной передачи половина слушателей — абонентов радиоузла — выключит свои громкоговорители. В этом случае резко изменится нагрузка, а значит, и режим работы выходного каскада. С несколько похожим явлением мы встречаемся и в усилителе, работающем на динамический громкоговоритель: сопротивление звуковой катушки громкоговорителя неодинаково на различных частотах, и поэтому режим выходного каскада также меняется с частотой.

Каким же образом отрицательная обратная связь может уменьшить эти недостатки? Обратная связь автоматически регулирует усиление каскада: если уменьшится нагрузка и возрастет выходное напряжение $U_{вых}$, то сразу же появится некоторое дополнительное напряжение обратной связи, которое будет стремиться уменьшить $U_{вых}$. Таким образом, отрицательная обратная связь стремится сохранить неизменным выходное сопротивление усилителя и режим его работы.

Некоторые распространенные цепи подачи отрицательной обратной связи упрощенно показаны на рис. 39, 6. Цепь δ нам уже знакома по рис. 39, 1, а. Разница лишь в том, что напряжение $U_{o.c.}$ снимается непосредственно со вторичной обмотки выходного трансформатора, к которой подключен громкоговоритель. Это оказывается возможным потому, что один из выводов звуковой катушки всегда заземляется, причем для громкоговорителя безразлично, какой из выводов обмотки II будет заземлен. Это позволяет, меняя местами выводы А и Б обмотки II, подобрать нужную фазу $U_{o.c.}$. Глубину об-

ратной связи подбирают с помощью сопротивления $R_{o.c}$: чем меньше это сопротивление, тем большая часть выходного напряжения приходится на долю $U_{o.c}$, тем глубже обратная связь.

Цепь g также направляет напряжение $U_{o.c}$ на сетку L_2 , но не непосредственно, а через сопротивление R_{k2} . Теперь к напряжению U_k , которое возникает на этом сопротивлении за счет I_a переменной составляющей анодного тока, прибавится напряжение $U_{o.c}$, поступающее с выходного трансформатора. Цепи e и $ж$ подводят $U_{o.c}$ к усилителю напряжения (L_1), и, таким образом, обратная связь охватывает уже два каскада. В этом случае напряжение $U_{o.c}$ действует более эффективно — оно дополнительно усиливается лампой L_1 . Необходимая фаза напряжения $U_{o.c}$ и здесь устанавливается заземлением того или другого вывода (A или B) обмотки II. При этом все зависит от того, куда и по какому пути направлено напряжение $U_{o.c}$. Так, если для подачи отрицательной обратной связи по линии d нужно заземлить вывод B , то такое же включение обмотки II сохранится и при использовании линии e . Для линии обратной связи g или $ж$ фаза должна быть дополнительно сдвинута на 180° , то есть заземлить нужно вывод A . Аналогичные линии обратной связи вы встретите в большинстве практических схем и усилителей НЧ (рис. 44, 46, 51, 61 и др.).

В некоторых схемах (например, рис. 62) вы увидите не совсем обычную цепь отрицательной обратной связи в каскаде, получившем название ультралинейного усилителя (рис. 39, 4, а). Здесь часть напряжения $U_{a\sim}$ с первичной обмотки выходного трансформатора Tr_v подается на экранную сетку и отсюда управляет анодным током. Переменное напряжение $U_{a\sim}$ и есть напряжение обратной связи. Так же как и $U_{a\sim}$ напряжение $U_{a\sim}$ противофазно сеточному, то есть обратная связь через экранную сетку получается отрицательной. Ультралинейная схема выходного каскада отличается небольшими нелинейными искажениями и низким выходным сопротивлением. Свойства каскада в большой степени зависят от соотношения витков в обмотках Ia и Ib.

У многих из вас мог возникнуть вопрос: зачем на схеме (рис. 39, б) нужно регулировочное сопротивление $R'_{o.c}$, для чего с его помощью мы ослабляем действие обратной связи, которая дает так много преимуществ? На этот очень простой вопрос придется дать весьма подробный ответ.

Выигрыш, который приносит нам отрицательная обратная связь, не достается даром. За него приходится платить дополнительным усилением, а это не всегда возможно и не

всегда выгодно. Стоит ли, например, вводить очень глубокую обратную связь в усилитель, который по заданным условиям должен быть простым и дешевым и от которого в то же время не требуется очень высоких качественных показателей? Здесь, по-видимому, глубину обратной связи целесообразно увеличивать до тех пор, пока это не потребует дополнительных затрат, в частности дополнительного каскада усиления.

Но даже в тех случаях, когда мы не ограничены средствами и когда главная наша задача — улучшить качественные показатели усилителя, мы не можем до бесконечности усиливать отрицательную обратную связь. Одно из главных ограничений связано с тем, что на некоторых частотах отрицательная обратная связь может превратиться в положительную, которая, как известно, все делает наоборот — не улучшает, а ухудшает качественные показатели усилителя. Более того, при определенных условиях положительная обратная связь может превратить усилитель в генератор (самовозбуждение усилителя), и он сам по себе, не получая никакого

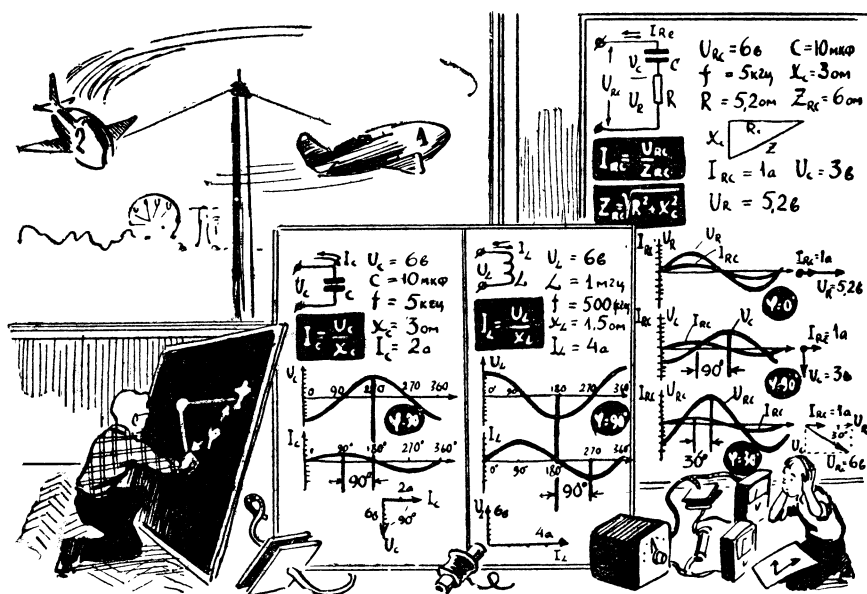


Рис. 41. Между напряжением и током в реактивных элементах — конденсаторах (C) и катушках (L) — существует сдвиг фаз, который принято отображать с помощью векторной диаграммы,

входного сигнала, будет генерировать переменное напряжение — попросту говоря, будет выть и свистеть.

Превращение отрицательной обратной связи в положительную может произойти тогда, когда какие-то элементы создадут дополнительный сдвиг фаз на 180° . Такими элементами могут оказаться RC -цепочки, которые в усилителе встречаются буквально на каждом шагу.

Попробуем детально изучить поведение RC -цепочки, по которой проходит переменный ток (рис. 41, рис. 42). Прежде всего отметим, что в любой цепи переменное напряжение U_R на активном сопротивлении R совпадает по фазе с током I_R (рис. 42, 1, б). Это может показаться никому не нужным заявлением, чем-нибудь вроде «Волга впадает в Каспийское море»... Действительно, для любого момента времени, для любых мгновенных значений должен выполняться закон Ома, а значит, ток I и напряжение U одновременно растут, уменьшаются, меняют направление. Но так бывает не всегда.

Ток I_C в цепи конденсатора C (рис. 42, 2, а) связан с процессом заряда и разряда, то есть связан с изменением напряжения U_C . Чем резче нарастает (рис. 42, 2, б) или падает (рис. 42, 2, в) напряжение, тем больше ток; а в тот момент, когда напряжение на конденсаторе не меняется (рис. 42, 2, г), ток равен нулю. Исходя из этих соображений, можем построить график тока I_C (рис. 42, 2, д). Он будет наибольшим в момент наиболее быстрого изменения U_C (моменты 0, 2, 4 и т. д.) и будет равен нулю в тот момент, когда U_C достигло амплитуды и на какое-то неуловимое мгновение остается неизменным (моменты 1, 3, 5 и т. д.). Как видите, положительная амплитуда I_C (момент 0) наступает на четверть периода раньше, чем положительная амплитуда U_C (момент 1). Иными словами, ток через конденсатор опережает напряжение на конденсаторе на четверть периода, иначе — на 90° .

Существует очень наглядный способ изображения сдвига фаз — векторная диаграмма (рис. 41). Вспомним, что мы договорились весь период делить на 360 условных единиц времени и именно такую единицу называли градусом. Векторная диаграмма — это рисунок, где ток и напряжение показаны в виде определенным образом расположенных линий — векторов. Линии образуют угол, который соответствует сдвигу фаз между током и напряжением. Это очень удобно, так как каждому градусу сдвига фаз (единица измерения времени) соответствует градус (угловая единица) угла между векторами.

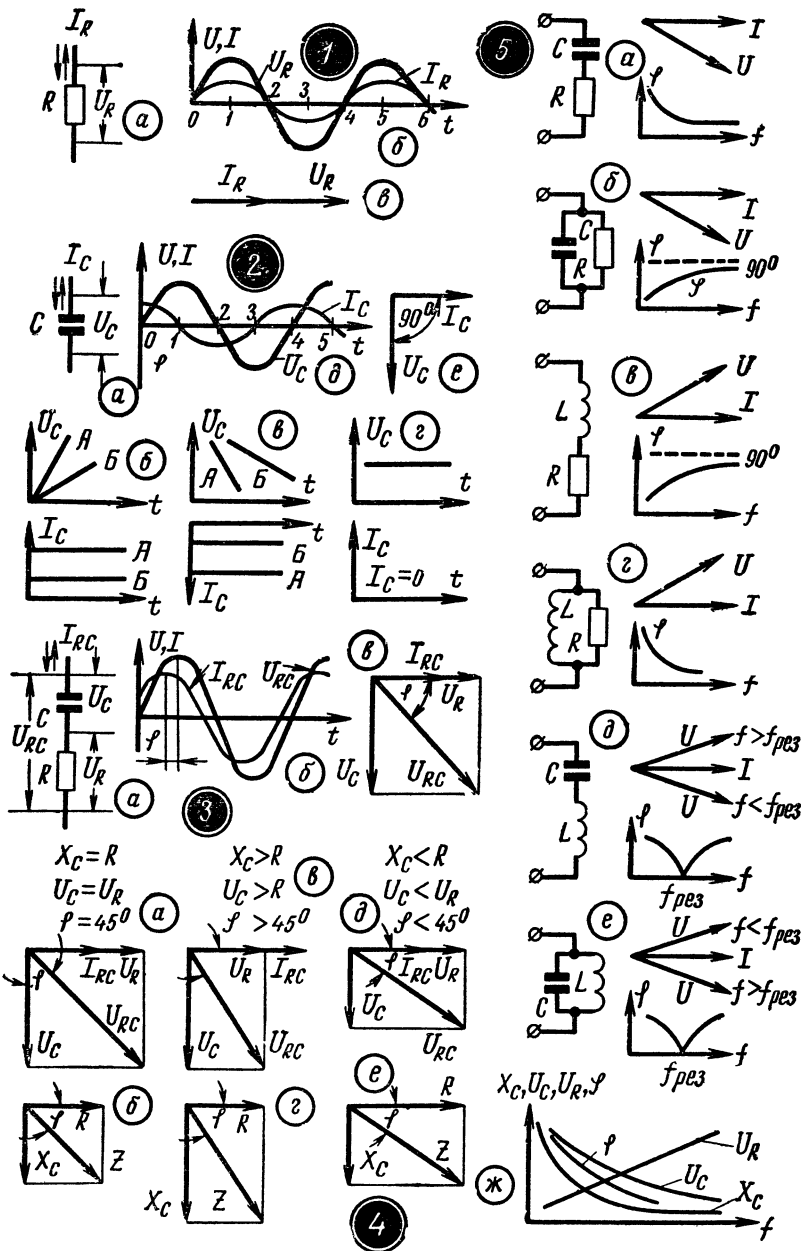


Рис. 42. Фазовращающие цепочки — электрические цепи, сдвигающие фазу.

При сдвиге фаз на четверть периода векторы I и U располагают под углом 90° . Принято считать, что векторы вращаются вокруг точки 0 против часовой стрелки. В нашем примере (рис. 42, 2, з) мы сначала увидим вектор I_C , а затем через 90° вектор U_C . Это как раз и соответствует случаю, когда I_C опережает U_C (или, иначе, U_C отстает от I_C) на четверть периода. Длину векторов откладывают в определенном масштабе: например, в масштабе $1 \text{ мм} = 10 \text{ в}$ или $1 \text{ мм} = 2 \text{ а}$. Строгое соблюдение масштабов необходимо в тех случаях, когда на векторной диаграмме отображено несколько различных напряжений или токов (рис. 42, 3, 4). Один из таких случаев — последовательное включение R и C .

Если к цепочке, составленной из конденсатора и сопротивления (рис. 42, 3, а), подвести переменное напряжение U_{RC} , то оно распределится между участками — между R и C — пропорционально их сопротивлению для данной частоты: R и x_C . В цепи пойдет ток, величина которого по закону Ома определится напряжением U_{RC} и общим сопротивлением z всей цепи. При этом напряжение U_R будет совпадать по фазе с током (рис. 42, 1, а, б, в), а напряжение U_C будет отставать от тока на 90° (рис. 42, 2, а, д, е). Что же касается общего напряжения U_{RC} на всей цепочке, то оно будет представлять собой сумму U_R и U_C . Но не алгебраическую сумму $U_{RC} = U_R + U_C$, а геометрическую $U_{RC} = \sqrt{U_R^2 + U_C^2}$. Если сложить эти напряжения, то окажется, что U_{RC} и I_{RC} (а значит, U_{RC} и U_R) сдвинуты по фазе на некоторый угол, обычно обозначаемый буквой φ . Сдвиг фаз определяется соотношением x_C и R : чем больше x_C по сравнению с R , тем больше угол φ , тем ближе он к 90° .

Напряжения на участках цепи очень удобно складывать с помощью векторной диаграммы. Сумма представляет собой диагональ прямоугольника, образованного векторами U_R и U_C , а угол сдвига фаз φ равен углу между векторами U_R (I_{RC}) и U_{RC} (рис. 42, 3, б, в; 4, а, в, д). Подобным же образом можно найти общее сопротивление цепи z , если сложить построенные в определенном масштабе векторы сопротивления R и емкостного сопротивления x_C для данной частоты (рис. 42, 4, б, з, е).

Мы уже говорили, что напряжения на участках цепи пропорциональны сопротивлениям этих участков R и x_C . Емкостное сопротивление конденсатора x_C , как известно, с уменьше-

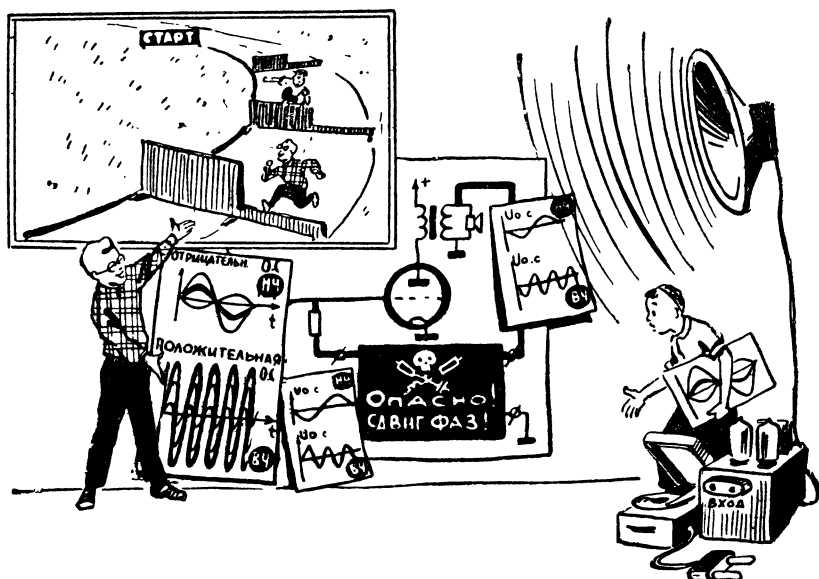


Рис. 43. С изменением частоты меняются фазовые сдвиги в сложных цепях (RC -цепочки, трансформатор и др.), и из-за этого отрицательная связь может превратиться в положительную. Сильная положительная обратная связь может привести к самовозбуждению.

нием частоты возрастает, и вместе с ним возрастает U_C (рис. 30, 10). При этом меняется соотношение между U_R и U_C увеличивается сдвиг фаз между общим током и напряжением (рис. 42, 4).

Если на пути напряжения обратной связи имеется несколько таких цепей, то вместе они могут создать на низших частотах весьма большой сдвиг фаз (вплоть до 180°) и таким образом превратить отрицательную связь в положительную. Подобные сдвиги фаз могут создаваться и другими последовательными и параллельными цепями, содержащими емкость C или индуктивность L (рис. 42, 5). Последняя, кстати, создает сдвиг фаз, при котором ток отстает от напряжения (рис. 42, 5, в, г).

Дополнительные изменяющиеся с частотой сдвиги фаз, возникающие в RC -, RL - и LC -цепях, ограничивают допустимую глубину отрицательной обратной связи (рис. 43). Как правило, в усилителях $НЧ$ глубина обратной связи составляет 5—15 дБ на каскад. Такая величина позволяет в несколько раз снизить нелинейные искажения, значительно уменьшить

выходное сопротивление оконечного каскада, осуществить заметную коррекцию частотной характеристики. Конкретные схемы отрицательной обратной связи вы найдете в усилителях, описанных в этой и двух последующих главах,

Музыка в чемодане

Есть люди, которые предъявляют к звуковоспроизводящей аппаратуре обязательное требование: она должна быть легкой и удобной в переноске. Подобный подход к делу зачастую можно считать вполне правильным. Для многих (особенно для тех, кого годы еще не превратили в неисправимых домоседов) главное достоинство радиолы или магнитофона действительно состоит в том, что их можно взять под мышку и принести на школьный вечер или захватить в гости к товарищу.

К сожалению, в небольших переносных аппаратах трудно добиться высокой верности воспроизведения звука. Но трудно — это еще не значит невозможно. Разумно используя все имеющиеся в нашем арсенале средства, можно и нужно стремиться к тому, чтобы качество звучания переносной аппаратуры было достаточно высоким, чтобы музыка в чемодане была настоящей музыкой.

Сейчас мы познакомимся с несколькими конструкциями и схемами простых переносных радиограммофонов. Основные узлы каждого из них — электропроигрыватель (мотор, диск, звукосниматель), усилитель низкой частоты с громкоговорителями. При желании к этому комплекту можно легко добавить простейший приемник (рис. 68, 9) и таким образом превратить радиограммофон в переносную радиолу.

В радиограммофоне можно использовать любой современный мотор со звукоснимателем. Во всех наших конструкциях используется трехскоростное проигрывающее устройство ЭПУ-5 со звукоснимателем и двигателем ЭДГ-1 (рис. 20, 5). Этот двигатель рассчитан только на напряжение 220 в, а к сети 127 в он подключается через повышающий автотрансформатор. Для этой цели «по совместительству» используется силовой трансформатор (Tr_2 , рис. 44); в блоке питания усилителя двигатель всегда подключен к отводу сетевой обмотки «220 в». В некоторых проигрывателях установлен двигатель ЭДГ-2. Он рассчитан на напряжение 110 в, и в сеть с напряжением 220 в его нужно включать через понижающий трансформатор. Для этого опять-таки используется сетевая обмотка силового трансформатора (рис. 46).

В цепи двигателя имеются три выключателя (рис. 20, 5, е).

Первый из них, BK_1 — это общий выключатель радиограммофона, через который одновременно подается питание на силовой трансформатор и на двигатель. Второй выключатель, BK_2 , замыкает цепь тогда, когда звукоосниматель снят со своей подставки. Выключатель BK_3 — это автомат. Он размыкает цепь, когда кончится пластинка, то есть когда звукоосниматель сойдет с последней звуковой дорожки.

Последовательное соединение выключателей (или других подобных элементов) в автоматике называют схемой «и» — цепь оказывается замкнутой, если замкнуты контакты и первого, и второго, и третьего выключателей. Вот почему двигатель радиограммофона вращается только в том случае, если одновременно замкнуты контакты всех трех наших выключателей: BK_1 , BK_2 , BK_3 . Во многих проигрывателях роль BK_2 и BK_3 выполняет один выключатель. Аналогично BK_2 , он замыкает цепь лишь после того, как звукоосниматель отведен в начальное положение. Этот же выключатель, аналогично BK_3 , размыкает цепь, когда звукоосниматель доходит до конца пластинки.

Мы рассмотрим четыре конструкции радиограммофонов и четыре схемы усилителей *НЧ* для них. При желании эти схемы и конструкции можно комбинировать самым различным образом в зависимости от имеющихся деталей, возможностей выполнять столярные и слесарные работы и, конечно, в зависимости от собственного вкуса.

Главное достоинство первой конструкции радиограммофона (рис. 47, 2, а) — компактность. Но она покупается довольно дорогой ценой: частотная характеристика зажатого со всех сторон громкоговорителя, мягко говоря, весьма далека от идеальной. Громкоговоритель можно крепить к верхней панели, либо к боковым стенкам (рис. 47, 2, б).

Для второй конструкции самыми удобными оказываются громкоговорители с эллиптическим диффузором, в частности ИГД-9. На боковых стенках можно даже установить два-три эллиптических громкоговорителя. Это заметно повышает громкость, немного улучшает качества звучания.

Несколько лучше обстоит дело в третьей конструкции (рис. 47, 2, в), которая напоминает промышленный радиограммофон РГ-3 («Юбилейный»). Здесь в качестве акустического экрана используется съемная крышка ящика. Предполагается, что во время работы эта крышка будет висеть на стене, лучше всего в углу комнаты. Вполне возможно объединить обе конструкции (рис. 47, 2, а, б и рис. 47, 2, в), используя два-три громкоговорителя. Нужно заметить, что в радиограммофоне РГ-3 приняты эффективные меры для улучше-

ния частотной характеристики. Громкоговоритель установлен в закрытой камере с двумя отверстиями: со стороны диффузора и с противоположной стороны.

Несколько увеличив размеры радиограммофона, можно значительно улучшить качество звучания. Именно так и сделано в четвертой конструкции (рис. 47, 2, з). Ее основа — два простеньких акустических агрегата, которые при переноске складываются и образуют упаковочный ящик (чемодан). Внутри него размещается совершенно самостоятельный блок — усилитель с проигрывателем. Такая конструкция позволяет применить два и даже четыре громкоговорителя. В дальнейшем от нее легко перейти к стереофоническому звучанию.

Несколько слов о конструкции самого усилителя. Все его детали, включая детали блока питания, можно разместить на общем шасси (рис. 47, 1, а). В этом случае высота шасси определится силовым трансформатором, а длина — общей компоновкой. Проще всего изготовить угловое шасси; на нем удобно крепить переменные сопротивления. Четырьмя болтами шасси прикрепляется к верхней панели радиограммофона, которую можно изготовить из толстой (5—6 мм) фанеры.

Чтобы облегчить размещение электронной части радиограммофона в ящике, целесообразно отделить блок питания от усилителя и собрать их на отдельных шасси, соединенных тремя или четырьмя проводами (рис. 47, 1, а). Подобное конструктивное решение имеет еще одно достоинство: от входных цепей усилителя отделяется такой сильный источник фона, как силовой трансформатор. Из этих же соображений шасси усилителя нужно располагать так, чтобы входные цепи находились дальше от двигателя и ближе к звукоснимателю.

Иногда удобно отделить от самого усилителя весь блок регулировок: переменные сопротивления регулировки громкости и тембра. Не забудьте, что эти детали, особенно регулятор громкости, страшно «боятся» наводок, так как включены в цепи с низким уровнем сигнала. Поэтому переменные сопротивления должны соединяться с усилителем с помощью экранированного провода. Необходимо также тщательно экранировать провод, идущий от звукоснимателя на вход усилителя (рис. 34).

Если вы не достанете провод в экранированном чулке, то его можно сделать самому (рис. 47, 4, а, б). Для этого поверх изоляции обычного монтажного провода достаточно намотать слой любого тонкого провода, например в эмалевой изоляции (ПЭ). Этот слой и будет играть роль экрана. Его необходимо заземлить с обоих концов, а если экранированная цепь имеет большую длину, то и в середине.

Для размещения и соединения деталей усилителя очень удобно пользоваться монтажными колодками и пластинами (платами). Их также нетрудно изготовить своими силами из трехмиллиметровой фанеры и обычной белой жести.

Рис. 47, 3 иллюстрирует порядок изготовления простейшей монтажной платы. В хорошо обработанной фанерной пластинке прокалывают шилом или ножницами отверстия диаметром 1,5—2,5 мм (рис. 47, 3, а). Затем нарезают из жести лепестки и в них делают надрез (рис. 47, 3, б) или пробивают гвоздем небольшие дырочки, куда могли бы пройти монтажные провода. Кверху лепестки постепенно расширяются, а ширина их средней части должна быть примерно такой же, как и отверстия в фанерной пластинке. Лепестки тонким концом вставляют в эти отверстия и с силой втягивают плоскогубцами. Нужно, чтобы жестяной лепесток врезался в фанеру и закрепился в ней (рис. 47, 3, в). Затем широкую часть лепестка нужно развернуть (рис. 47, 3, г), а узкую подрезать. Чтобы лучше закрепить лепесток, можно сделать возле него еще одно отверстие и туда втянуть тонкий конец лепестка (рис. 47, 3, д).

Целесообразно изготовить отдельную монтажную плату для блока питания (рис. 47, 5, а). На ней удобно будет проложить распайку выводов силового трансформатора Tr_c и разместить детали выпрямителя, например полупроводниковые диоды. На этой плате можно установить также переключатель напряжения, который проще всего сделать в виде трех либо четырех держателей для установки предохранителя (рис. 47, 5, а, в). Не забудьте, что нужно обеспечить свободный доступ к этому переключателю — ведь не очень удобно для смены предохранителя или переключения сетевого напряжения вынимать весь радиogramмофон из ящика. По-видимому, колодку с предохранителями удобнее всего закрепить под самой верхней панелью и сверху закрывать небольшой пластмассовой или фанерной крышечкой (рис. 47, 5, б).

Предлагаемые конструкции можно рассматривать лишь как общие рекомендации. Перед тем как приступить к постройке радиogramмофона, нужно, исходя из выбранного варианта конструкции и имеющихся в вашем распоряжении деталей, составить чертеж, где были бы учтены размеры основных узлов радиogramмофона. Перед этим полезно попробовать (разумеется, на бумаге) несколько различных вариантов компоновки деталей и отобрать лучший из них.

Теперь о схемах (рис. 44, 46, 51, 61). С первой из них мы уже знакомы (рис. 30, 30), и поэтому о ее построении, о назначении отдельных деталей не имеет смысла говорить. Для

питания усилителя используется кенотронный выпрямитель с силовым трансформатором от приемника «Рекорд-61».

Сейчас, пожалуй, стоит отвлечься от наших первых усилительных схем и поговорить более подробно о выпрямителях. Это нужно, чтобы раз и навсегда покончить с проблемой питания, чтобы она в дальнейшем не отвлекала нас, когда мы будем знакомиться с новыми усилителями.

Режим работы усилителя определяется анодным напряжением (табл. 12 и 13), а оно, в свою очередь, зависит от выбранного силового трансформатора. На первых двух схемах указаны режимы ламп для случая, когда в качестве Tr_2 используется силовой трансформатор от приемника «Рекорд-61». Этот трансформатор дает выпрямленное напряжение около 230 в, что позволяет получить выходную мощность до 3—4 вт. Нужно сказать, что такая мощность не всегда нужна. Так, например, если для радиограммофона выбрана первая конструкция (рис. 47, 2, а) и используется один громкоговоритель 1ГД-9, то вполне можно ограничиться выходной мощностью до 1,5 вт. Для этого удобнее всего снизить анодное напряжение, применив трехзвенный фильтр (рис. 48, 2).

Обратите внимание, что напряжение на анод выходной лампы (рис. 46) подается с конденсатора C_7 (аналогично схеме рис. 30, 18). Это сделано для того, чтобы анодный ток лампы не проходил через R_8 и на этом сопротивлении не терялась слишком большая часть выпрямленного напряжения. Такая хитрость позволяет повысить напряжение на анодах, но несколько увеличивает уровень фона — на анод выходной лампы поступает плохо отфильтрованное напряжение.

В том случае, когда от усилителя требуется повышенная выходная мощность (лампа 6П14П может отдать 4—5 вт), анодное и экранное напряжения нужно повысить. Для этого выбирают другой силовой трансформатор и даже применяют другую схему выпрямителя.

Распространенные схемы анодных выпрямителей приведены на рис. 48, 1, а в табл. 14 — данные ряда силовых трансформаторов. В предпоследней колонке этой таблицы указано эффективное значение переменного напряжения (U_{II}) на повышающей обмотке трансформатора (для двухполупериодных — на половине обмотки). Можно считать, что такую же величину будет иметь и выпрямленное напряжение, хотя при достаточно большой емкости первого конденсатора фильтра $C_{\phi 1}$ выпрямленное напряжение может быть на 15—25% выше, чем U_{II} .

Таблица 12

Сдвоенные триоды 6Н2П и 6Н9С

U_B (в)	R_{a1} (Мом)	R_{c2} (Мом)	R_{k1} (ом)	C_{k1} (мкф)	C_{c2} (мкф)	$U_{вых}$ (в)	K_y
180	0,1	0,1	1800	4	0,025	18	40
		0,22	2000	3,5	0,013	25	47
		0,47	2200	3,1	0,006	32	52
		0,22	3000	2,4	0,012	24	53
	0,22	0,47	3500	2,1	0,006	34	59
		1	3900	1,8	0,003	39	63
		0,47	5800	1,3	0,006	30	62
		1	6700	1,1	0,003	39	66
	0,47	2,2	7400	1	0,002	45	68
		0,1	1300	4,6	0,027	43	45
		0,22	1500	4	0,013	57	52
		0,47	1700	3,6	0,006	66	57
300	0,1	0,22	2200	3	0,013	54	59
		0,47	2800	2,3	0,006	69	65
		1	3100	2,1	0,003	79	68
		0,47	4300	1,6	0,006	62	69
	0,22	1	5200	1,3	0,003	77	73
		2,2	5900	1,1	0,002	92	75

Пентод 6Ж3П

U_B (в)	R_{a1} (Мом)	R_{c2} (Мом)	R_{a1} (Мом)	R_{k1} (ком)	C_{a1} (мкф)	C_{k1} (мкф)	C_{c2} (мкф)	$U_{вых}$ (в)	K_y
180	0,1	0,1	0,12	0,8	0,15	14,1	0,21	57	74
		0,22	0,15	0,9	0,126	14	0,012	82	116
		0,47	0,19	1	0,1	12,5	0,006	81	141
		0,22	0,38	1,5	0,09	9,6	0,009	59	130
	0,22	0,47	0,43	1,7	0,08	8,7	0,005	67	171
		1	0,6	1,9	0,066	8,1	0,003	71	200
		0,47	0,9	3,1	0,06	5,7	0,004 ⁵	54	172
		1	1	3,4	0,05	5,4	0,002 ⁸	65	232
	0,47	2,2	1,1	3,6	0,04	3,6	0,001 ⁹	74	272
		0,1	0,20	0,5	0,13	18	0,019	76	109
		0,22	0,24	0,6	0,11	16,4	0,011	103	145
		0,47	0,26	0,7	0,11	15,3	0,006	129	168
300	0,1	0,22	0,42	1	0,1	12,4	0,009	92	164
		0,47	0,5	1	0,098	12	0,007	109	230
		1	0,55	1,1	0,09	11	0,003	122	262
		0,47	1	1,8	0,075	8	0,0045	94	248
	0,22	1	1,1	1,9	0,065	7,6	0,0028	105	318
		2,2	1,2	2,1	0,06	7,3	0,0018	122	371

Режимы выходных ламп

Лампа	Класс усиления	U_{a0} (е)	U_{g0} (е)	U_{cm} (е)	R_k (см) (ом)	$U_{вх,эф}$ (е)	I_{a0} (ма)	I_{g0} (ма)	$R_{a,опт}$ (ком)	$P_{вых}$ (вт)	$K_{нп}$ (%)
6П1П	A	250	250	-12,5	270	8,8	45	3	3,5	4,5	8
6П6С	A	250	250	-12,5	240	9,8	45	4	5	4,5	8
6П6С *	AB ₁	300	275	-19		10	65	14	5	10	4
6П3С	A	250	250	-14	170	10	75	5,4	4,5	6,5	10
6П3С *	AB ₁	360	270		250	20	88	5	4,5	24,5	4
6П3С *	AB ₂	360	270	-22,5		25,5	88	5	1,9	47	5
6П14П	A	150	150		160	2,6	22	2,3	6,3	1,2	11
6П14П	A	200	200		135	3,5	34	4	5,3	2,8	10
6П14П	A	255	235		120	4	43	4,5	6	4,6	10
6П14П	A	250	210		140	3,8	34	3,2	6,5	3,6	10
6П14П *	AB ₁	250	250		120	7,6	58	6,5	4	11	3,3
6П14П *	B ₁	250	250	-11		7,8	10	2	4	12	3,3

* Для двухтактных каскадов (отмечены звездочкой) значения I_{a0} , I_{g0} и $R_{вых}$ указаны для всего каскада, то есть для двух ламп, а значения всех напряжений и $R_{a,опт}$ — для одной лампы.

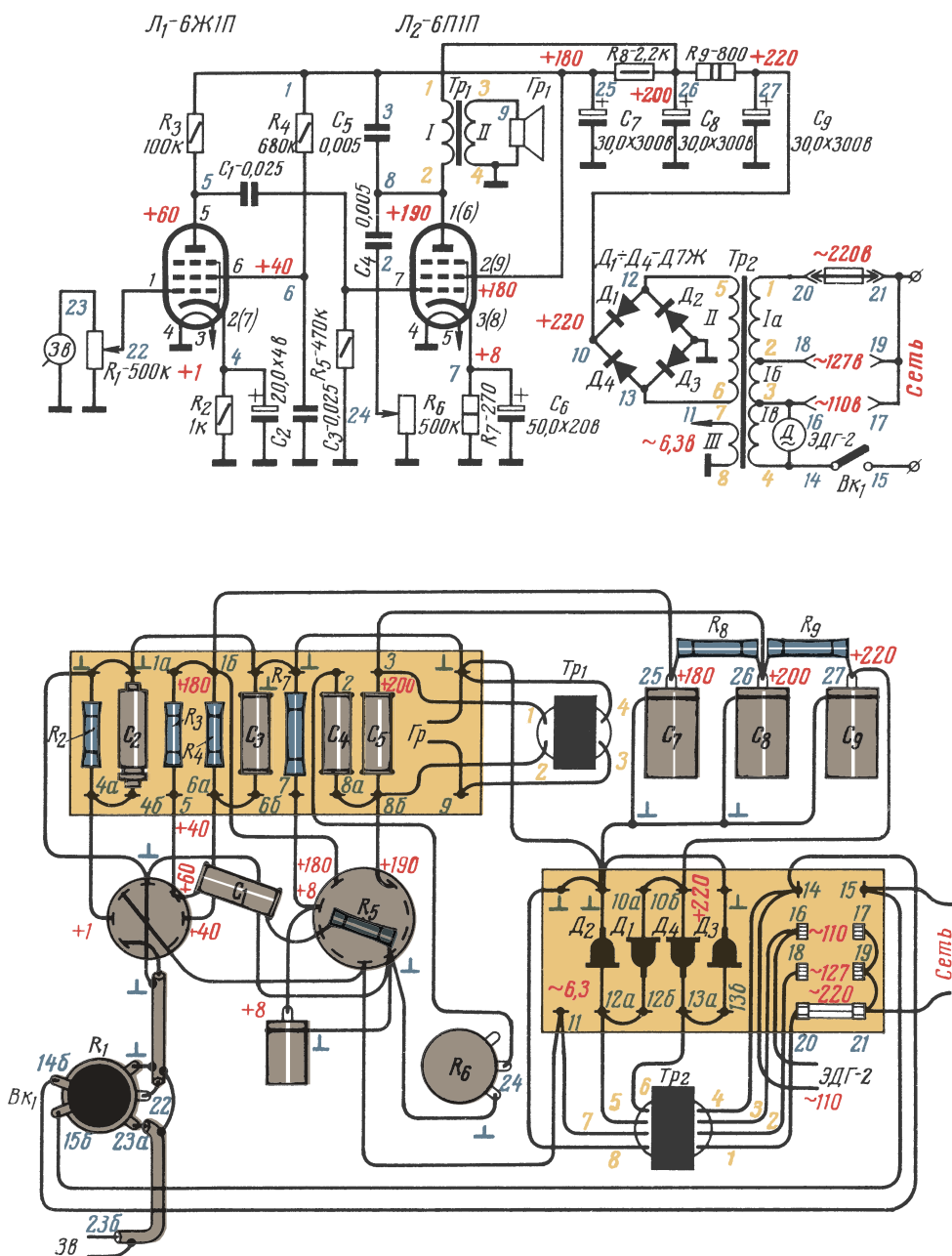


Рис. 44. Простой двухламповый усилитель.

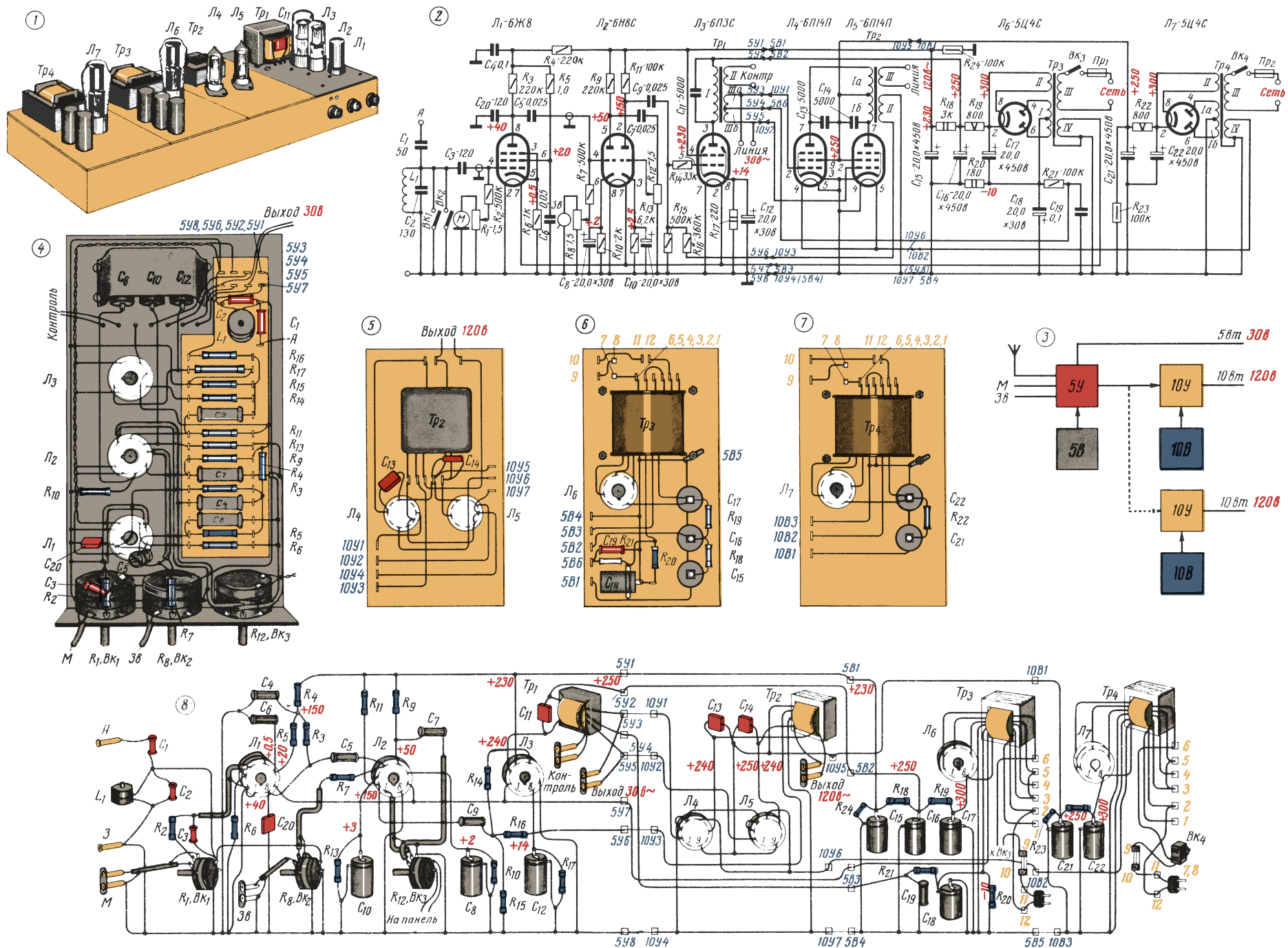


Рис. 45. Простой школьный радиоузел.

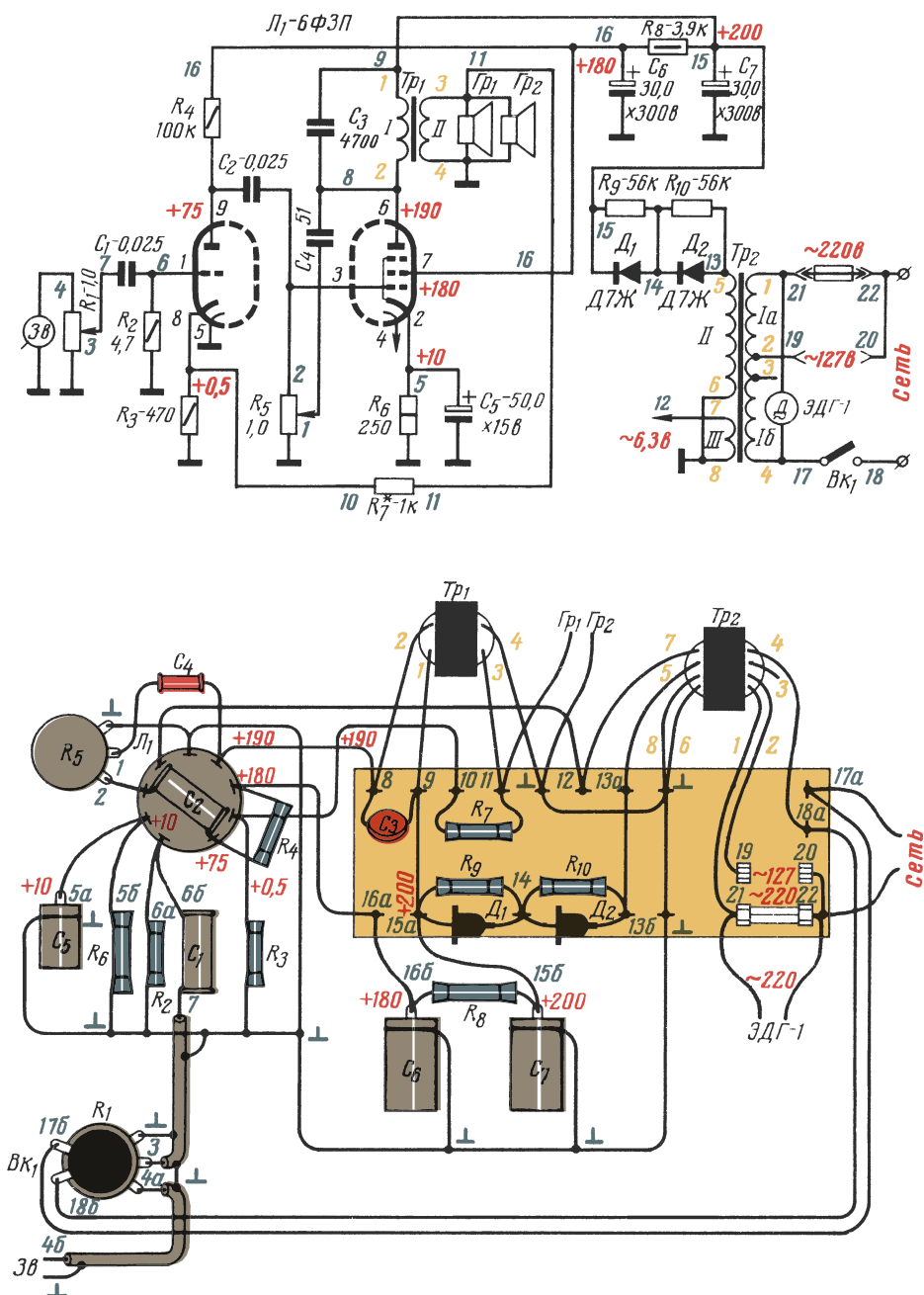


Рис. 46. Одноламповый усилитель.

Силовые трансформаторы

Название приемника или радиолы	Мощность (вт)	Сердечник	Сетевая обмотка		Повышающая обмотка			Накальные обмотки	
			схема (рис. 38,4)	число витков, диаметр провода (мм)	схема (рис. 38,4)	число витков, диаметр про- вода (мм)	$U_{\text{Пэф}}$ (в)	число витков, диаметр провода (мм)	
„Стрела“	40	Ш-22 × 32	в	763 0,31 + 557 0,2	д	1140 0,2	190	44 1,0	
„АРЗ-54“	40	Ш-24 × 30	в	693 0,27 + 520 0,23	д	1330 0,15	210	40 0,8 40 0,51	
„Рекорд-53М“	50		б	(665 + 72 + 583) 0,25	д	1250 0,15	200	42 0,93 42 0,51	
„Рекорд-61“	70		в	(700 + 550) 0,25	д	1380 0,16	230	40 0,96	
„Электросигнал-2“	70	Ш-32 × 40	г	2 × (400 + 60) 0,33	е	2 × 865 0,18	220	26 1,0 20 0,93	
„Урал-57“	70	Ш-32 × 40	г	2 × (400 + 60) 0,31	е	2 × 1150 0,2	290	25 1,0 20 0,93	
„Урал (1965 г.)“	60		г	2 × (600 + 93) 0,31	д	1350 0,2	230	39 1,0 2 × 19 0,64	
„Байкал“	70		г	2 × (588 + 90) 0,31	д	1368 0,2	230	38 1,0 38 0,51	
„Латвия“	75	УШ-26 × 26	г	2 × (542 + 83) 0,31	д	1290 0,2	240	35 1,0 35 0,41	
„Дружба“, „Люкс“	100	УШ-26 × 45	г	2 × (325 + 50) 0,47	д	750 0,27	250	20 1,0 2 × 10 1,0	
„Мир“	160	Ш-40 × 60	г	2 × (197 + 31) 0,64	е	2 × 550 0,31	290	2 × 6 1,5 9,5 1,5	
„Север“, „Луч“, „Зенит“ (телеви- зор)	200	Ш-40 × 70	б	(183 + 27) 0,95 + + 155 0,74	е	2 × 655 0,27	360	11 1,95 11 0,8 9 1,5	
„КВН-49“ (телеви- зор)	200	Ш-40 × 70	б	(155 + 28 1,0 + 183) 0,8	е	2 × 600 0,29	330	11 2,1 11 0,8 9 1,25	

Необходимо учитывать и то, что некоторая часть выпрямленного напряжения теряется в фильтре. Грубо говоря, напряжение $U'_в$ на выходе выпрямителя (на входе фильтра) должно быть примерно на 10% больше, чем требуется для усилителя. Для переносных радиограммофонов имеет смысл применять только первые четыре трансформатора. Остальные пригодны для установок большей мощности, в том числе для радиоузлов.

Все схемы выпрямителей (рис. 48, 1) можно разделить на три группы: однополупериодные (*а, б, в,*), двухполупериодные (*г, е*) и мостовые (*д*). Первые работают через такт, то есть используют только один из двух полупериодов переменного напряжения (рис. 30, 16) и дают ток с частотой пульсаций 50 гц. По возможности, следует отдавать предпочтение двухполупериодным и мостовым схемам (рис. 30, 17), где используются оба полупериода и частота пульсаций составляет уже 100 гц. Это облегчает фильтрацию пульсирующего напряжения: чем выше частота, тем меньше может быть емкость конденсаторов фильтра $C_{\phi 1}, C_{\phi 2}, C_{\phi 3}$, замыкающих накоротко переменную составляющую этого напряжения. Кроме того, однополупериодная схема при прочих равных условиях дает более низкое выпрямленное напряжение.

Т а б л и ц а 15

Плоскостные полупроводниковые диоды

Тип диода	Д7Г	Д7Д	Д7Е	Д7Ж	Д1003А	Д202	Д208	Д209	Д210	Д211
Выпрямленный ток (<i>ма</i>)	300	300	300	300	300	400	100	100	100	100
Обратное напряжение (<i>в</i>)	200	300	350	400	500	100	300	400	500	600

Для двухполупериодного выпрямителя нужен трансформатор с двумя повышающими обмотками IIа, IIб, точнее, с одной обмоткой, имеющей удвоенное число витков и вывод от средней точки. Для выполнения мостовой схемы нужна одна повышающая обмотка, но зато необходимо иметь четыре вентиля. В последние годы мостовая схема применяется наиболее широко, так как появилась возможность использовать в выпрямителе плоскостные полупроводниковые диоды (табл. 15), а также типовые селеновые вентили (АВС), собранные для мостовой схемы и спрессованные в пластмассу [9].

При выборе схем и деталей выпрямителя можно вести себя довольно смело. Следует учитывать лишь два главных фактора: постоянное напряжение U_v , которое нужно подвести к усилителю, и общий анодно-экранный ток I_v , который он потребляет. Величина тока лимитируется самим вентилям, а также диаметром провода повышающей обмотки: чем толще провод, тем больший ток можно через него пропустить, не опасаясь перегрева. Ориентировочное значение допустимого тока I_v приводится в таблице 11. В двухполупериодных и мостовых схемах можно получить I_v в два раза больший, чем это указано для одного вентиля (табл. 15, рис. 80).

Наиболее опасно для вентиля обратное напряжение $U_{обр.}$, которое действует в тот момент, когда вентиль не пропускает тока. Это напряжение представляет собой сумму постоянного U_v и амплитуды переменного $U_{II \text{ ампл.}}$ напряжений. Поэтому вентиль выбирают с большим запасом — он должен выдерживать обратное напряжение, которое значительно превышает выпрямленное. В однополупериодных и двухполупериодных схемах допустимая для данного вентиля величина $U_{обр.}$ (табл. 15, рис. 80) должна быть в три раза больше, а в мостовых в полтора раза больше, чем выпрямленное напряжение. И в тех случаях, когда один вентиль может не выдержать подводимого напряжения, соединяют последовательно два вентиля, например два полупроводниковых диода. При этом вентили (диоды) шунтируют одинаковыми сопротивлениями, чтобы напряжение всегда распределялось между ними поровну (рис. 48, 1, а, г).

В заключение поясним одну особенность кенотронных выпрямителей. Для накала кенотронов обычно используют отдельную обмотку (IV) силового трансформатора, тщательно изолированную от других обмоток и от корпуса (рис. 48, 1, б, г). Необходимость тщательной изоляции связана с тем, что на катоде действует «плюс» довольно большого напряжения (200—300 в), и нельзя допустить, чтобы произошел пробой (короткое замыкание) катода через нить накала и накальную обмотку на корпус. В некоторых лампах (5Ц4С) катод соединен с нитью накала внутри баллона, и здесь заземлить нить накала это значит, заземлить (замкнуть накоротко) «плюсы» выпрямителя. В то же время есть лампы (6Ц5С, 6Ц4П) с хорошей изоляцией между катодом и подогревателем. При анодном напряжении до 400 в накал этих ламп можно питать от общей накальной обмотки, которая всегда заземлена (рис. 48, 1, в).

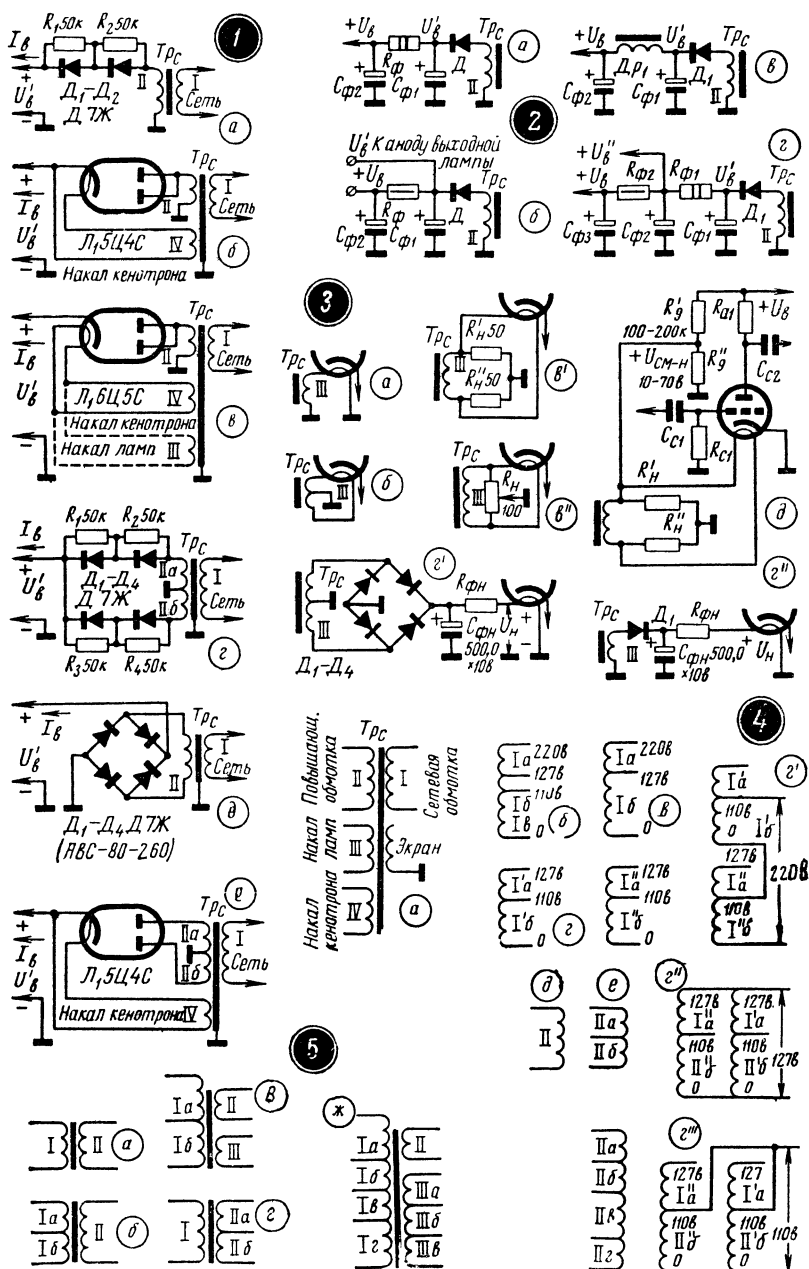


Рис. 48. Выпрямители, фильтры, силовые и выходные трансформаторы.

На рис. 48, 2 приведены схемы фильтров выпрямителя. Наилучшую фильтрацию выпрямленного напряжения дают фильтры с дросселем Dr_{ϕ} (рис. 48, 2, в). Дроссель оказывает довольно большое сопротивление переменной составляющей выпрямленного тока и почти беспрепятственно пропускает постоянную составляющую. Если общий выпрямленный ток I_{ϕ} не превышает 40—60 ма, то дроссель можно намотать проводом ПЭ-0,16 (0,2) и разместить на сердечнике сечением 3—5 см². При токе 80—120 ма сечение сердечника и диаметр провода целесообразно увеличить примерно в полтора раза. Намотка во всех случаях ведется внавал, до полного заполнения каркаса. Сердечник собирается встык с использованием тонкой бумажной прокладки (рис. 49). Вместо дросселя любители иногда включают выходные трансформаторы, точнее, их первичную обмотку.

В усилителях, где одно из главных требований — высокое качество звучания, не стоит экономить на фильтре выпрямителя. Не забудьте, что заметный фон резко ухудшает важнейшую характеристику воспроизводимого звука — динамический диапазон громкости, не говоря уже о том, что непрерывное монотонное гудение просто-напросто действует на нервы. При конструировании и налаживании усилителей следует стремиться к тому, чтобы на слух трудно было установить, включен усилитель или нет (при введенном регуляторе громкости). Только в этом случае можно будет сказать, что усилитель работает без фона. Снижению фона уделяют особое внимание в усилителях, хорошо воспроизводящих низшие частоты.

Источником фона могут быть также накальные цепи ламп. Нить накала выбрасывает электроны, часть которых попадает на катод и создает в его цепи переменный ток с частотой 50 гц.

В итоге переменное напряжение накала попадает в катодную цепь лампы и таким образом действует между сеткой и катодом. Одна из мер борьбы с этим источником фона — обязательное заземление одного провода накальной цепи (рис. 48, 3, а). Еще лучшие результаты может дать заземление средней точки накальной обмотки (рис. 48, 3, б). Если обмотка не имеет средней точки, то ее можно создать искусственно (рис. 48, 3, в', в'') с помощью низкоомного потенциометра либо двух постоянных сопротивлений по 30—50 ом. Весьма эффективная мера — питание нити накала выпрямленным напряжением (рис. 48, 3, г', г''). Этот довольно дорогой метод снижения фона имеет смысл применять только для питания нити накала первого каскада усилителя с очень высокой чувствительностью (несколько милливольт). Напряжение накала

ламп подгоняют с помощью сопротивления $R_{\text{ф.н}}$. Желательно для накального выпрямителя использовать отдельную обмотку с повышенным напряжением 10—20 в. Чтобы снизить напряжение накала до 6,3 в, нужно увеличить $R_{\text{ф.н}}$. При этом не забудьте подобрать конденсатор $C_{\text{ф.н}}$ с рабочим напряжением в 15—30 в.

Кое-что может дать положительное смещение на нить накала первой лампы (рис. 48, 3, д). В этом случае на корпусе, а значит, и на управляющей сетке появляется значительный «минус» относительно нити накала и лампа оказывается запертой для накального переменного напряжения, которое «нахально лезет» на сетку.

В заключение еще раз напоминаем, что одна из главных причин фона — это наводки в сеточных цепях ламп первого каскада. Поэтому все эти цепи должны быть самым тщательным образом экранированы, а экраны соединены с корпусом усилителя (рис. 34).

После того как мы выяснили, чем и как нужно «кормить» усилитель, вернемся к рассмотрению практических схем радиодиаграфмофонов.

В схеме рис. 44 предполагается использование выходного трансформатора от радиолы «Рекорд-61». Он рассчитан на подключение двух громкоговорителей 1ГД-9 к лампе 6П14П. Но поскольку оптимальное сопротивление нагрузки для этой лампы примерно такое же, как и для 6П1П (рис. 80), мы применили трансформатор без переделки. Вообще же при выборе готового выходного трансформатора (табл. 16, рис. 48, 5) нужно учитывать три фактора. Во-первых, расчетная мощность трансформатора не должна быть меньше выходной мощности усилителя. Во-вторых, первичная обмотка должна иметь достаточную индуктивность. И, наконец, третье: необходим такой коэффициент трансформации, чтобы сопротивление нагрузки, пересчитанное в первичную обмотку, соответствовало оптимальному сопротивлению, рекомендованному для данной лампы.

Иногда нужно изменить коэффициент трансформации, и для этого проще всего увеличить или уменьшить число витков вторичной обмотки. При расчете данных новой обмотки достаточно знать (рис. 49) оптимальное сопротивление нагрузки $R_{\text{а опт}}$, сопротивление звуковой катушки $R_{\text{зв}}$ и данные трансформатора до переделки. На рис. 50 показана зависимость выходной мощности и $K_{\text{н.н}}$ от сопротивления нагрузки, а значит, и от коэффициента трансформации n . Обычно изменение коэффициента трансформации n на несколько процентов не

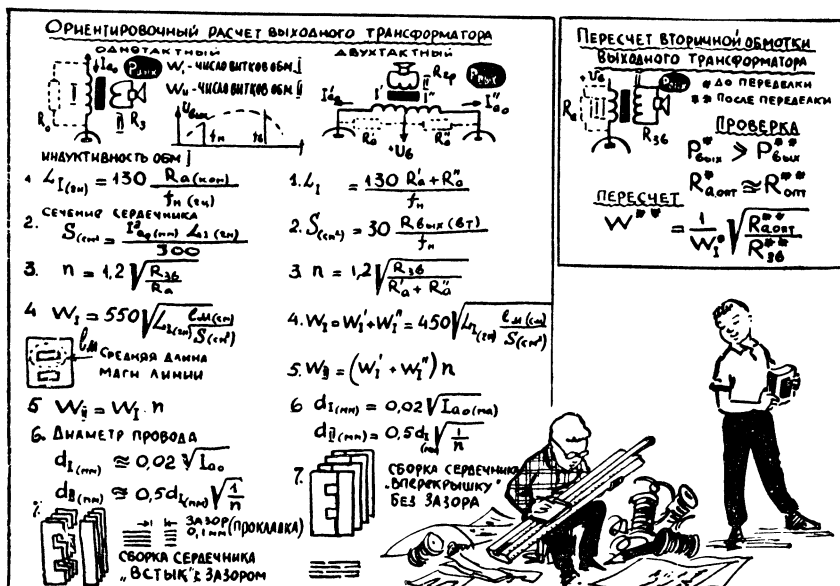


Рис. 49. По данным выходного каскада усилителя и громкоговорителя можно рассчитать выходной трансформатор, проверить пригодность готового и, в случае необходимости, подогнать его, изменив данные вторичной обмотки.

слишком сильно нарушает работу выходного каскада. В то же время изменение n более чем на 10—15% может привести к заметному снижению мощности и к росту нелинейных искажений.

Сборка сердечника выходного трансформатора производится встык, причем с использованием тонкой (0,1—0,15 мм) бумажной прокладки (рис. 49). Эта мера нужна для того, чтобы не допустить магнитного насыщения стального сердечника.

Постоянный ток I_{a0} выходной лампы, проходя по первичной обмотке выходного трансформатора, сильно намагничивает сердечник и может довести его до такого состояния, когда все элементарные магнитики повернутся вдоль магнитного поля. Это и есть магнитное насыщение — тот «потолок», выше которого магнитное поле подняться не может. Для переменной составляющей анодного тока насыщение сердечника — это самая настоящая катастрофа. Ведь переменная составляющая $I_{a\omega}$ должна навести ток во вторичной обмотке. Это

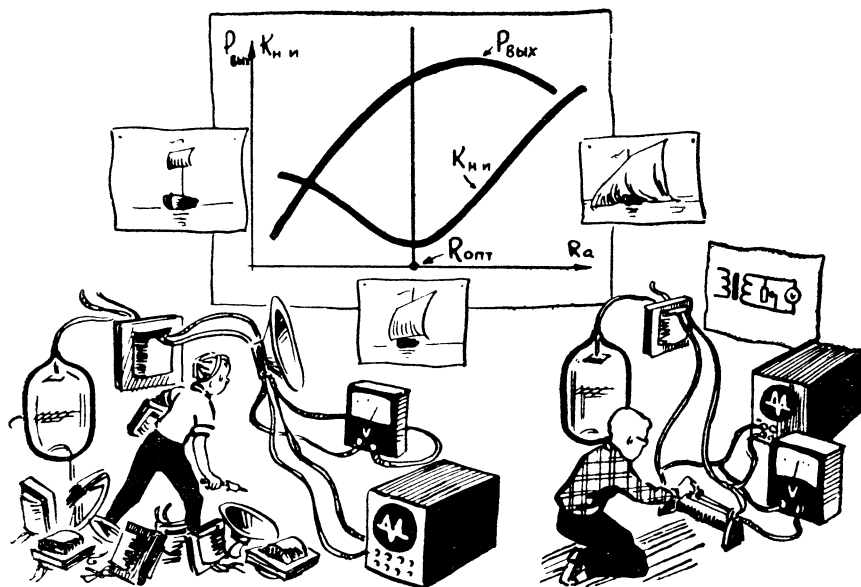


Рис. 50. Меняя сопротивление во вторичной обмотке выходного трансформатора (эквивалент громкоговорителя) и добиваясь максимальной мощности при минимальных искажениях, можно определить оптимальное сопротивление анодной нагрузки.

может произойти только при изменении общего для обеих обмоток магнитного поля — такова сущность индукции (наведения) переменного тока из одной обмотки трансформатора в другую. Ну, а как может изменяться магнитное поле насыщенного сердечника? Оно может легко уменьшаться и почти не может увеличиваться — насыщение! Поэтому форма тока во вторичной обмотке окажется сильно искаженной — в те полупериоды, когда сердечник попадает в область насыщения, ток значительно меньше, чем мог бы быть.

Прокладка, которую мы вводим в стальную сердечник выходного трансформатора, разрывает его магнитную цепь, уменьшает намагниченность (это равносильно уменьшению I_{a0}) и предохраняет от попадания в область магнитного насыщения. С той же целью вводится прокладка и в дроссель фильтра, индуктивное сопротивление которого при насыщении сердечника резко уменьшается. Кстати говоря, в обоих случаях введение зазора требует увеличения объема сердечника:

он мог бы быть значительно меньше, если бы по первичной обмотке не проходил постоянный ток.

Усилитель, выполненный по схеме рис. 46, кажется намного проще предыдущего, хотя в принципе они мало различаются. Сравнительная простота конструкции второго усилителя связана с использованием новой комбинированной лампы — триод-пентода 6ФЗП. Эта лампа специально предназначена для двухкаскадных усилителей НЧ небольшой мощности. Ее триодная часть используется в усилителе напряжения, а пентодная — в усилителе мощности.

В усилителе имеются две цепи обратной связи. Одна из них охватывает весь усилитель — напряжение $U_{o.c}$ (рис. 39) подается со вторичной обмотки выходного трансформатора в сеточную цепь первого каскада. Кстати, отрицательное смещение — 1,5 в на сетке лампы создается на большом сопротивлении R_2 за счет небольшого сеточного тока (рис. 30, 22). Глубину обратной связи устанавливают при налаживании усилителя подбором сопротивлений делителя $R_3 R_7$.

Вторая цепь обратной связи (через конденсатор C_4) служит для регулировки тембра. Когда движок регулятора тембра R_5 (это сопротивление одновременно является утечкой сетки) находится в крайнем верхнем положении, частотная характеристика оказывается заваленной в области высших частот — именно в этой части диапазона конденсатор обладает сравнительно небольшим сопротивлением и создает сильную отрицательную обратную связь. По мере того как движок R_5 опускается вниз, обратная связь становится слабее и завал частотной характеристики исчезает.

В усилителе установлен силовой и выходной трансформаторы от приемника «Рекорд-61».

Теперь перейдем к более совершенным усилителям, схемы которых приведены на рис. 51 и 61. Прежде всего заметим, что в каждом из них имеется два каскада усиления напряжения, которые собраны на двойном триоде 6Н2П (L_1). Каждый из них усиливает напряжение больше чем в 30 раз (почти на 30 дБ), и, таким образом, общий коэффициент усиления составляет 1000 (около 70 дБ). Это почти в 10 раз больше, чем давал пентод 6Ж1П в схеме рис. 44. Значительный запас усиления позволяет ввести довольно глубокую отрицательную обратную связь и с ее помощью значительно снизить нелинейные искажения и улучшить частотную характеристику. В этих усилителях $K_{н.и}$ при номинальной мощности 4 вт не превышает 3—4%, в то время как в предыдущей схеме он при такой же мощности составил бы 7—8%. Здесь уместно

обратить внимание на то, что с увеличением мощности $K_{н.и}$ усилителя и громкоговорителя всегда растет. Поэтому можно несколько снизить $K_{н.и}$, если уменьшить мощность, отбираемую от выходной лампы, или мощность, подводимую к громкоговорителю. И наоборот, перегрузив усилитель и громкоговоритель, вы резко увеличите $K_{н.и}$.

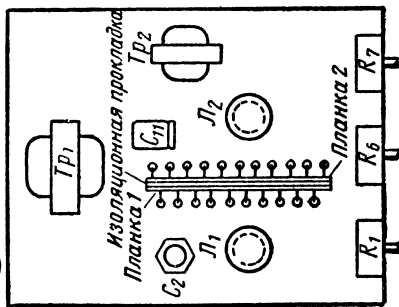
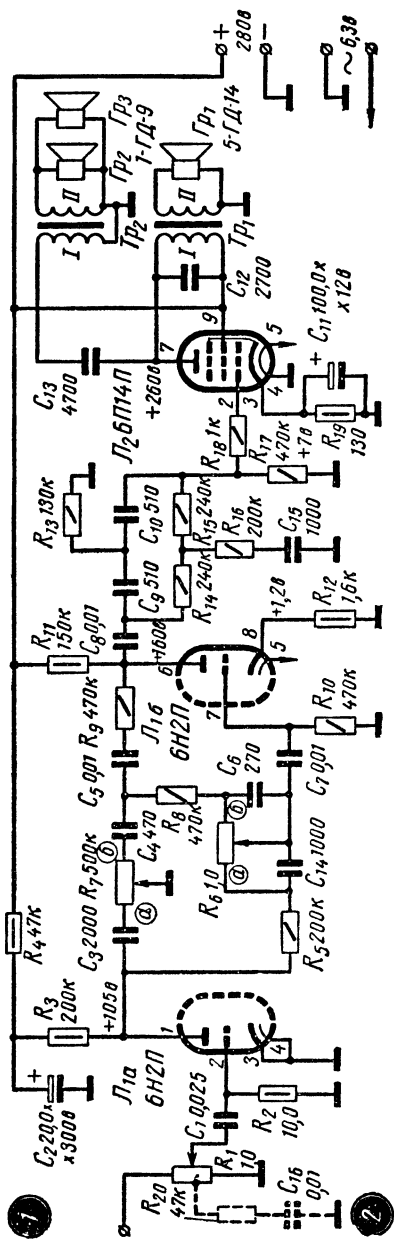
Выходная мощность усилителя (она же является входной мощностью громкоговорителя) непосредственно зависит от уровня входного сигнала. Таким образом, ключ к управлению режимом выходного каскада в буквальном смысле слова находится в ваших руках. Поворотом регулятора громкости вы можете чрезмерно увеличить сигнал на сетке выходного каскада, ввести этот каскад в область перегрузки и резко повысить нелинейные искажения. Обычно усилитель рассчитывают так, чтобы он не мог зайти слишком далеко в область перегрузки. И если окажется, что переменное напряжение на сетке выходной лампы после усиления получится слишком большим, то от избыточного усиления легко избавляются (например, введением отрицательной обратной связи).

Запас усиления, который дал нам двухкаскадный усилитель напряжения, позволяет применить эффективные схемы регулятора тембра. Один из них (схема рис. 61, аналогичная схеме рис. 35, 5) на частотах 100 гц и 10 кГц обеспечивает глубину регулировки частотной характеристики на $\pm 20(25)$ дб. Этот регулятор благодаря своей эффективности и сравнительной простоте получил очень широкое распространение.

Второй регулятор (схема рис. 51, аналогичная схеме рис. 35, 6) на частоте 60 гц регулирует частотную характеристику в пределах от +30 до -20 дб (то есть на 50 дб), а на частоте 8 кГц — в пределах от +15 до -20 дб. Возможность создавать значительный подъем частотной характеристики особенно важна для переносных радиограммофонов, где из-за небольших размеров акустического агрегата заметно ослабляется воспроизведение низших частот.

В обеих схемах усилителей имеется несколько цепей обратной связи. В первых каскадах для этой цели служат незашунтированные конденсаторами сопротивления в катодных цепях (рис. 39, 2). Для того чтобы охватить обратной связью главный источник искажений — выходной каскад, используется переменное напряжение, действующее на вторичной обмотке выходного трансформатора. Оно подается на катодную, то есть в сеточную цепь предоконечного каскада.

В усилителе по схеме рис. 51 в цепь обратной связи включены элементы регуляторов тембра. Особенностью этой схемы



3

Планка 1
Ползунок

Планка 2

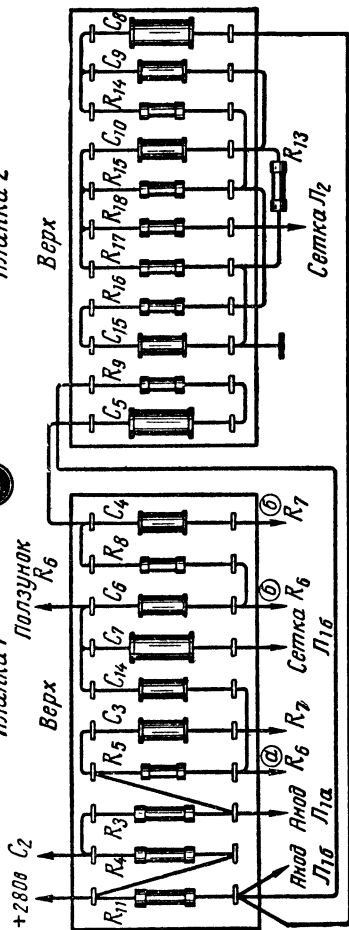


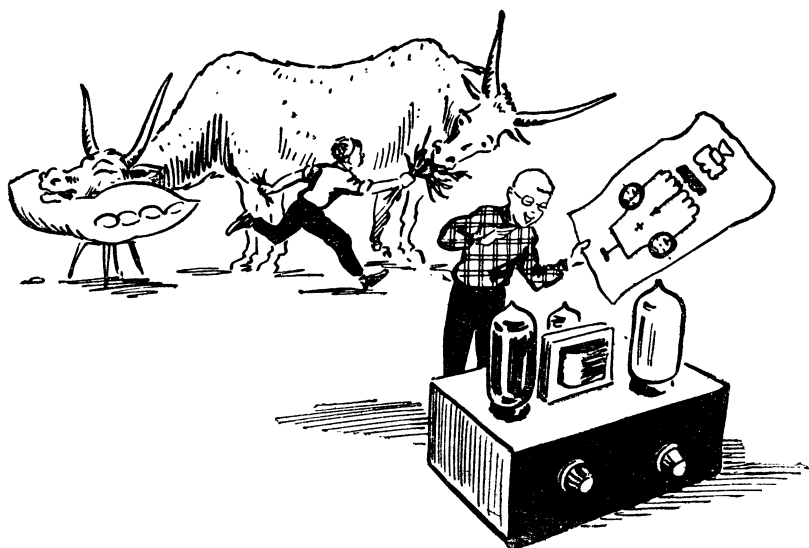
Рис. 51. Двухламповый трехкаскадный усилитель с Т-образными фильтрами коррекции.

является использование нескольких громкоговорителей — двух высокочастотных 1ГД-9 и низкочастотного 5ГД-14 (табл. 8). Таким образом получается уже довольно сложный акустический агрегат, для которого можно применить четвертую конструкцию радиогаммофона (рис. 44). Усилитель, конечно, не может полностью «накормить» все громкоговорители, и они работают с недогрузкой. Это несколько не уменьшает излучаемой звуковой мощности, но зато заметно снижает искажения.

Громкоговорители разделены на две группы: высокочастотную и низкочастотную, причем каждая группа подключается к аноду выходной лампы через собственный выходной трансформатор. Низкочастотный трансформатор Tr_1 включен в анодную цепь лампы, как обычно, а высокочастотный Tr_2 подключается через конденсатор C_{13} сравнительно небольшой емкости. Конденсатор C_{13} не пропускает к Tr_2 низшие частоты — они все равно плохо воспроизводятся громкоговорителями 1ГД-9. Поскольку Tr_2 избавлен от низших частот, его первичная обмотка имеет небольшую индуктивность (рис. 49). В то же время благодаря небольшим габаритам Tr_2 имеет малую индуктивность рассеяния L_p , а это очень важно для хорошего воспроизведения высших частот. Трансформатор Tr_2 подключен к аноду через конденсатор, и по его первичной обмотке не проходит постоянный ток. Поэтому в трансформаторе Tr_2 применен небольшой сердечник, собранный без зазора (сборка в стык). Оба трансформатора взяты от приемника «Октава» (табл. 16), причем число витков вторичной обмотки Tr_1 уменьшено до 65 (провод ПЭЛ-0,64).

В блоке питания третьего и четвертого усилителей используются силовые трансформаторы от приемника «Байкал» и дроссели, намотанные проводом ПЭ-0,15 на сердечнике III 18×20 .

Все усилители, с которыми мы познакомились, относятся к группе однотактных. Смысл этого слова станет понятным, когда мы узнаем, как работают представители другой группы — двухтактные усилители.



Глава IV

ДВУХТАКТНЫЕ УСИЛИТЕЛИ

До сих пор при выборе схемы и конструкции усилителя низкой частоты мы обращали главное внимание на то, чтобы он усиливал электрический сигнал с минимальными искажениями. Это требование будет оставаться главным и в дальнейшем, когда мы займемся конструированием сравнительно мощных усилителей, например для радиоузлов. Однако по мере увеличения выходной мощности все большее значение приобретает еще один показатель работы усилителя — его к. п. д.

Этот коэффициент говорит о том, насколько продуктивно усилитель использует электроэнергию для создания мощной копии сигнала. Так, например, если к. п. д. равен 50%, то это значит, что только половина потребляемой энергии превращается в мощную копию сигнала, а вторая половина безвозвратно теряется в различных цепях усилителя, в итоге превращаясь в тепло.

Чем меньше к. п. д., тем большую мощность нужно подвести к усилителю для создания каждого ватта выходной мощности. В нашем примере (к. п. д. = 50%) на каждый ватт

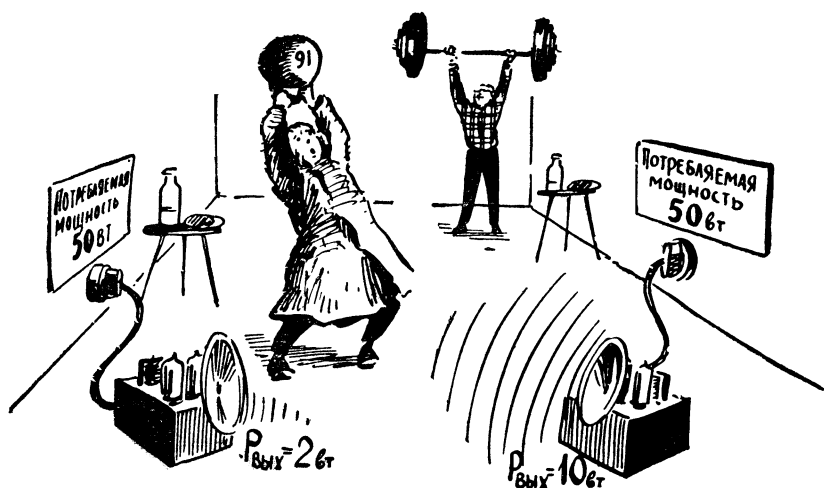


Рис. 52. Чем выше к. п. д. усилителя, тем больше выходная мощность при неизменной потребляемой мощности.

выходной мощности расходовалось 2 вт. При к. п. д. = 25% этот расход увеличивается уже до 4 вт, а потери возрастают до 3 вт. Ясно, что с увеличением мощности усилителя пропорционально возрастает и мощность потерь. Вот почему борьба за высокий к. п. д. приобретает особое значение при разработке мощных усилителей. Важно также повышать к. п. д. и в электронных устройствах небольшой мощности, если они выпускаются большим тиражом. Так, например, если всего на 10% уменьшить мощность, потребляемую каждым телевизором, то в целом по стране это даст гигантскую экономию электроэнергии — примерно 10 миллионов рублей в год! Этой суммы хватит на то, чтобы построить благоустроенные квартиры на 1000—1500 человек.

Наряду с экономией энергии повышение к. п. д. имеет еще одно важное достоинство. Уменьшается потребляемая мощность, и вместе с этим упрощается устройство анодного выпрямителя, фильтров, силового трансформатора. Для радиолюбителя это может иметь первостепенное значение. Так, например, если в вашем распоряжении есть силовой трансформатор мощностью 60 вт, то с его помощью можно питать усилитель мощностью 15 вт, если его к. п. д. составляет 25%, или усилитель мощностью 30 вт с к. п. д. = 50%. Иными словами, при ограниченной потребляемой мощности выходная мощность усилителя будет тем больше, чем экономнее мы научим-

ся расходовать энергию, чем более высокий к. п. д. сумеем получить (рис. 52).

В усилителях НЧ главная арена борьбы за повышение к. п. д. — это анодные цепи ламп выходного каскада. Уменьшить мощность, потребляемую накальными цепями, мы не можем: для данного типа лампы напряжение и ток накала ни при каких обстоятельствах уменьшать нельзя. Экономить энергию, потребляемую в анодных и экранированных цепях усилителя напряжения, не имеет особого смысла: на долю этих каскадов приходится сравнительно небольшая часть общего анодного тока, а значит, и небольшая часть мощности выпрямителя. Таким образом, остается единственная возможность заметно повысить к. п. д. всего усилителя — нужно уменьшить мощность, потребляемую в анодной цепи выходной лампы, точнее, повысить соотношение между выходной мощностью и потребляемой. Сейчас нам предстоит выяснить, какие существуют пути для того, чтобы улучшить это соотношение, и в какой степени повышение к. п. д. повлечет за собой рост (а может быть, и уменьшение?) искажений сигнала в выходном каскаде.

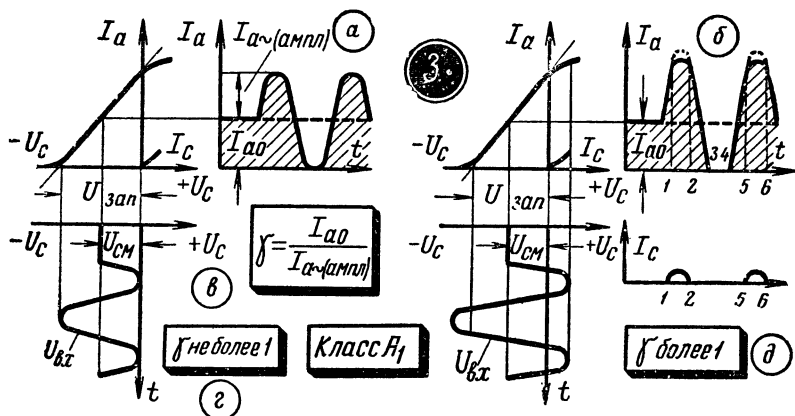
А, В и АВ с единицами и двойками

В этой странной, зашифрованной записи скрыт секрет повышения к. п. д. усилителя. Ключ к шифру можно узнать, познакомявшись с работой усилительного каскада, с теми событиями, которые происходят при изменении анодной нагрузки, смещения, напряжения сигнала, анодного и экранного напряжения — одним словом, при изменении режима лампы.

Еще раз нарисуем упрощенную схему выходного каскада и запишем, чему равна его выходная мощность $P_{\text{вых}}$ и мощность, потребляемая в анодной цепи P_{a0} (рис. 53, *1, д, е*). Теперь прямо в «лоб» начнем атаку на к. п. д. — попробуем увеличить полезную мощность, повышая переменное напряжение $U_{a\sim}$ и переменную составляющую анодного тока $I_{a\sim}$.

Если увеличить сопротивление нагрузки R_a , а это несложно сделать, изменив коэффициент трансформации Tr_v (рис. 49), то одновременно возрастет и напряжение $U_{a\sim}$ (закон Ома: $U = IR$). Казалось бы, найден путь повышения выходной мощности $P_{\text{вых}}$. Но, к сожалению, по этому пути мы далеко не уйдем.

Переменное напряжение на нагрузке U_n , складываясь с постоянным анодным напряжением U_{a0} , определяет напряжение на аноде лампы U_a . Во время положительных



ТОКА.

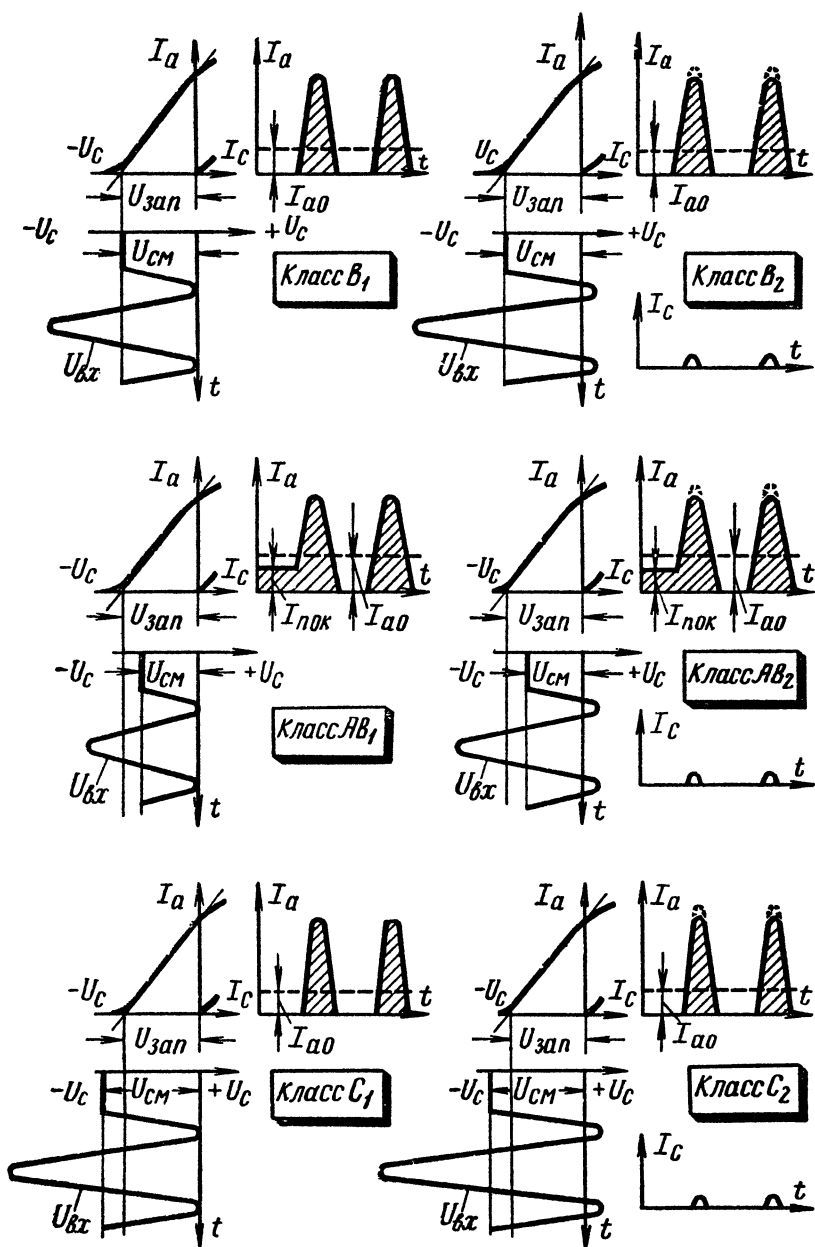


Рис. 54. Классы усиления АВ, В и С (буквы латинские).

полупериодов результирующее напряжение на аноде равно сумме U_{a0} и $U_{a\sim}$, а во время отрицательных полупериодов — их разности (рис. 53, 2).

Поэтому вместе с напряжением на нагрузке U_n растет максимальное напряжение на аноде ($U_{\max} = U_{a0} + U_n$ (ампл)) и уменьшается минимальное напряжение ($U_{\min} = U_{a0} - U_n$ (ампл)). Если в погоне за большой мощностью увеличить U_n до такой степени, чтобы оно стало больше чем U_{a0} , то в некоторые моменты времени напряжение на аноде окажется отрицательным (рис. 53, 2, б, интервалы 1—2 и 3—4). При этом, естественно, и анодный ток станет равным нулю: при отрицательном напряжении на аноде он не притягивает электроны и они летят на управляющую, а в тетроде — на экранную сетку. Прекращение анодного тока, пусть даже кратковременное, — это не что иное, как искажение формы сигнала, а его мы допустить не можем. Таким образом, и устанавливается предел повышения напряжения на нагрузке U_n — оно не может быть больше чем U_{a0} . Об этом можно сказать и иначе, если ввести коэффициент использования анодного напряжения ξ . Искривлений кривой тока можно избежать, если коэффициент ξ будет меньше единицы (рис. 53, 2, в, г).

Потерпев неудачу с увеличением U_n , попробуем подступиться к задаче с другой стороны — увеличим переменную составляющую анодного тока $I_{a\sim}$. Сделать это довольно просто — достаточно увеличить переменное напряжение на сетке $U_{вх}$, под действием которого меняется анодный ток. На рис. 53, 3, а вы видите встречавшийся раньше (рис. 30, 21) тройной график, на котором ламповая характеристика (динамическая) совмещена с графиками напряжения U_c и тока I_a . На графиках показан случай, когда амплитуда переменного входного напряжения $U_{вх(ампл)}$ равна постоянному отрицательному смещению на сетке. Ну, а что будет, если в погоне за большим переменным током увеличивать напряжение входного сигнала? Графики для этого случая показаны на рис. 53, 3, б. Присмотритесь к этим графикам и вы увидите, что результаты увеличения $U_{вх}$ оказались весьма печальными — форма графика тока сильно искажена. За счет захода в положительную область напряжений на сетке срезаны верхушки на графике тока (интервалы 1—2 и 5—6). Как только на сетке появляется «плюс», она перехватывает часть электронов и ток I_c резко уменьшает входное сопротивление лампы.

Кроме того, анодный ток искажен и в области его минимальных значений. Отрицательное напряжение на сетке «перестаралось» — оно зашло слишком далеко, в ту область, где лампа оказывается запертой и анодного тока вообще нет. Из-

за этого происходит так называемая отсечка анодного тока — напряжение на управляющей сетке меняется, а анодный ток равен нулю (интервал 3—4). Из графиков ясно видно, что во избежание искажений амплитуда переменной составляющей анодного тока $I_{a\sim(\text{ампл})}$ не должна превышать постоянной составляющей I_{a0} , а для этого напряжение на сетке U_c не должно заходить ни в положительную область, ни в область, соответствующую запираанию лампы. Если ввести коэффициент использования анодного тока γ (рис. 53, 3, в), то можно сказать, что неискаженное усиление возможно тогда, когда γ не превышает единицы. Работа усилителя при этих условиях называется классом усиления А.

Максимальная неискаженная мощность, которую можно получить в классе А, соответствует коэффициентам $\xi=1$ и $\gamma=1$, то есть $U_{н(\text{ампл})} = U_{a0}$ и $I_{a\sim(\text{ампл})} = I_{a0}$. Таким образом, амплитуда наибольшей выходной мощности $P_{\text{вых}(\text{ампл})}$ равна мощности P_{a0} , потребляемой в анодной цепи от выпрямителя. Не забудьте, что здесь речь идет об амплитуде выходной мощности, а ее эффективное значение будет в два раза меньше (рис. 30, 9). Иными словами, эффективная выходная мощность $P_{\text{вых}}$ не превышает половины потребляемой мощности P_{a0} . Это значит, что максимально возможный к. п. д. анодной цепи в классе А не превышает 50%. Практически к. п. д. для этого класса усиления составляет 20—30%.

Сейчас вам предстоит стать свидетелями того, как будет найден выход из, казалось бы, безвыходного положения. Мы познакомимся со схемами усиления, в которых к. п. д. анодной цепи выше и даже значительно выше, чем 50%. При этом мы пойдем по только что забракованному пути повышения мощности $P_{\text{вых}}$ — будем увеличивать переменную составляющую анодного тока. Как и раньше, этот путь приведет нас к недопустимым нелинейным искажениям. Но для схем, о которых пойдет речь, — это не слишком большое зло. Искажая форму анодного тока, они (чудеса, да и только!) дают на выходе неискаженный сигнал. Правда, это относится не ко всем искажениям, а лишь к некоторым их видам. Вот почему прежде, чем рассматривать «чудесные» схемы, нам целесообразно подробнее познакомиться с самим механизмом искажений.

На рис. 53 и 54 показаны тройные графики основных режимов работы усилителя, основных классов усиления. Переход из одного класса в другой можно осуществить, изменяя напряжение входного сигнала и отрицательное смещение на сетку.

График рис. 53, 3, а относится к классу А, для которого характерны низкий к. п. д. и малые искажения.

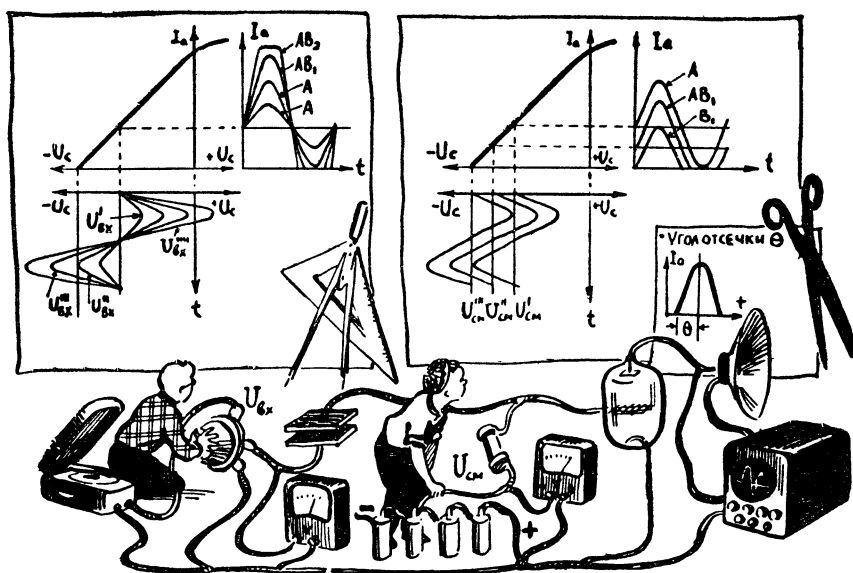


Рис. 55. Изменяя уровень входного сигнала ($U_{вх}$) и постоянное смещение на сетку ($U_{см}$), можно менять режим усилителя, переводить его из одного класса усиления в другой.

Класс усиления АВ (рис. 54, 55 и 56, 1, б, в) характеризуется отсечкой анодного тока. В отличие от класса А, рабочую точку (начальное отрицательное смещение $U_{см}$) выбирают не в середине прямолинейного участка ламповой характеристики, а сдвигают ее влево — в сторону больших отрицательных напряжений. Проще говоря, отрицательное смещение $U_{см}$ в классе АВ больше, чем в классе А (рис. 55).

Одновременно со смещением увеличивают напряжение входного сигнала. В результате всего этого и появляется отсечка — какую-то часть периода лампа заперта и анодный ток равен нулю. При переходе в класс АВ мы дважды выигрываем в борьбе за к.п.д. Во-первых, растет переменная составляющая анодного тока $I_{a\sim}$, а во-вторых, уменьшается его постоянная составляющая I_{a0} . Происходит это потому, что под действием большого смещения $U_{см}$ уменьшается постоянный ток при отсутствии сигнала — ток покоя $I_{пок}$. Постоянная составляющая I_{a0} в классе АВ несколько больше, чем $I_{пок}$, но все же она меньше, чем в классе А.

Теперь, не меняя смещения $U_{см}$, будем увеличивать переменное напряжение на сетке $U_{вх}$. После того как амплитуда $U_{вх}$ превысит $U_{см}$, на сетке в некоторые моменты времени

будет появляться «плюс», а вместе с ним и небольшие импульсы сеточного тока I_c . Это уже будет класс AB_2 . Индекс «2» как раз и говорит о том, что каскад работает с сеточным током. Индекс «1» (A_1 и AB_1) соответствует классам усиления, при которых каскад работает без сеточных токов. Индекс «1» часто не пишут, и поэтому, если вы встретите запись «класс А» или «класс АВ», знайте, что это относится к классам усиления A_1 и AB_1 . Если же каскад работает с сеточными токами, то индекс «2» пишут обязательно.

Класс АВ — понятие весьма расплывчатое. Ему может соответствовать и очень большая и очень небольшая по длительности отсечка анодного тока, а значит, большие и малые нелинейные искажения. Согласитесь сами, что одно дело, когда напряжение на сетке запирает лампу ненадолго, ну, скажем, на сотую долю периода, и совсем другое дело, когда лампа заперта чуть ли ни на целую половину периода. Поэтому в ряде случаев недостаточно указать, что каскад работает в классе АВ (иногда говорят: в режиме АВ или даже в режиме класса АВ), а нужно добавить, что анодный ток существует такую-то часть периода.

В теории усилителей для оценки времени существования тока применяют особую меру — угол отсечки θ (рис. 55, 56). Этот угол, как и угол сдвига фаз, измеряется в градусах (единица времени) и соответствует половине времени существования анодного тока. Так, например, если в результате отсечки ток существует лишь $\frac{3}{4}$ периода, то угол отсечки равен 135° (время существования тока 270°). Для класса А, где никакой отсечки вообще нет, угол θ равен 180° (время существования тока 360° , то есть весь период). Ясно, что с уменьшением угла отсечки θ импульсы анодного тока становятся все более кратковременными, а паузы между ними растут, то есть резко возрастают искажения формы сигнала (ничего не поделаешь — знали, на что шли!). Одновременно с этим уменьшается I_{a0} и повышается к. п. д.

Увеличивая угол отсечки, можно дойти до того, что анодный ток будет существовать лишь половину периода ($\theta = 90^\circ$). Такой режим усиления выделяют особо и называют классом В (рис. 54, 55 и 56, 1, 2). Теперь вам, очевидно, понятно и название класса АВ — оно говорит о том, что этот класс является промежуточным между классом А (время существования тока 360° , то есть угол отсечки 180°) и классом В (время существования тока 180° , то есть угол отсечки 90°). Класс B_2 — это тот же класс B_1 , но в случае, когда каскад работает с сеточными токами. Реальный к. п. д. анодной цепи в классе В достигает 70% (в два раза больше, чем в классе А),

Отличительной особенностью класса В является то, что отрицательное смещение $U_{\text{см}}$ полностью запирает лампу ($U_{\text{см}} = U_{\text{зап}}$), и поэтому при отсутствии сигнала анодный ток равен нулю ($I_{\text{пок}} = 0$). Только во время положительного полупериода лампа отпирается, и в анодной цепи появляется ток. Постоянная составляющая анодного тока $I_{\text{а0}}$ зависит от уровня входного сигнала: чем больше $U_{\text{вх}}$, тем больше импульсы анодного тока, тем больше $I_{\text{а0}}$. Поэтому во время реальной передачи, когда уровень входного сигнала резко меняется (именно в этом и отражено изменение громкости звука), постоянная составляющая анодного тока также не остается постоянной.

Если, работая в классе В, еще больше увеличить отрицательное смещение, то мы перейдем в класс С (C_1 или C_2 , рис. 54, 55, 56, 1, 2), где угол отсечки меньше 90° , то есть время существования импульсов тока меньше половины периода (меньше 180°). Хотя этот класс характеризуется весьма высоким к. п. д., в усилителях низкой частоты он не применяется. Дело в том, что искажения, которые появляются в классе С, не могут быть устранены даже в тех «волшебных» схемах, с которых мы начали разговор. В то же время подобные схемы если не полностью устраняют, то во всяком случае резко уменьшают искажения, возникающие при усилении в классах АВ и В. Сейчас мы с вами посмотрим, как все это происходит.

Усилительная схема „Тянитолкай“

Все вы, конечно, знаете сказку в стихах Корнея Чуковского «Доктор Айболит». Но, помимо этой стихотворной сказки про Айболита, есть еще одна — в прозе. Ее Корней Иванович пересказал нашим ребятам по мотивам сказочной повести английского писателя Гью Лофтинга «Доктор Дулитл». Среди героев этой повести есть одно необычное животное, по имени Тянитолкай. Это животное чем-то похоже на горного козла с большими рогами. Только у Тянитолкай две рогатые головы, одна спереди, а другая сзади, и он одинаково хорошо ходит, рычит, бодает и вперед и назад. В повести рассказано, как головы Тянитолкай по очереди спят и кушают, как следят, чтобы не подкрался охотник. Поэтому-то Тянитолкай до сих пор не удалось поймать, и его нет ни в одном цирке, ни в одном зоологическом саду.

Существуют усилительные схемы, которые чем-то напоминают двухголового Тянитолкай. Это схемы двухтактных

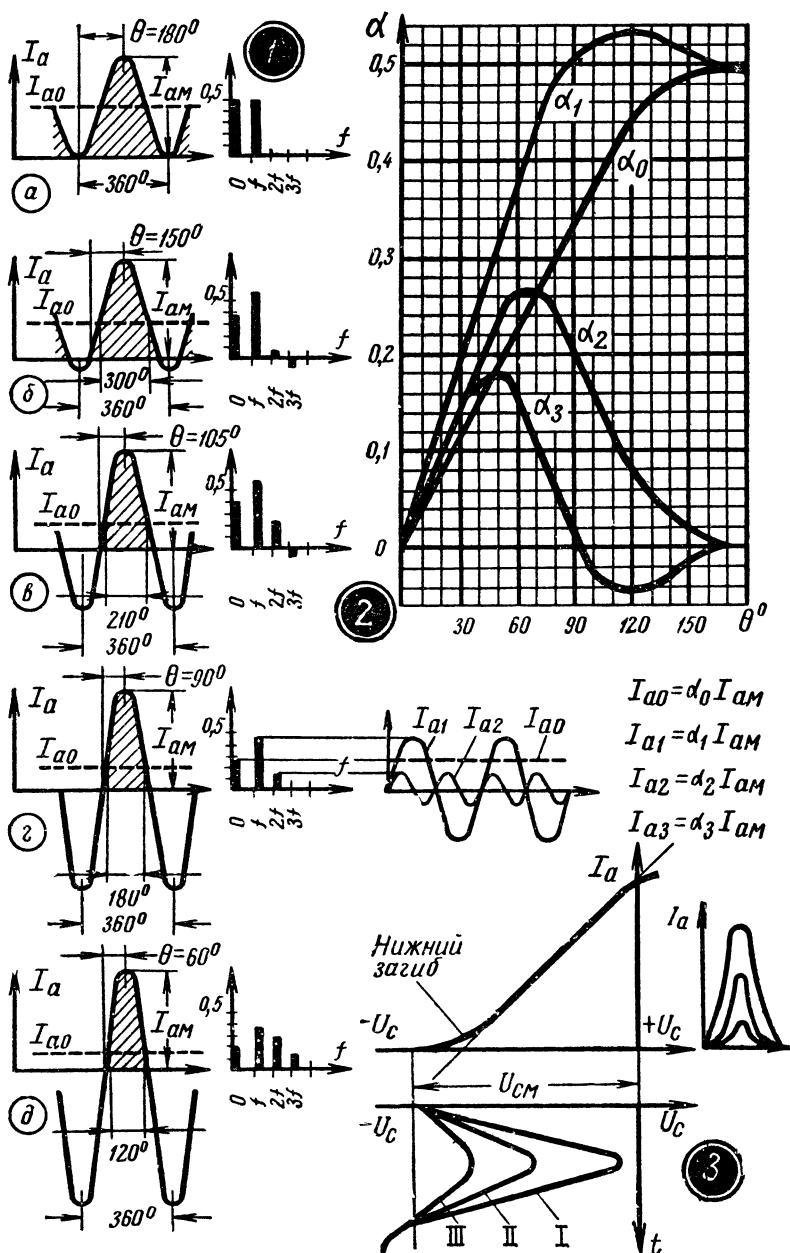


Рис. 56. Зависимость формы анодного тока и амплитуд его составляющих (гармоник) от угла отсечки.

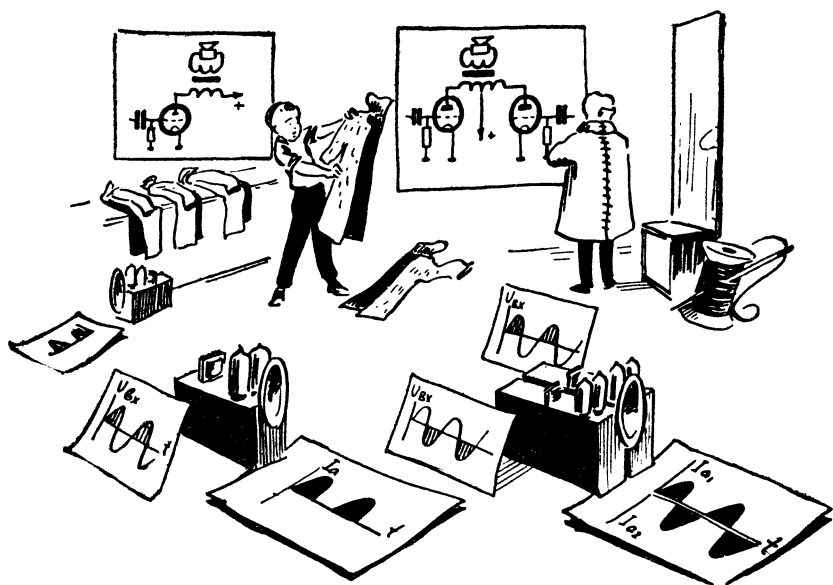


Рис. 57. Двухтактная схема позволяет из двух сильно искаженных (с большой отсечкой) сигналов «сшить» один неискаженный.

усилителей, которые по-английски так и называются «тяни-толкай» (пуш-пул). Двухтактный усилительный каскад состоит из двух одинаковых каскадов (каждый такой каскад-половинку называют плечом), которые, подобно головам сказочного Тянитолкая, могут работать поочередно, могут одинаково хорошо создавать в нагрузке ток вперед и назад (рис. 57).

Схемы усилителей, приведенные в предыдущей главе, в отличие от двухтактных, называют одноктактными.

Знакомство с двухтактной схемой мы начнем с самого «страшного» случая — с работы усилительных каскадов в классе В (рис. 58, 1, 2). Обе лампы двухтактного каскада L' и L'' работают на общую нагрузку — громкоговоритель $Гр$. Он включен в анодные цепи через выходной трансформатор $Тр_v$ с двумя первичными обмотками, точнее, с одной обмоткой, имеющей вывод от средней точки. По одной половине первичной обмотки (левой) проходит анодный ток лампы L' , по другой половине (правой) — анодный ток лампы L'' . На сетки ламп подается одинаковое по величине отрицательное смещение — $U_{см}$ и одинаковое по величине переменное напряжение сигнала $U_{вх}$. Напряжения эти подобраны так, что

в каждом плече лампа работает с углом отсечки 90° (ток существует только половину периода), а это и является признаком класса В (рис. 56, 1, 2).

В двухтактных схемах, работающих в любом из классов усиления, обязательно нужно выполнить такое условие: напряжения на управляющие сетки необходимо подавать в противофазе. Это значит, что в тот момент, когда на сетке лампы L' действует положительный полупериод, на сетке L'' должен быть отрицательный полупериод входного напряжения. В данном случае «положительный» и «отрицательный» — это уже не условные понятия: напряжение на сетках оценивается относительно одной общей точки: относительно шасси, куда обычно подключены катоды обеих ламп. Для нашего примера (рис. 58, 1, 2, 3) во время нечетных полупериодов 1—2, 3—4, 5—6 «плюс» сигнала подводится к сетке L' , а во время четных 2—3, 4—5, 6—7 — к сетке L'' . Это значит, что L' заперта во время четных полупериодов, а L'' — во время нечетных.

Поскольку лампы работают в классе В и работают поочередно, то в первичной обмотке Tr_v поочередно будут проходить импульсы тока длительностью в половину периода каждый. Если рассматривать первичную обмотку как единое целое, то можно сказать, что эти импульсы будут иметь разное направление — импульсы от лампы L' пойдут по обмотке слева направо (по схеме), импульсы от лампы L'' — справа налево. Направление магнитного поля катушки зависит от того, в какую сторону течет по ней ток. Поэтому магнитное поле в выходном трансформаторе Tr_v будет переменным и, значит, будет переменным наведенное во вторичной обмотке выходное напряжение $U_{\text{вых}}$. Одно плечо двухтактной схемы обеспечит положительный полупериод выходного напряжения, другое плечо — отрицательный полупериод этого напряжения. Выходная мощность равна сумме полезных мощностей каждой лампы. «Сшитый» из двух разных анодных токов выходной сигнал совершенно не отличается от того сигнала, который мы получили бы при усилении в классе А. Иными словами, двухтактная схема позволяет работать в экономичном классе В и в то же время дает неискаженный выходной сигнал.

К сожалению, все сказанное в полной мере относится лишь к идеальному, теоретическому усилителю, где работают лампы с характеристиками, не имеющими нижнего загиба. К теоретическому классу В в какой-то степени приближаются триоды. Что же касается наиболее важных для нас выходных ламп — пендотов и лучевых тетродов, то из-за сильно-го нижнего загиба эти лампы, работая в классе В, заметно

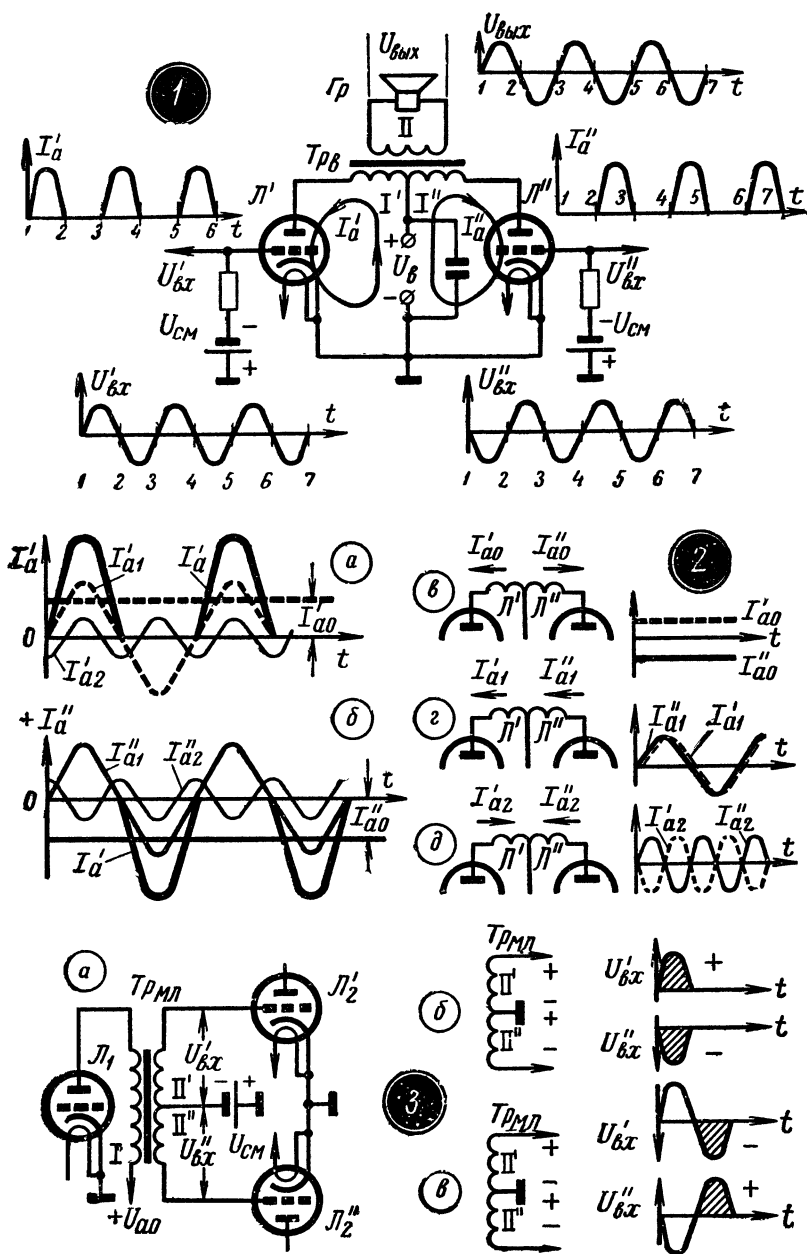


Рис. 58. Двухтактный выходной каскад.

искажают сигнал (рис. 56, 3). Особенно сильно искажаются слабые сигналы, которые полностью попадают на нижний изогнутый участок ламповой характеристики.

Чтобы уменьшить вредное влияние нижнего загиба, двухтактный усилитель переводят в класс АВ. При этом несколько снижается к. п. д., но зато уменьшаются нелинейные искажения сигнала. Нужно сказать, что наибольшую мощность усилительный каскад отдает в классе АВ при угле отсечки 120° , а к. п. д. при этом достигает 50—60%. Именно в таком режиме работает большинство двухтактных выходных каскадов. В тех случаях, когда от лампы хотят получить очень высокий к. п. д., используют классы усиления B_2 и AB_2 . Но, конечно, увеличение мощности в этом случае не достается даром — за него приходится платить дополнительными нелинейными искажениями, возникающими при появлении сеточных токов. Кроме того, с появлением сеточных токов увеличивается мощность, потребляемая от предыдущего каскада. Именно он поставляет энергию, которая теряется в сеточной цепи выходной лампы.

Довольно часто двухтактные схемы работают не только в экономичных классах АВ и В, но и в классе А, для которого вполне пригодны и однотактные усилители. Применение двухтактных схем для усилителей класса А объясняется тем, что «сшивание» выходного сигнала из двух кусков не единственное достоинство этих схем. Они обладают еще целым рядом других ценных особенностей, которые проявляются во всех классах усиления, в том числе и в классе А.

Для начала отметим, что постоянные составляющие анодных токов проходят по первичной обмотке Tr_v в разных направлениях и создают магнитные поля, направленные одно против другого (рис. 58, 2, а, б, в). В итоге, постоянного магнитного поля вообще нет, и сердечник выходного трансформатора в двухтактной схеме работает без постоянного подмагничивания. Теперь уже не нужно делать в сердечнике зазор, ослабляющий магнитное поле, и сборку пластин следует производить в перекрышку. При сравнительно небольших размерах сердечника без зазора можно получить весьма большую (во всяком случае, значительно большую, чем для сердечника с зазором) индуктивность первичной обмотки, а это улучшает воспроизведение низших частот.

Другая особенность двухтактной схемы состоит в том, что ее анодные цепи можно питать выпрямленным напряжением со значительными пульсациями. Пульсации питающего тока, так же, как и его постоянные составляющие, проходят по первичной обмотке Tr_v в разных направлениях и создают

компенсирующие друг друга магнитные поля. Поэтому в цепи громкоговорителя не наводится напряжение пульсаций, и для питания анодных цепей двухтактного каскада может быть использован сравнительно простой фильтр.

Еще одно достоинство двухтактных схем: нелинейные искажения в них при прочих равных условиях всегда меньше, чем в одноктактных схемах. Конечно, это имеет особенно большое значение для классов АВ и В, где мы сознательно идем на искажение формы сигнала. Так, например, если в классе В одноктактный усилительный каскад дает совершенно недопустимый $K_{н.и}$ — около 40%, то двухтактный каскад при тех же условиях позволяет снизить нелинейные искажения до 10—12%. Для класса А только переход на двухтактную схему выходного каскада может привести к снижению $K_{н.и}$ с 7—10% до 3—5%. В сочетании с отрицательной обратной связью двухтактная схема позволяет уменьшить $K_{н.и}$ в классе А до 1%, а в классе АВ — до 4—5%.

За счет чего же уменьшаются нелинейные искажения в двухтактной схеме? Каким образом ослабляются (а может быть, исчезают?) посторонние гармоники, появившиеся в выходном сигнале из-за нелинейности ламповой характеристики, из-за отсечки анодного тока? Секрет здесь опять-таки во взаимодействии магнитных полей, которые создаются в выходном трансформаторе токами ламп L' и L'' .

Первая гармоника (I'_{a1} и I''_{a1}) и остальные нечетные гармоники анодных токов первого и второго плеча создают в первичной обмотке магнитные поля, которые всегда действуют в фазе (рис. 58, 2, а, б, г). Ток первой гармоники — это и есть выходной сигнал в чистом виде, и именно благодаря сложению магнитных полей первой гармоники суммируется полезная выходная мощность обеих ламп двухтактного каскада. Вторая (I'_{a2} и I''_{a2}) и остальные четные гармоники, подобно постоянным составляющим (I'_{a0} и I''_{a0}), создают в сердечнике магнитные поля, которые действуют друг против друга и взаимно уничтожаются (рис. 58, 2, а, б, д). Таким образом, в двухтактной схеме из искаженного выходного сигнала исчезают четные гармоники, а это равносильно резкому уменьшению нелинейных искажений.

Не забудьте, что для упрощения мы рассматриваем случай усиления чисто синусоидальных колебаний, и появившиеся в выходном сигнале гармоники — это вовсе не тембровая окраска усиливаемого звука (рис. 5). Здесь гармоники — это совершенно новые, посторонние составляющие, которых не было во входном сигнале и которым есть только одно название — искажение спектра. Что же касается полезных гармо-

ник, то есть таких, которые поступают на вход каскада и определяют тембр звучания, то они образуют основной сигнал. Оба плеча двухтактной схемы суммируют его, складывают в первичной обмотке Tp_v любые составляющие этого сигнала независимо от их частоты и фазы.

Мы коротко рассмотрели некоторые достоинства двухтактных схем. Справедливость требует, чтобы были упомянуты и их основные недостатки.

Прежде всего отметим такой очевидный и не очень приятный факт: в двухтактной схеме должны работать две лампы (или одна двойная). Еще одно неудобство — на сетки этих ламп усиливаемый сигнал нужно подавать в противофазе. А поскольку с микрофона, звукоснимателя, магнитной головки и т. п. мы получаем лишь один сигнал, то в усилителе должно быть устройство для сдвига фазы на 180° .

Если не к недостаткам, то уж наверняка к трудностям нужно отнести необходимость строгой симметрии плеч двухтактного каскада. Симметрия нужна для того, чтобы выходной сигнал был «сшит» из одинаковых половинок, чтобы пульсации, постоянные составляющие и четные гармоники токов ламп с равной силой выходили на «поле боя» (в первичную обмотку выходного трансформатора) и полностью уничтожали друг друга. Для получения симметрии нужно, чтобы в двухтактном каскаде работали совершенно одинаковые лампы, причем в одном и том же режиме, и чтобы в обоих плечах применялись одинаковые детали. Главная трудность здесь состоит в изготовлении симметричной обмотки и выходного трансформатора и в подборке ламп — даже одинаковые по названию лампы могут иметь заметный разброс параметров.

Что касается трансформатора, то с ним связана еще одна трудность: его индуктивность рассеяния $L_{рас}$ должна быть очень небольшой. Для уменьшения $L_{рас}$ в ряде случаев приходится принимать специальные меры (стр. 203).

Значительные неудобства возникают, если двухтактный выходной каскад работает в классе В. В этом случае ток покоя ламп равен нулю (рис. 54), а постоянная составляющая анодного тока I_{a0} меняется в зависимости от уровня входного сигнала. Чем больше $U_{вх}$, тем больше импульсы тока в анодной цепи, тем, следовательно, больше и постоянная составляющая этих импульсов I_{a0} . С этим связаны сразу две неприятности. Во-первых, изменение I_{a0} означает, что меняется ток, потребляемый от выпрямителя, и падение напряжения U_ϕ на дросселе или сопротивлении фильтра (рис. 30, 18). В итоге меняется и постоянное напряжение на выходе

выпрямителя, которое подается и на другие лампы. Вывод — анодные цепи ламп, работающих в классе В, и все остальные лампы усилителя не стоит питать через общий фильтр выпрямителя.

Во-вторых, из-за отсутствия тока покоя и непостоянства постоянной составляющей I_{a0} в выходном каскаде нельзя применить удобную схему автоматического смещения — нельзя включить сопротивление в катодную цепь лампы. Смещение приходится подавать от отдельного источника, который обычно «выкраивают» в схеме питания (рис. 45, блок 5 В).

Оба последних недостатка в какой-то мере относятся к классу АВ. В этом случае, правда, ток покоя не равен нулю, однако постоянная составляющая I_{a0} все же меняется, причем тем сильнее, чем меньше угол отсечки. И хотя в большинстве случаев для усилителей, работающих в классе АВ, все же применяют автоматическое смещение, его, по возможности, следует заменить независимым смещением, то есть напряжением, которое не зависело бы от анодного тока выходных ламп.

Достоинства двухтактных схем привлекают конструкторов намного сильнее, чем отпугивают их недостатки. Вот почему, когда мощности одной лампы не хватает и речь идет об использовании в выходном каскаде двух ламп (кстати, для увеличения выходной мощности лампы можно включать параллельно), то этот каскад всегда собирают по двухтактной схеме. Распространенные выходные лампы развивают мощность до 4—5 вт, и поэтому двухтактный выходной каскад вы встретите во всех промышленных и любительских усилителях низкой частоты, в том числе, конечно, в усилителях радиоузлов, с выходной мощностью более 4—6 вт. В ряде случаев и выходные каскады очень небольшой мощности собирают по двухтактной схеме. Она незаменима, когда особо важно снизить потребляемую мощность (переносная аппаратура с питанием от батарей), а также в усилителях, к которым предъявляются очень жесткие требования в отношении нелинейных искажений.

Поскольку мы высказались за применение двухтактных схем, то нужно выяснить, как и в какой степени можно устранить их недостатки, какими путями можно преодолеть трудности, стоящие на пути применения двухтактных усилителей. Начнем с самого необходимого — со схем, которые позволяют подать на сетки ламп противофазные напряжения.

„Кру-гом!“

На уроках физкультуры вы наверняка видели, как выполняется эта команда, а может быть, даже выполняли ее сами. «Кру-гом!» — командует преподаватель. И тот, к кому это относится, четко поворачивается на 180° . Что-то похожее придется проделать с усиливаемым сигналом. Нужно и его научить поворачиваться на 180° , то есть сдвигать фазу на полпериода. При этом получится два сигнала: один с еще не сдвинутой фазой, а другой — со сдвинутой. Именно такие сигналы и нужны для подачи их на управляющие сетки ламп двухтактного усилителя. Электрические цепи или электронные схемы, которые заставляют переменное напряжение выполнять команду «кру-гом!» и выдают на выходе два одинаковых по величине и противофазных напряжения, называются фазоинверторами (рис. 59).

Один из простых фазоинверторов — это предоконечный каскад, в анодную цепь которого включен междупламповый

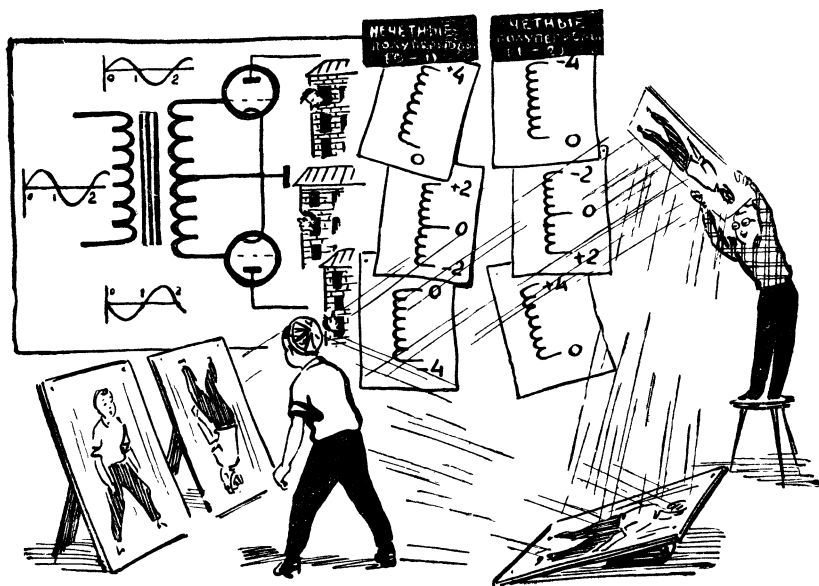


Рис. 59. На сетки ламп двухтактного выходного каскада сигналы необходимо подавать в противофазе. Для этой цели фазоинвертор каким-либо способом делит напряжение сигнала на две равные части и поворачивает на 180° фазу одной из них.

трансформатор $Tr_{м.л}$ (рис. 58, 3, а). Междуламповым он называется потому, что через него сигнал передается из анодной цепи предоконечной лампы на сетки выходных ламп. Вторичную обмотку трансформатора $Tr_{м.л}$ можно разделить на две части, и тогда мы получим два выходных напряжения. Сдвинуть фазу одного из этих напряжений на 180° не составляет труда: фаза напряжения на выходе любого трансформатора зависит от того, какой из выводов вторичной обмотки заземлен (рис. 39, 1). Вторичную обмотку междулампового трансформатора выполняют как одно целое и делают вывод от средней точки. Заземлив этот средний вывод, мы получим на краях вторичной обмотки два одинаковых по величине и противоположных по фазе напряжения. Чтобы убедиться в этом, попробуйте провести рассуждения с помощью «плюсов» и «минусов» (рис. 58, 3, б, в).

Несмотря на простоту, фазоинвертор с трансформатором применяют довольно редко: сам трансформатор считается сложной деталью, и там, где это возможно, стараются обходиться без него. Кроме того, лишний трансформатор — это лишний источник частотных и нелинейных искажений.

Другой простой фазоинвертор — это усилительный каскад с двумя нагрузками: анодной R_a и катодной R_k (рис. 60, 1, а). Известно, что при увеличении анодного тока напряжение на аноде U_a уменьшается, а напряжение U_k на катодном сопротивлении R_k увеличивается (рис. 60, 1, б). Это значит, что напряжения U_a и U_k будут изменяться в противофазе и поэтому противофазными будут переменные составляющие этих напряжений $U_{вх_2}$ и $U_{вх_1}$. Их-то мы и подаем на сетки ламп двухтактного выходного каскада. Для того чтобы оба сигнала не отличались по величине, нужно сделать R_a и R_k одинаковыми. Обычно каждое из этих сопротивлений составляет несколько десятков килоом. За счет такого большого R_k каскад охвачен очень глубокой отрицательной обратной связью, сильно снижающей усиление. Обратите внимание на то, что сопротивление утечки R_{c1} подключено не к шасси, а к сопротивлению R_k^* . В противном случае на L_1 подавалось бы не только постоянное смещение, появляющееся на R_k^* , но весьма большая (обычно десятки вольт) постоянная составляющая напряжения $U_{к1}$.

Существует и другая схема (рис. 60, 2, а, б), где постоянную составляющую $U_{к0}$ все же подают на сетку. Но одновременно с помощью делителя на сетку подают положительное напряжение $U_{с0}$. В этом случае смещение будет равно разнице между постоянным положительным и отрицательным

напряжением. При налаживании такой схемы нельзя допустить, чтобы лампа даже на какое-то мгновение осталась без отрицательного смещения — «плюс» на сетке может вывести ее из строя.

Напряжение сигнала на сетке лампы и переменное напряжение на ее аноде сдвинуты по фазе на 180° (рис. 30, 24), и это используется в целом ряде фазоинверсных схем. Обычно такие схемы выполняют на двух триодах, один из которых приносится в жертву — от этого триода не требуют усиления, он должен только сдвигать фазу.

Один из вариантов фазоинвертора на двойном триоде показан на рис. 60, 3, а. Выходное напряжение $U'_{\text{вых}}$ с первого каскада L'_1 подается прямо на сетку одной из ламп двухтактного усилителя. Часть этого напряжения с делителя $R_{c2}^* R_6$ подается на сетку второго триода L''_1 . Делитель во столько же раз уменьшает напряжение, во сколько лампа L''_1 его усиливает. Таким образом, на сетках ламп двухтактного каскада действуют одинаковые по величине, но противоположные по фазе напряжения $U'_{\text{вых}}$ и $U''_{\text{вых}}$. Эти напряжения сдвинуты по фазе на 180° , потому что первое из них действует в сеточной цепи, а второе получено из анодной цепи одной и той же лампы L''_1 ; лампа, как уже не раз отмечалось, сдвигает фазу на полпериода. Эта схема получила название автобалансной (самобалансирующейся). Напряжение с выхода L'_1 , так же как и с выхода L''_1 , подается на сопротивление R_6 . Детали схемы подобраны так, что при идеальном балансе, то есть когда $U'_{\text{вых}} = U''_{\text{вых}}$, напряжение на R_6 равно нулю. В случае если одно из двух выходных напряжений изменится (например, из-за изменения параметров лампы или данных деталей), то на R_6 появится разностное напряжение, которое вновь сбалансирует схему. Аналогичный, но более простой автобалансный фазоинвертор вы найдете на схеме рис. 60, 3, б.

В фазоинверсных схемах на двойном триоде катодное сопротивление не нужно шунтировать конденсатором, так как по нему проходят одинаковые по величине и противоположные по фазе анодные токи обеих ламп, и переменные составляющие этих токов компенсируют друг друга. В случае же если одна из переменных составляющих увеличится, то на R_k сразу же появится напряжение отрицательной обратной связи, которое будет действовать против «высочки». Таким образом, сопротивление R_k можно рассматривать как элемент автобалансировки.

Это свойство используется и в фазоинверторе с катодной связью (рис. 62, 4), где переменные составляющие анодных токов I_1' и I_1'' несколько отличаются. Здесь переменное напряжение U_{c1}'' на сетку L_1'' снимается с катодного сопротивления R_k (точнее, $R_k + R_k^*$), так как сетка для переменного напряжения соединена непосредственно с корпусом через конденсатор C_{c1} . Для получения идеальной симметрии, то есть для того чтобы соблюдалось равенство $U_{вых}' = U_{вых}''$, сопротивление анодной нагрузки R_{a1}' должно быть несколько меньше, чем R_{a1}'' . Только в этом случае при одинаковых выходных напряжениях токи ламп не будут равны и на R_k появится переменное напряжение, необходимое для работы каскада. Это напряжение будет и при одинаковых сопротивлениях анодной нагрузки, но анодные токи ламп I_1' и I_1'' , а значит, и переменные напряжения $U_{вых}'$ и $U_{вых}''$ в этом случае будут несколько отличаться. При достаточно большом сопротивлении R_k необходимая величина U_{c1}'' получается при незначительной разнице между выходными сигналами, и асимметрия фазоинвертора лежит в допустимых пределах. Каскад охвачен отрицательной обратной связью и хорошо поддерживает начальную степень симметрии.

На практике находят применение все рассмотренные схемы фазоинверторов; каждая из них имеет свои достоинства и недостатки. Трансформаторная схема, несмотря на все ее минусы, незаменима в том случае, когда двухтактный выходной каскад работает с сеточными токами. Фазоинвертор с разделенной нагрузкой (рис. 60, 1, а) имеет хорошую частотную характеристику, однако не дает никакого усиления. Фазоинвертор с катодной связью мало чувствителен к пульсациям анодного напряжения и почти не создает нелинейных искажений. К его недостаткам относят некоторые трудности получения идеальной симметрии, в частности при одинаковых сопротивлениях анодной нагрузки. Автобалансная схема дает значительно большее выходное напряжение по сравнению с двумя предыдущими, однако и она не лишена недостатков — здесь появляется асимметрия на высших частотах, частотная характеристика хуже, чем в схеме с разделенными нагрузками, и коэффициент нелинейных искажений выше, чем в схеме с катодной связью. Выбор той или иной схемы фазоинвертора зависит от требований, предъявляемых ко всему усилителю и к фазоинверсному каскаду, в частности.

От двух до пятидесяти

Выбор схемы усилителя низкой частоты и путей для получения той или иной выходной мощности, как правило, зависит от имеющихся у радиолюбителя основных деталей: силовых и выходных трансформаторов, вентилях и фильтров для выпрямителя, усилительных ламп и, в первую очередь, выходных ламп. Самое широкое распространение получили выходные пентоды и лучевые тетроды (для обоих типов второй элемент в названии — буква «П»), такие, как 6ПЗС, 6П6С, 6П1П, 6П14П и др. Каждая из этих ламп, разумеется, имеет свои особенности. Так 6П14П обладает весьма высокой крутизной, и поэтому на сетку ее можно подавать значительно меньшее напряжение сигнала, чем это требуется для других ламп; лампы 6П1П и 6П6С, по сравнению с другими, позволяют получить несколько меньшие нелинейные искажения. Что же касается выходной мощности, то у всех сетевых ламп (так называют лампы, накал которых можно питать переменным током) эта мощность примерно одинакова и составляет 5—6 *вт* (рис. 80). Конечно, существуют и более мощные лампы, выходная мощность которых достигает десятков, сотен ватт и даже многих киловатт. Но все это лампы специального назначения — для мощных радиостанций и радиоузлов. Радиолюбители в своих конструкциях усилителей и радиоузлов такие лампы используют очень редко — любителям, как правило, хватает обычных прямо-усилительных ламп, то есть ламп, предназначенных для приемников, телевизоров, усилителей магнитофонов, радиограммофонов и т. п. Наряду со многими ценными качествами (небольшие габариты, экономичность и др.) у прямо-усилительных ламп, есть одно совершенно бесспорное достоинство — можно зайти в радиомагазин и легко купить любую из них.

Мощность, указанная среди параметров выходной лампы, относится к случаю, когда она работает в классе А при номинальном анодном напряжении — для большинства сетевых ламп 250 *в*. Изменив режим работы лампы и класс усиления, можно получить совсем другую величину $P_{\text{вых}}$. Минимальная мощность, как вы сами понимаете, не ограничена — можно довести лампу до того, что ее выходная мощность будет равна нулю. Выходные лампы обычно работают при анодных напряжениях не менее 150—180 *в* и в этом случае дают мощность около 2 *вт*.

Что же касается верхней границы, то здесь основным ограничением является допустимая для данной лампы мощность рассеивания на аноде. Постоянная составляющая анод-

ного тока I_{a0} и постоянное напряжение на аноде U_{a0} , если их перемножить, покажут ту постоянную мощность P_{a0} , которую лампа потребляет от выпрямителя. Часть этой мощности расходуется на создание усиленного сигнала — хорошо знакомой нам мощной копии. Та часть потребляемой мощности P_{a0} , которая не идет в дело, естественно, в лампе теряется: в основном она затрачивается на нагревание анода. Тепло, которое анод может рассеять без чрезмерного перегрева, ограничено, и, таким образом, ограничена мощность потерь $P_{a.n.}$ Это и кладет предел увеличению выходной мощности: чтобы больше выдавать, нужно больше брать и, к сожалению, больше терять.

Кстати говоря, в классе А наибольшая мощность теряется при отсутствии сигнала. Ввиду постоянства I_{a0} ($I_{пок}$) в классе А от выпрямителя потребляется всегда одна и та же мощность. И естественно, что вся она теряется на аноде, если нет никаких полезных затрат (если нет входного сигнала, то и выходная мощность равна нулю). В классе В, наоборот, при отсутствии сигнала лампа заперта и ничего не потребляет от выпрямителя, а с увеличением сигнала растет I_{a0} , и потери тоже возрастают. Наибольшая мощность потерь на аноде в классе АВ зависит от ряда факторов и обычно соответствует некоторому среднему уровню выходного сигнала.

Неудачно рассчитанный или плохо налаженный каскад, в котором мощность, теряемая на аноде, превышает допустимую величину, в буквальном смысле слова, виден издалека. Аноды ламп накаляются до красного свечения, объявившиеся в баллоне остатки газа усиленно ионизируются. Ионный ток создает в баллоне фиолетовое свечение, а положительные ионы бомбардируют и разрушают катод. Лампа не в состоянии долго работать в таких тяжелых условиях. Она очень быстро (при сильной перегрузке буквально через несколько минут) выходит из строя и часто заодно приводит в негодность такие ответственные узлы усилителя, как блок питания или выходной трансформатор.

С учетом возможностей той или иной лампы, в том числе с учетом ее допустимой мощности рассеивания на аноде и экранной сетке, рассчитаны типовые режимы для наиболее распространенных выходных ламп. Некоторые из этих режимов приведены в табл. 13, из которой видно, что две лампы 6П3С, работа в двухтактной схеме в классе АВ₂ с фиксированным смещением от отдельного источника, развивают выходную мощность около 50 вт. Примерно такую же мощность, но в более легком режиме (класс АВ₁, автоматическое смещение создается на катодном сопротивлении) можно по-

лучить, если в каждом плече двухтактной схемы установить две соединенные параллельно лампы 6ПЗС. Не забудьте, что в этом случае вдвое уменьшается оптимальное сопротивление нагрузки и вдвое возрастает постоянная составляющая анодного тока (вместо двух стало четыре лампы!). Для получения нужного смещения в катодную цепь следует включить уже не 250 *ом*, как указано в табл. 13, а 125 *ом*.

Как видите, существующий ассортимент выходных (приемо-усилительных) ламп позволяет строить усилители самой различной мощности: от 1—2 до 50—100 *вт*.

Возможность получения той или иной мощности прежде всего зависит от схемы и режима выходного каскада и, конечно, от источника питания — от величины выпрямленного напряжения и от наибольшего тока, который может дать выпрямитель.

Усилители напряжения, работающие с выходными каскадами различной мощности, можно условно разделить на три группы: усилители для одноктактных и двухтактных выходных каскадов, а также усилители для двухтактных каскадов, работающих с сеточными токами. Отличительная особенность третьей группы состоит в том, что последний каскад усилителя напряжения должен развивать сравнительно большую мощность — до 0,1—0,2 *вт*, которую потребляет сеточная цепь выходного каскада. Кроме того, напряжение сигнала на лампы выходного каскада обязательно должно подаваться через переходной трансформатор (рис. 58, 3, а).

Все, что было сказано до сих пор, стоит рассматривать как практический совет — не считайте параметры усилителя неизбылемыми, а его схему неприкосновенной. При желании можно создавать усилители из готовых элементов разных схем. Взяв за основу какой-либо усилитель, довольно просто ввести в его схему новые регуляторы тембра, корректирующие элементы, цепи обратной связи или даже целые каскады, например фазоинвертор. Без существенных изменений схемы можно несколько изменить выходную мощность усилителя.

Повысить мощность одноктактного усилителя можно только одним путем: поднять постоянное напряжение на аноде (и соответственно на экранной сетке) выходной лампы. Таким же образом можно увеличить выходную мощность и в двухтактном каскаде. Здесь, правда, существует еще один путь: если каскад работал в классе А, то его можно без особых изменений схемы перевести в класс АВ₁. Для этого, как правило, достаточно увеличить сопротивление в катодной цепи выходных ламп, то есть подать на сетку большее отри-

цательное смещение $U_{см}$ (рис. 59). Кроме того, конечно, нужно увеличить и напряжение сигнала $U_{вх}$, чтобы полностью использовать прямолинейный участок ламповой характеристики — дойти до границы сеточных токов ($U_c=0$). Если усилитель напряжения имеет некоторый запас усиления, то, чтобы повысить $U_{вх}$, достаточно лишь повернуть ручку регулятора громкости. Во всех случаях изменения режима выходного каскада полезно руководствоваться данными табл. 13, в которой вы найдете исходные данные (оптимальное сопротивление нагрузки $R_{а.опт}$) для изменения числа витков вторичной обмотки выходного трансформатора. Весь выходной трансформатор следует менять лишь в том случае, когда вы резко увеличиваете выходную мощность и тем самым резко повышаете ток, который проходит по первичной обмотке.

Справедливость требует, чтобы в заключение этих рекомендаций было высказано положение, которое кое-кого из вас обрадует, а кое-кого, может быть, и огорчит. Повышение мощности на 10—15% и даже на 20% дает сравнительно небольшое увеличение уровня громкости, и ради него не стоит идти на серьезные жертвы: перематывать трансформаторы, искать новые детали, в корне переделывать усилитель. Если вас не устраивает мощность 3 *вт*, то вряд ли устроит 4 *вт*, если мало иметь на выходе 10 *вт*, то будет мало и 12 *вт*. Вот почему неписанный закон делит любительские усилители НЧ в зависимости от их мощности на несколько основных групп: до 5 *вт*, до 10 *вт*, до 15 *вт*, порядка 25 *вт* и порядка 50 *вт*. К двум последним группам в основном относятся усилители для небольших, в частности школьных, радиоузлов.

В предыдущей главе мы познакомились с однотактными усилителями, выходная мощность которых составляет 2—4 *вт*. Повысив анодное напряжение и допустив несколько большие нелинейные искажения, можно повысить выходную мощность этих усилителей до 5,5 *вт*, а применив в оконечном каскаде лампу 6ПЗС, — до 6,5 *вт* (табл. 16). При замене выходных ламп учтите, что лампы 6П1П, 6П6С и 6ПЗС имеют меньшую крутизну, чем 6П14П, и поэтому для них требуется в два-три раза большее напряжение сигнала. Применение этих ламп в описанных однотактных усилителях может потребовать некоторых изменений и в усилителе напряжения: наверняка придется значительно повысить усиление первого каскада усилителя, увеличив для этого в два-три раза сопротивление анодной нагрузки и в полтора-два раза гасящее сопротивление в цепи экранированной сетки. В некоторых случаях при замене выходной лампы понадобится изменить число витков во вто-

ричной обмотке выходного трансформатора с учетом новой величины оптимального сопротивления нагрузки (рис. 49).

В этой главе будет описано несколько двухтактных усилителей мощностью 8 *вт* (15 *вт*) и 25 *вт* (50 *вт*). Последний усилитель предназначен для школьного радиоузла.

Схема усилителя на 8 *вт* приведена на рис. 65, а на рис. 64 упрощенно показано его устройство и монтаж. Основные характеристики усилителя: коэффициент нелинейных искажений не более 1%; чувствительность не хуже 250 *мв*; полоса воспроизводимых частот от 30 *гц* до 30 *кгц*; глубина регулировки тембра на частоте 30 *гц* от +20 до —20 *дб*, а на частоте 10 *кгц* от +12 до —16 *дб*; частотная характеристика усилителя для среднего и крайних положений регуляторов тембра приведена на рис. 66, б.

Схема усилителя, по-видимому, не требует подробных пояснений, так как все ее элементы и узлы нам уже знакомы. Так, в частности, выходной каскад собран по ультралинейной схеме (рис. 39, 4): часть переменного напряжения с первичной обмотки выходного трансформатора через небольшие сопротивления R_{28} и R_{29} подается на экранные сетки ламп $\mathcal{L}_3\mathcal{L}_4$. Совершенно очевидно, что этим же путем на экранные сетки поступает и постоянное напряжение. В катодные цепи выходных ламп включена цепочка автоматического смещения, а в цепи управляющих сеток — небольшие (по сравнению с сопротивлением утечки) антипаразитные сопротивления R_{25} , R_{26} . Они препятствуют паразитному самовозбуждению выходного каскада на высоких частотах.

Четырехкаскадный усилитель напряжения собран на двух двойных триодах. Значительный запас усиления позволяет включить в схему (между первым и вторым каскадами) эффективные отдельные регуляторы тембра, а также ввести несколько цепей отрицательной обратной связи. Обратной связью по току охвачены все каскады усилителя напряжения, так как ни одно из сопротивлений автоматического смещения не зашунтировано конденсатором. Три последних каскада, в том числе главный источник искажений — выходной каскад, охвачены глубокой обратной связью по напряжению. Обратная связь подается со вторичной обмотки Tr_1 в катодную (сеточную) цепь правого триода \mathcal{L}_1 . В следующем каскаде есть цепочка обратной связи $R_{14}C_7$. Эта цепочка, так же как и сопротивления $R_{26}R_{25}$, вводится для того, чтобы предотвратить самовозбуждение усилителя на сверхзвуковых частотах. Фазоинвертор выполнен по схеме с разделенными нагрузками (рис. 60, 1, а) на правом триоде \mathcal{L}_2 . Напряжение смещения на сетку этой лампы снимается с небольшой части ка-

тодной нагрузки (R_{20}). Цепочки $R_{22}C_{13}$ и R_5C_{12} — это обычные развязывающие фильтры, которые препятствуют возникновению паразитной обратной связи между каскадами через общие цепи питания.

Данные выходного трансформатора. Сечение сердечника $6,5 \text{ см}^2$ (пластины Ш-22, толщина набора 30 мм). Первичная обмотка содержит 3000 витков провода ПЭ-0,15. В процессе ее намотки делают три отвода с таким расчетом, чтобы секции Ia и Ig содержали по 900 витков, а секции Ib и Iv — по 600 витков. Обмотка II содержит 92 витка провода ПЭ-0,86, причем на секции IIa, IIб, и IIв приходится соответственно 24, 44 и 24 витка. Для того чтобы уменьшить индуктивность рассеивания и тем самым улучшить воспроизведение высших частот, первичная и вторичная обмотки разделены на части, которые при намотке трансформатора чередуются (рис. 64, б). Не забудьте, что вторичная обмотка заземлена, а на первичной действует большое (до 600 в) напряжение. Во избежание пробоя первичной обмотки, а значит, и всей «плюсовой» цепи нужно тщательно изолировать эту обмотку от вторичной, а также от сердечника трансформатора.

Акустический агрегат выбран с некоторым запасом мощности — 12 вт вместо 8 вт. Высокочастотные громкоговорители $Гр_3$ и $Гр_4$ подключены через разделительный конденсатор C_{14} .

На рис. 65, 2,3 показан другой вариант изготовления выходного трансформатора с весьма низкой индуктивностью рассеивания. Здесь вся первичная обмотка разделена на шесть секций, а вторичная на четыре секции. Секции чередуются таким образом, чтобы получилось наиболее сильное сцепление магнитных полей первичной и вторичной обмоток и чтобы трансформатор в то же время получился симметричным. Последнее условие улучшает общую симметрию двухтактного выходного каскада.

Каркас трансформатора разделен перегородкой на две равные части. Вначале наматывают все секции в одной из половин каркаса, а затем, перевернув его на 180° , наматывают вторую половину. Соединение секций выполнено в расчете на то, что левая и правая половины намотаны в разные стороны.

Так же как и в предыдущем случае, необходима хорошая изоляция между секциями первичной и вторичной обмоток. Вторичная обмотка разбита на секции искусственно лишь для уменьшения индуктивности рассеивания. Данные секций: Ia', Ia'', Ig' и Ig'' — по 450 витков ПЭ-0,15; Ib и Iv — по 600 витков того же провода. Все четыре секции обмотки II одинаковые,

и каждая из них содержит по 46 витков провода ПЭ-0,59. Сердечник с сечением $7,5 \text{ см}^2$, пластины Ш-25, набор 30 мм. Сборка сердечника «встык», без зазора.

В усилителе можно применить и какой-либо готовый выходной трансформатор, например высокочастотный и низкочастотный трансформаторы от радиолы «Дружба». В этом случае, разумеется, нужно отказаться от ультралинейной схемы выходного каскада.

Усилитель, выполненный по схеме рис. 65, совершенно спокойно может отдать и большую мощность: до 12—15 вт. Для увеличения мощности в первую очередь нужно увеличить напряжение входного сигнала. Для этого проще всего ликвидировать некоторые цепи обратной связи, зашунтировав конденсаторами катодные сопротивления R_3 , R_{11} и R_{16} . Если понадобится перейти в класс АВ, то необходимо увеличить на 30—50% сопротивление автоматического смещения R_{27} . Кстати, вместо того чтобы увеличивать уровень входного сигнала на сетках выходных ламп, можно заменить сами лампы — включить вместо 6П1П лампы 6П14П. Обладая более высокой крутизной, они требуют меньшего напряжения сигнала, однако в виде «расплаты» создают несколько большие нелинейные искажения.

Если понадобится несколько уменьшить выходную мощность, то достаточно понизить анодное напряжение. При пониженном напряжении усилитель может развивать номинальную мощность, но с несколько большими искажениями. Так при $U_a = 250 \text{ в}$ можно получить те же 8 вт, но уже с $K_{н.н} = 5\%$. Здесь уместно заметить, что указываемая в числе параметров выходная мощность усилителя часто бывает умышленно занижена лишь для того, чтобы похвастаться малыми нелинейными искажениями. В действительности же усилитель может отдать на 30—50, а то и на все 100% большую мощность, разумеется, при большем значении $K_{н.н}$ (рис. 66).

Радиоузлы: вход и выход

Основа школьного радиоузла (РУ) небольшой мощности — это усилитель низкой частоты, очень похожий на уже знакомые нам усилители радиогаммофонов и радиол. Отличительные особенности радиоузла — это его входные и выходные цепи (рис. 67, 68). Вход конструируется так, чтобы можно было вести через радиоузел несколько видов передач — подавать на усилитель сигналы с микрофона, звукоснимателя, магнитофона, радиоприемника или с линии радио-

трансляционной сети. Что же касается выходных цепей, то они должны быть рассчитаны на подключение разных потребителей: абонентских громкоговорителей (радиоточек), а также мощных излучателей звука — звуковых колонок или рупорных громкоговорителей.

Прежде чем рассматривать возможные схемы входных цепей, несколько слов о тех требованиях, которые к ним предъявляются.

Переход с одного вида передач (программ) на другой должен осуществляться быстро и легко. Лучше всего, если смену программ можно будет производить какими-либо переключателями. При этом нужно так уравнивать входные сигналы, чтобы при смене программ не менялась выходная мощность усилителя и не приходилось всякий раз подгонять уровень громкости. Очень удобно, если, помимо общего регулятора усиления (уровня) — так в радиоузле принято называть регулятор громкости, каждый источник сигнала будет иметь свой самостоятельный регулятор. Такие регуляторы, в частности, позволят вести эффектный вид передач — речь на фоне музыки. В этом случае одновременно включаются микрофон и звукоосниматель (магнитофон), причем в то время, когда диктор говорит, уровень музыкальной программы устанавливается очень небольшой, а во время пауз повышают его, и музыка звучит во весь голос. И, наконец, последнее требование — схема и конструкция входной цепи должны быть продуманы так, чтобы вход радиоузла был как можно лучше защищен от наводок и не превратился в источник сильного фона.

Одна из возможных схем входной цепи показана на рис. 68, 1. Эта схема построена в расчете на применение динамического микрофона, который дает напряжение порядка 3 мВ (табл. 7). Все остальные источники входного сигнала — звукоосниматель, приемник, радиотрансляционная сеть, — как известно, дают значительно большее напряжение, и поэтому они подключены ко входу усилителя через делители, составленные из двух сопротивлений: R' и R'' . Каждый делитель подобран так, что уменьшает напряжение источника примерно до 3 мВ, до того уровня, который дает микрофон. Благодаря этому при переключении программ низкочастотное напряжение, поступающее на вход усилителя радиоузла, практически не меняется.

Если известно, какое напряжение дает источник сигнала ($U_{\text{сиг}}$), то легко рассчитать делитель по простейшим формулам (рис. 68, 2, а, б, в), задавшись величиной R' . Это сопротивление следует выбирать достаточно большим (10 ком — 1 Мом), чтобы оно не шунтировало источник сиг-

нала, не снижало величину $U_{\text{сиг}}$. Включив в качестве R'' переменное сопротивление, мы получим для каждого источника сигнала отдельный регулятор уровня. Он позволит плавно изменять входное напряжение от нуля до величины $U_{\text{вх}}$ (3 мв). Каждый такой регулятор полезно снабдить простейшей шкалой, а на оси переменного сопротивления закрепить стрелку — указатель уровня.

Смена программ в нашей схеме осуществляется обычным переключателем (Π_1) с двумя подвижными контактами. Установив этот переключатель в верхнее (по схеме) положение, можно вести передачу — речь на фоне музыки. При этом, разумеется, хотелось бы плавно менять уровень сигнала, который идет от звукоснимателя, то есть регулировать уровень музыки. Для такой регулировки можно использовать переменное сопротивление $R_{\text{зв}}$ (рис. 68, 3, а). Но одновременно с ним необходимо ввести сопротивление $R_{\text{м}}$. Если этого сопротивления не будет (рис. 68, 3, б), то, уменьшая уровень музыки, то есть опуская вниз (по схеме) движок $R_{\text{зв}}$, мы будем все сильнее и сильнее шунтировать микрофон, так как он фактически подключен непосредственно к нижней части $R''_{\text{зв}}$. Опустив движок в крайнее нижнее положение, мы замкнем микрофон накоротко и не услышим ни музыки, ни речи. Сопротивление $R_{\text{м}}$ должно быть в 5—10 раз больше чем $R_{\text{зв}}$. В этом случае общее сопротивление цепочки, подключенной параллельно микрофону ($R_{\text{м}} + R_{\text{зв}}$), всегда будет оставаться достаточно большим и при регулировке уровня музыки напряжение, поступающее с микрофона, практически меняться не будет.

Несколько сложнее выглядит схема, где раздельно регулируется уровень сигналов с микрофона и со звукоснимателя (рис. 68, 4). Здесь уже в схему вводятся два постоянных сопротивления: R_2 и R_5 . Первое из них предохраняет от закорачивания звукосниматель, второе — микрофон. Сопротивление R_6 — общий регулятор уровня.

Можно предложить еще одну схему одновременного включения микрофона и звукоснимателя, где их взаимное влияние друг на друга практически исключено (рис. 68, 5). Здесь каждый из сигналов действует в своей сеточной цепи, а встречаются они лишь в общем сопротивлении анодной нагрузки.

Другая схема раздельного включения микрофона и звукоснимателя приведена на рис. 68, 6. Она построена, исходя из того, что сигнал с микрофона во много раз слабее, чем сигнал со звукоснимателя. Первый каскад (Π_1) — микрофонный усилитель — поднимает уровень сигнала, поступающего

с микрофона (3 мв), и доводит его до уровня сигнала, который дает звукоосниматель (150 мв). После этого оба сигнала совместно путешествуют по всему усилительному тракту на равных правах. Сопротивление R_{c2} играет примерно ту же роль, что и R_m в схеме 68, 3, а, — оно ослабляет влияние регулятора $R_{зв}$ на уровень сигнала, поступающего с микрофонного усилителя. Если бы не было R_{c2} , то, опустив движок $R_{зв}$ в крайнее нижнее положение, мы одновременно замкнули бы накоротко (для переменного тока) анод лампы L_1 .

На первый взгляд может показаться, что R_{c2} заметно ослабляет сигнал звукооснимателя. В действительности это не так. На эквивалентной схеме входной цепи (рис. 68, 6, в) видно, что R_{c2} вместе с условным входным сопротивлением лампы $R_{вх}$ и входной емкостью $C_{вх}$ образует делитель напряжения. Если лампа работает без значительных сеточных токов (для усилителя напряжения это условие обязательное — напряжение на сетке никогда не заходит в положительную область и I_c составляет доли микроампер), то величина $R_{вх}$ чрезвычайно велика. Обычно она составляет несколько мегом. Это непосредственно следует из закона Ома (рис. 30, 5, ж): чем меньше ток в каком-либо участке цепи, тем, следовательно, выше его сопротивление.

Емкостное сопротивление конденсатора $C_{вх}$ также весьма велико. Если предположить, что входная емкость составляет 2 пф (входная емкость лампы обычно не превышает десятых долей пикофарды, но мы делаем прибавку на емкость монтажа), то даже на частоте 10 кГц емкостное сопротивление составит 8 Мом (рис. 30, 10, е). Одним словом, сопротивление верхней части делителя оказывается во много раз меньше, чем сопротивление участка сетка — катод, и поэтому напряжение, которое поступает со звукооснимателя, в основном действует на этом участке, то есть между сеткой и катодом.

Схема рис. 68, 6, а применяется почти во всех небольших радиоузлах, рассчитанных на подключение динамического микрофона. В тех случаях, когда почему-либо к радиоузлу нужно подключить микрофон с более высоким уровнем сигнала (пьезоэлектрический, электромагнитный), может быть применена одна из ранее приведенных схем, в частности схема рис. 68, 4. Дополнительный каскад (микрофонный усилитель) при этом, разумеется, не нужен. Сигнал с микрофона можно подавать на тот же вход, что и сигнал со звукооснимателя.

Одна из возможных схем включения угольного микрофона показана на рис. 68, 7. На этой схеме питание микрофона осуществляется от анодного выпрямителя. Элементы делителя

R'_m и R''_m подбираются так, чтобы на микрофоне действовало заданное постоянное напряжение.

Несколько слов о подключении к радиоузлу приемника и магнитофона. Проще всего, конечно, подвести к входной цепи радиоузла сигнал прямо с выхода приемника или магнитофона. Напряжение можно снять непосредственно со вторичной обмотки выходного трансформатора (рис. 68, 8, а) и, уменьшив его в 10—20 раз, подать на тот же вход, к которому подключен звукоусилитель. Такой способ имеет один существенный недостаток: все искажения, которые возникают в выходном каскаде усилителя НЧ приемника (магнитофона) — а именно этот каскад является основным источником частотных и нелинейных искажений, — будут подаваться на вход радиоузла.

Уменьшить искажения можно двумя путями. Во-первых, можно так рассчитать делитель $R'_n R''_n$, чтобы сам приемник мог работать при очень небольшом уровне выходного сигнала. В этом случае, как известно, нелинейные искажения в выходном каскаде невелики (рис. 66).

Другой путь несколько сложнее: сигнал следует отводить не от выходного, а от какого-либо предварительного каскада. Удобно снимать низкочастотное напряжение с катодного сопротивления R_k предоконечного каскада (рис. 68, 8, б), если, разумеется, от этого сопротивления можно отключить блокировочный конденсатор C_k . Напряжение на R_k может составлять несколько десятых долей вольта, и, значит, его смело можно подавать на вход звукоусилителя. Можно получить необходимый сигнал в сеточной цепи выходного каскада, включив последовательно с существующим сопротивлением R'_c дополнительное сопротивление R''_c и создав таким образом делитель напряжения $R'_c R''_c$. Делитель этот необходим для того, чтобы емкость соединительных проводов $C_{вх}$ не оказалась подключенной непосредственно к сетке лампы и не шунтировала сеточную цепь в области высших частот (рис. 37).

Радиоузел, как правило, ретранслирует передачи только местной радиостанции, и поэтому вместо настоящего приемника можно применить простенький самодельный приемник с фиксированной настройкой на одну волну. При достаточно сильном сигнале местной станции можно обойтись детекторным приемником (рис. 68, 9, а). С хорошей антенной удается получить на нагрузке детектора низкочастотное напряжение в несколько милливольт, и его вполне можно подавать на микрофонный вход радиоузла. В качестве L_1 можно взять

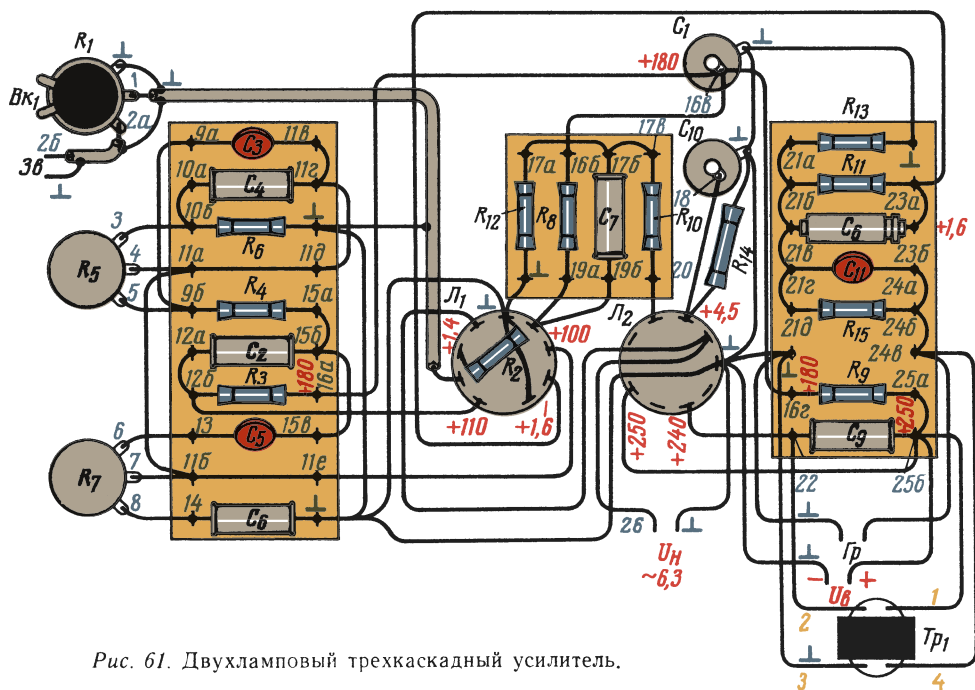
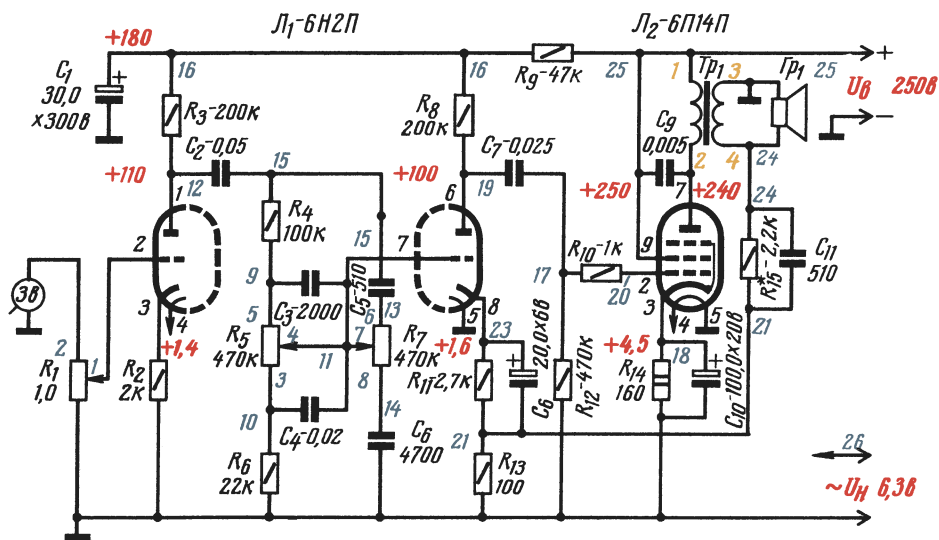


Рис. 61. Двухламповый трехкаскадный усилитель.

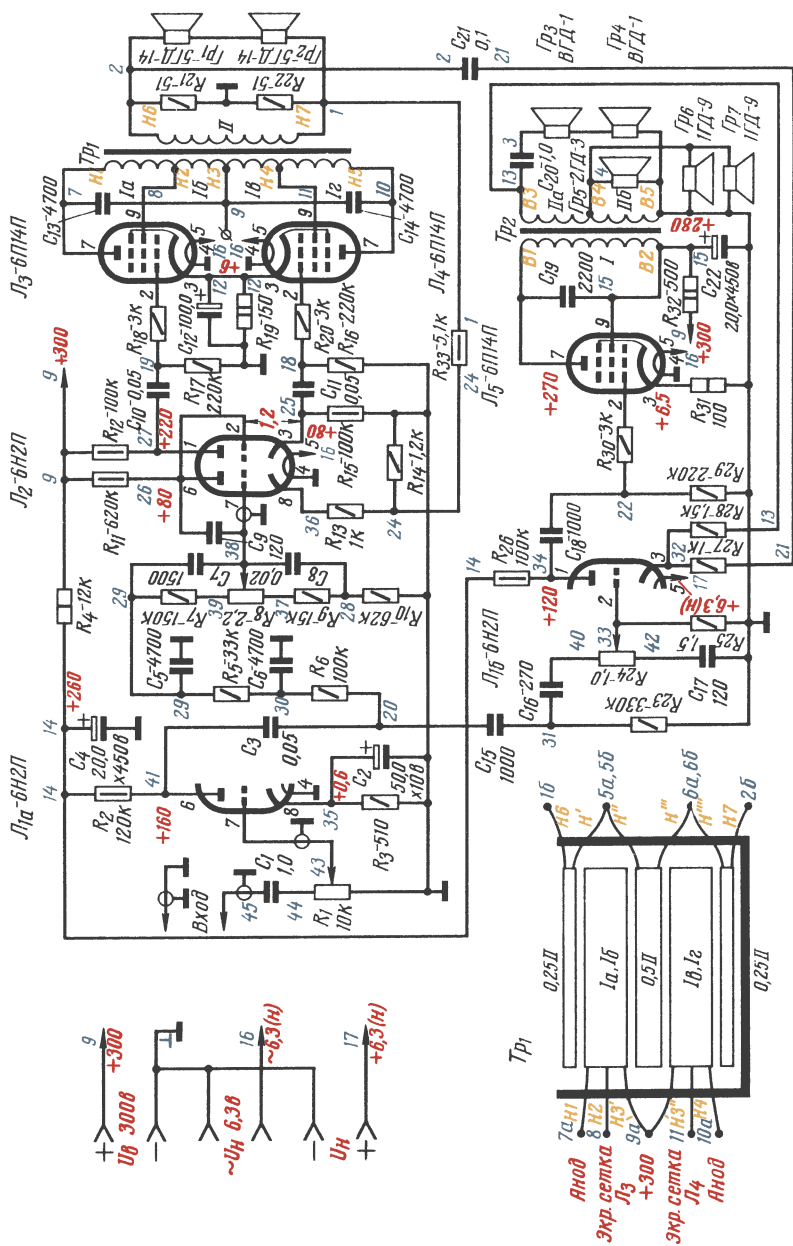


Рис. 62. Двухканальный усилитель — принципиальная схема.

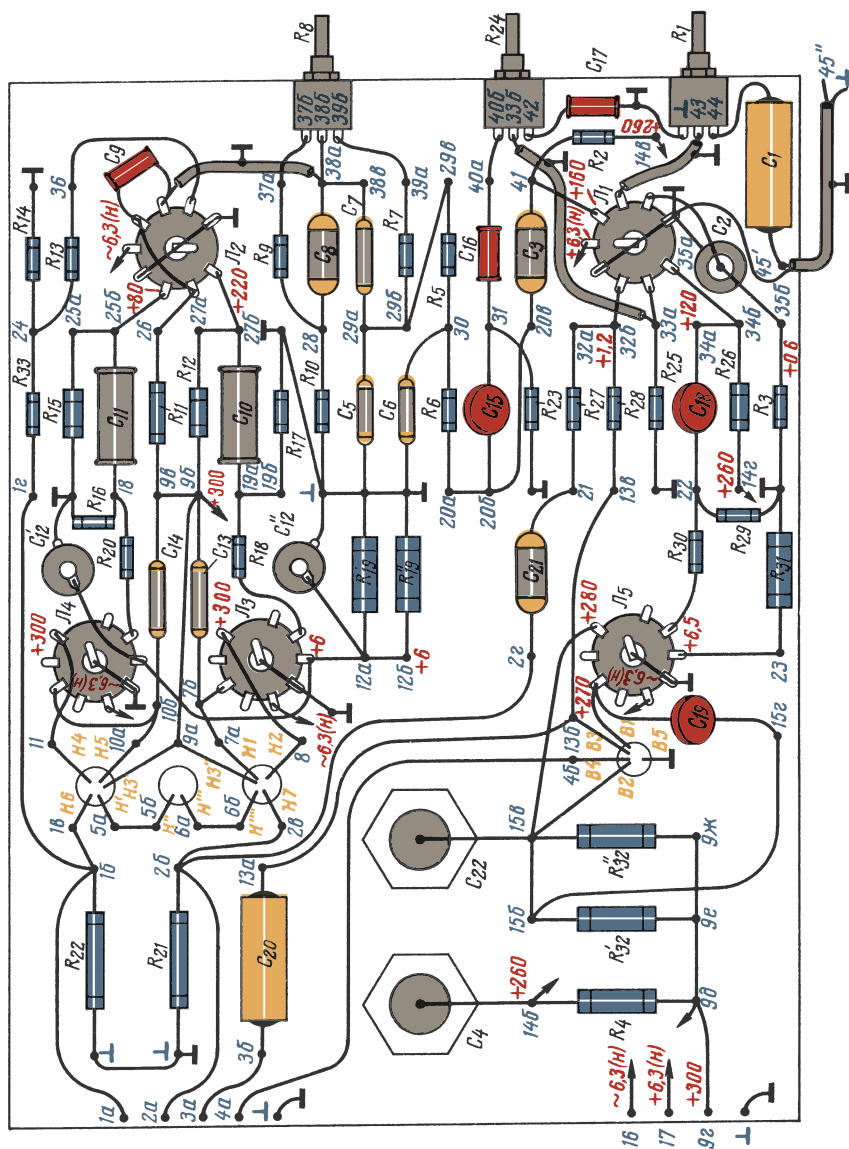


Рис. 63. Двухканальный усилитель — монтажная схема.

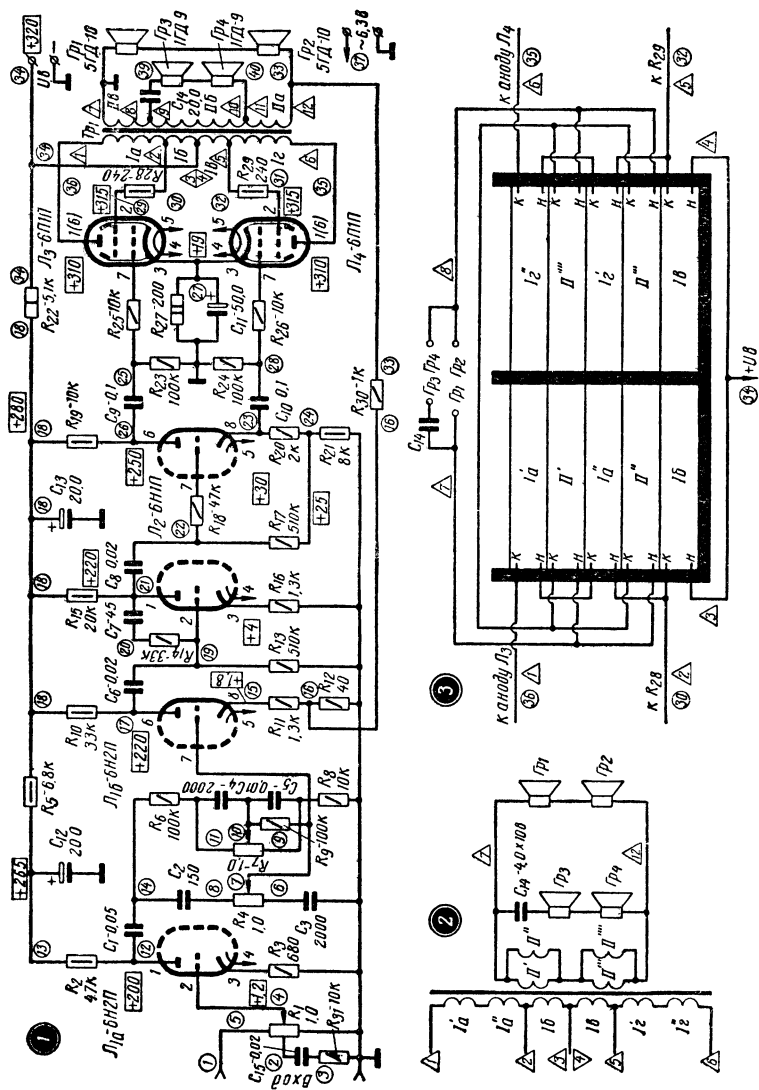


Рис. 65. Двухтактный усилитель — принципиальная схема.

длинноволновую либо средневолновую катушку (в зависимости от того, на какой волне работает местная радиостанция) от любого фабричного приемника. Можно намотать катушку самому на картонном каркасе, например на охотничьей гильзе. Для длинных волн нужно намотать 300 витков, для средних — 90 витков провода диаметром 0,12—0,15 мм. Настройку контура производят подбором числа витков L_1 и емкости C_2 , а окончательную подстройку — конденсатором C_3 . Если в контуре имеется сердечник, то можно обойтись и без подстроечного конденсатора. Чтобы хоть приблизительно можно было судить о необходимой емкости C_2 , удобно вместо него временно подключить обычный конденсатор переменной емкости. После того как вы добьетесь резонанса, по положению ротора (подвижные пластины) можно будет ориентировочно определить необходимую емкость конденсатора C_2 . Напоминаем, что увеличение емкости, так же, как и увеличение индуктивности, снижает резонансную частоту контура (удлиняет волну).

При недостаточно сильном сигнале местной станции можно собрать приемник с усилителем высокой частоты (рис.

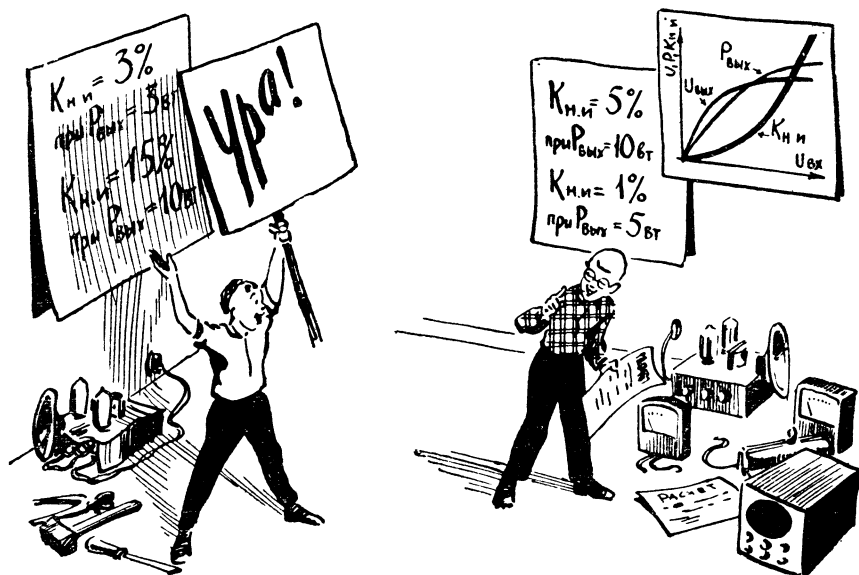


Рис. 66. Для оценки усилителя важно сопоставить выходную мощность и соответствующий ей коэффициент нелинейных искажений; при пониженной мощности нелинейные искажения уменьшаются.



Рис. 67. Радиоузел представляет собой обычный усилитель низкой частоты с необычными входными и выходными цепями; ко входу могут подключаться различные источники сигнала (микрофон, звукозаписывающий аппарат, приемник, трансляционная линия, магнитофон), а к выходу — различные потребители (группы абонентских громкоговорителей, мощные рупорные громкоговорители, звуковые колонки).

68, 9, 6). Улучшение избирательности и чувствительности такого приемника легко получить с помощью положительной обратной связи. Катушка обратной связи L_2 содержит 5—25 витков любого провода и расположена рядом с контурной катушкой. При налаживании следует менять местами концы катушки L_2 и подбирать величину сопротивления R_3 , добиваясь наибольшей громкости и устойчивой работы каскада. Для повышения устойчивости наряду с положительной обратной связью введена еще и отрицательная за счет сопротивления R_4 .

Уделив внимание входным цепям радиоузла, посмотрим теперь, каковы особенности его выходных цепей.

Очень часто выходной каскад усилителя радиоузла работает на два вида нагрузки: на линию, к которой подключены абонентские громкоговорители, и на линию, к которой

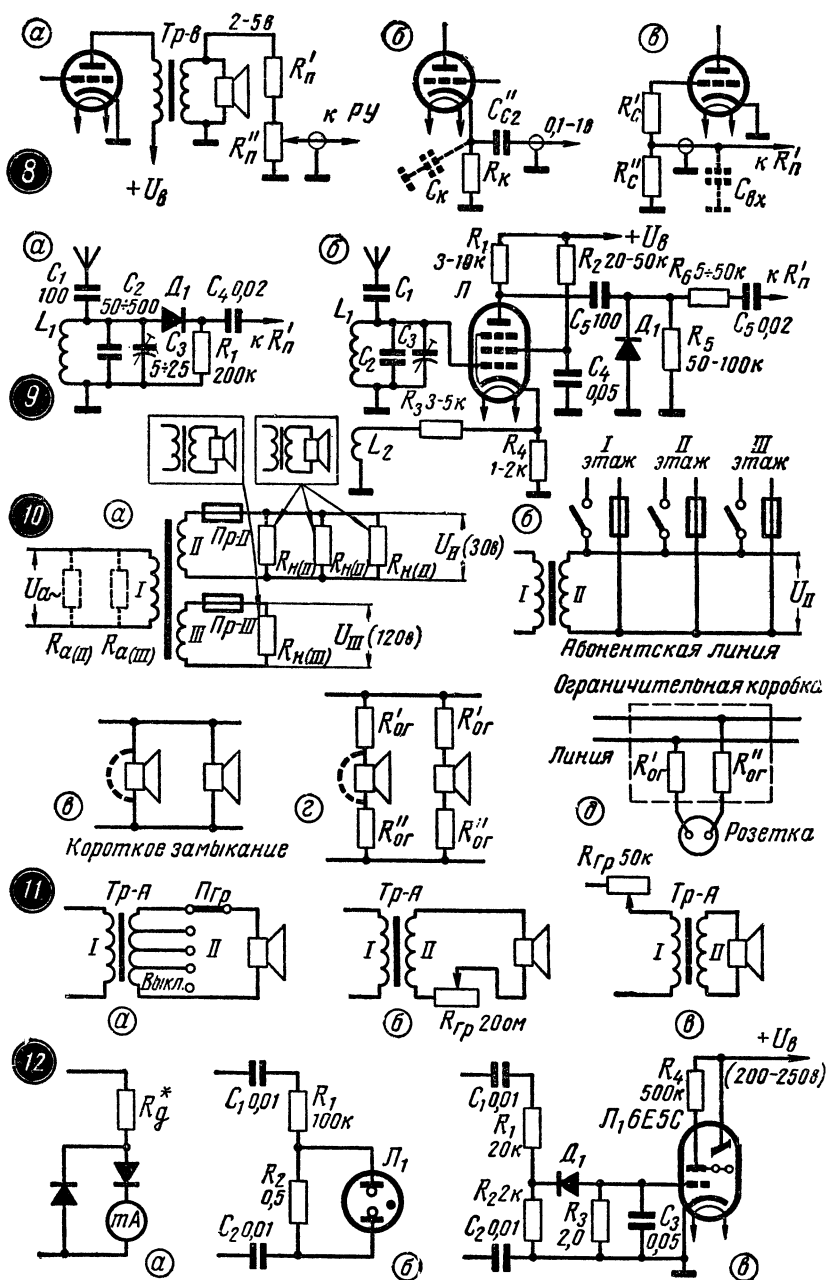


Рис. 68. Продолжение.

подключен мощный рупорный громкоговоритель или звуковая колонка (рис. 68, 10, а). В связи с этим в выходном трансформаторе имеются, как минимум, две вторичные обмотки, которые дают два разных по величине напряжения: 30 в (для некоторых типов абонентских громкоговорителей 15 в), и 120 в (240 в). Если рупорный громкоговоритель предполагается установить на небольшом расстоянии, скажем, не более 10—15 м, — то его можно питать напряжением 30 в и, таким образом, ограничиться выходным трансформатором с одной обмоткой.

Все абонентские громкоговорители подключаются к линии параллельно, подобно тому, как подключаются потребители (лампочки, плитки, холодильники и т. п.) к электросети. При таком подключении каждый из потребителей может стать источником аварии на всей линии. Стоит, например, произойти короткому замыканию в одном из громкоговорителей, как сразу же замолчат все его «коллеги», так как вся линия окажется замкнутой накоротко. Чтобы предотвратить такую неприятность, в электросетях широко пользуются плавкими предохранителями. Как только произойдет короткое замыкание (в патроне лампочки или в проводе утюга), немедленно сгорит предохранитель на щитке электросчетчика или даже в одной из штепсельных розеток, и поврежденный (короткозамкнутый) участок отключится от общей линии.

В радиотрансляционных сетях предохранители применяют только для больших групп громкоговорителей или для сравнительно мощных потребителей (рупор). Отдельные абонентские громкоговорители снабжают ограничительными сопротивлениями (рис. 68, 10, г, д). В этом случае при коротком замыкании в цепи самого громкоговорителя линия уже не будет замкнута, так как между ее проводами окажутся включенными ограничительные сопротивления. Внутри помещения провода абонентской линии прокладывают на большой высоте (под потолком) и непосредственно возле проводов линии устанавливают коробочку с ограничительными сопротивлениями. Обычно в каждый провод включают сопротивление $R_{ог}$ около 70 ом. На линиях школьного радиоузла в виде исключения ограничитель можно и не ставить, рассчитывая на то, что все радиоточки расположены поблизости и любое повреждение можно сравнительно быстро найти и устранить. Правда, по «закону бутерброда» (бутерброд падает на пол всегда маслом вниз!) повреждение может произойти во время самой интересной, самой важной передачи. И вот тут-то вы пожалеете о том, что в свое время поленились поставить ограничительные коробки.

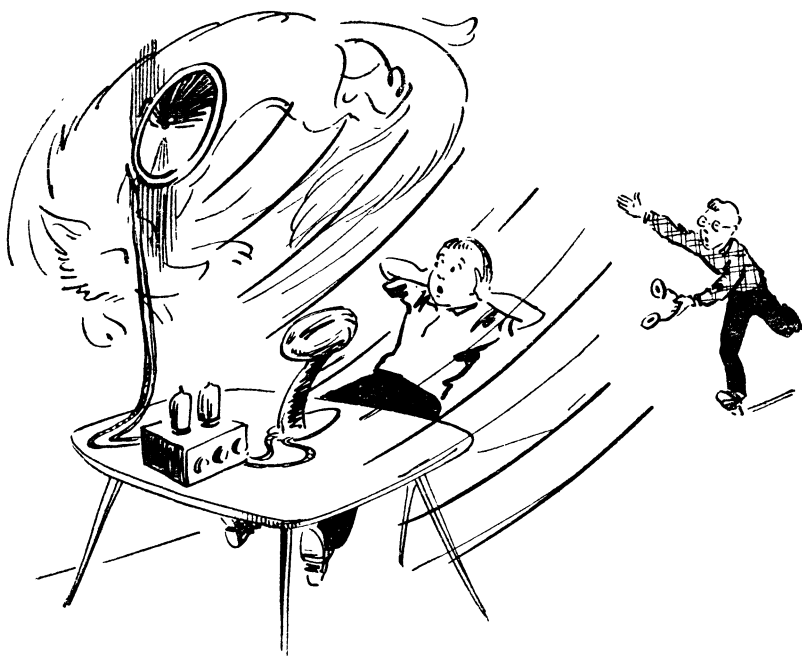


Рис. 69. Звуковые волны, попадая из громкоговорителя в микрофон, создают акустическую обратную связь — связь выходных цепей усилителя с входными через воздушную среду. При сильной акустической связи возникает самовозбуждение звуковоспроизводящей системы.

Весьма удобно, когда абонентские громкоговорители разбиты на сравнительно небольшие группы. Так, например, целесообразно сгруппировать громкоговорители, расположенные на одном этаже школьного здания (рис. 68, 10, б). Это позволит в случае необходимости целиком отключать ту или иную группу. Кроме того, конечно, в каждом громкоговорителе должны быть предусмотрены возможность отключения от линии (штепсельная розетка) и регулировка громкости (рис. 68, 11). Вместо обычной штепсельной розетки можно применить простейший выключатель, вмонтированный в корпус громкоговорителя. Некоторые типы регуляторов громкости одновременно являются и выключателями (рис. 68, 11, а).

Работу усилителя проще всего контролировать с помощью обычного громкоговорителя, установленного в помещении радиоузла. Если в выходном трансформаторе имеется низковольтная обмотка, то непосредственно к ней можно подключить звуковую катушку громкоговорителя. Можно использо-

вать и трансляционный громкоговоритель с выходным трансформатором, подключив его к общей абонентской линии.

Когда ведется передача с микрофона и он установлен в самом помещении радиоузла, то пользоваться контрольным громкоговорителем уже нельзя (рис. 69). Созданные им мощные звуковые колебания попадут в микрофон и, усилившись, вновь пойдут на громкоговоритель. Так возникнет обратная связь громкоговоритель — микрофон. На какой-то частоте эта связь наверняка окажется положительной, и вся система возбудится (проще говоря, «завоет») — радиоузел превратится в генератор. Вот почему при работе с микрофонами контроль следует вести только с помощью головных телефонов-наушников.

Очень удобно контролировать работу радиоузла с помощью какого-либо оптического индикатора. Это может быть стрелочный прибор, например миллиамперметр постоянного тока с выпрямителем (рис. 68, 12, а) из любых полупроводниковых диодов. Такой индикатор можно подключить ко вторичной, а через конденсатор и к первичной обмотке выходного трансформатора. При этом сопротивление R_d^* подбирается с таким расчетом, чтобы при нормальной громкости стрелка совершала колебания на среднем участке шкалы. Чтобы ослабить рывки стрелки, можно зашунтировать прибор конденсатором емкостью в несколько десятков тысяч пикофарад.

Другой простейший индикатор — неоновая лампочка (рис. 68, 12, б). Она загорается лишь после того, как напряжение превысит некоторый порог зажигания. Для распространенных неоновых лампочек этот порог составляет 60—80 в, и поэтому лампочку нужно подключать только к той обмотке, где действует достаточно большое напряжение. Если в выходном трансформаторе нет высоковольтной обмотки для рупорного громкоговорителя, то лампочку-индикатор можно подключить непосредственно к аноду выходной лампы. При небольшом напряжении (тихий звук) лампочка не загорается, а непрерывно вспыхивает и меняет яркость в такт с изменением выходного сигнала. Характер свечения устанавливают подбором сопротивлений делителя R_1R_2 .

Можно собрать индикатор выходного сигнала с «глазком» — лампой 6Е5С или 6Е1П (рис. 68, 12, в). Питается лампа от выпрямителя самого радиоузла, и на ее сетку подается предварительно выпрямленный низкочастотный сигнал. Сопротивления делителя подбирают с таким расчетом, чтобы теневой сектор почти полностью закрывался при номинальном напряжении на выходе радиоузла. Несколько уменьшив R_3 и

С_з, можно добиться того, что во время передачи ширина теневого сектора будет непрерывно меняться в такт с изменением уровня выходного сигнала.

Расчет выходного трансформатора для радиоузла производится так же, как и расчет обычного выходного трансформатора, к которому подключаются два разных громкоговорителя (рис. 74). Роль одного из них будет играть рупор или звуковая колонка, роль другого — все абонентские громкоговорители.

Общее сопротивление абонентской цепи вычисляют, исходя из того, что сопротивление каждого громкоговорителя равно 8 *ком*. Строго говоря (рис. 30, 8, *г*), это сопротивление составляет 9 *ком* (напряжение 30 *в*, мощность 0,1 *вт*), но мы считаем, что нагрузка несколько больше, и таким образом учитываем потери. Если применяются громкоговорители мощностью 0,25 *вт*, то сопротивление каждого из них составляет 3 *ком*. Нетрудно подсчитать сопротивление и для линейного напряжения 15 *в*. Чтобы подсчитать входное сопротивление всей линии, а именно оно и служит нагрузкой выходного каскада, нужно сопротивление одного громкоговорителя разделить на общее их число. Это обычный прием для вычисления общего сопротивления одинаковых элементов, соединенных параллельно. Так, например, 20 громкоговорителей мощностью 0,1 *вт* (сопротивление 8 *ком*) следует рассматривать как нагрузку с сопротивлением 400 *ом*, потребляющую мощность немногим более 2 *вт*.

Сопротивление десятиваттного рупорного громкоговорителя при напряжении 240 *в* составляет 5,8 *ком*, при напряжении 120 *в* — 1,45 *ком* и, наконец, при 30 *в* — 90 *ом*.

В случае когда к радиоузлу подключаются и рупор, и абонентские громкоговорители, выходной трансформатор удобно рассчитывать следующим упрощенным способом.

Сначала нужно проверить, хватит ли мощности усилителя на то, чтобы «прокормить» всех своих потребителей. При нехватке выходной мощности громкоговорители будут работать тише, чем в нормальных условиях. Избыток мощности также нежелателен, так как в этом случае сопротивление анодной нагрузки будет отличаться от оптимального, и в результате несколько повысятся искажения.

Проверив мощность, можно подсчитать примерную величину номинального переменного напряжения U_1 на первичной обмотке выходного трансформатора.

Для однотоковой схемы оно составляет 60% от постоянного ($U_1 \approx 0,6U_{a0}$), а для двухтактной схемы на 20% больше постоянного ($U_1 \approx 1,2U_{a0}$). Откуда взялись эти цифры?

Уже говорилось (рис. 53, 2), что коэффициент использования анодного напряжения не может быть больше единицы. Для выходных каскадов усилителей НЧ этот коэффициент обычно составляет 0,9, то есть можно считать, что переменное напряжение на аноде составляет 90% от постоянного. Но ведь здесь речь идет об амплитуде переменного напряжения — именно она входит в определение коэффициента. Чтобы получить эффективное значение, нужно амплитуду умножить на 0,7 (рис. 30, 9, з). В итоге и получается, что эффективное переменное напряжение на первичной обмотке выходного трансформатора равно 0,6 от постоянного напряжения U_{a0} на аноде ($0,9 \cdot 0,7 \approx 0,6$). Это для однотактной схемы, а для двухтактной переменное напряжение вдвое больше ($0,6 \cdot 2 = 1,2$).

Если известно переменное напряжение на первичной обмотке трансформатора U_1 , то нетрудно подсчитать, каким должен быть коэффициент трансформации n , чтобы получить то или иное напряжение на вторичной обмотке (или вторичных обмотках).

Пример. На двухтактный выходной каскад подается постоянное анодное напряжение 250 в; первичная обмотка выходного трансформатора содержит 2000 витков (с отводом от середины). Находим: эффективное переменное напряжение на первичной обмотке $U_1 = 1,2U_{a0} = 300$ в; обмотка абонентской линии (30 в) должна иметь 200 витков (коэффициент трансформации $n=0,1$), а обмотка рупорного громкоговорителя на 120 в — 800 витков ($n=0,4$).

Проверку расчета можно произвести так: по полученным данным выходного трансформатора пересчитать все сопротивления нагрузки в первичную цепь и посмотреть, насколько полученная величина соответствует оптимальному сопротивлению анодной нагрузки для выбранного режима (табл. 13). Так, если считать, что в предыдущем примере к выходному трансформатору подключается 20 абонентских громкоговорителей по 0,1 вт ($U_{II}=30$ в; $R_{н(II) общ}=400$ ом) и «колокольчик» ($U_{III}=120$ в; $R_{н(III)}=1450$ ом), то получится, что общая потребляемая мощность составит 12 вт, а общее сопротивление анодной нагрузки 7,5 ком. Эта цифра получена следующим образом. Сначала мы нашли каждое из сопротивлений, пересчитанных в первичную цепь: $R_{a(II)}=400$ ом: $(0,1)^2=40$ ком; $R_{a(III)}=1450$ ом: $(0,4)^2 \approx 9$ ком. Затем было найдено общее сопротивление в цепи первичной обмотки, исходя из того, что все элементы нагрузки нужно рассматривать как параллельно соединенные сопротивления (рис. 30, 7, з).

Несмотря на то что предложенный путь расчета дает весь-

ма приближенные результаты, им можно пользоваться на практике, особенно тогда, когда есть готовый выходной трансформатор и нужно проверить или пересчитать его вторичную обмотку.

Усилитель, выходные трансформаторы, блок питания радиоузла выбираются из расчета его полной нагрузки — подключения всех потребителей. Однако в реальном случае сопротивление нагрузки радиоузла может резко меняться. Как только из сети выключится несколько громкоговорителей, общее сопротивление немного возрастет. Особенно резко будет меняться сопротивление нагрузки при включении или выключении главного потребителя энергии — звуковой колонки или рупорного громкоговорителя. При этом заметно изменится выходное напряжение и громкость звучания громкоговорителей у оставшихся радиоточек. Кроме того, изменится режим выходных ламп, а из-за этого могут возрасти искажения. В некоторых случаях изменение нагрузки может резко ухудшить тепловой режим ламп. Так, например, при полном отключении нагрузки мощность потерь на аноде будет равна всей потребляемой от выпрямителя мощности. В результате аноды могут сильно раскалиться и лампы выйдут из строя. (Внимание редактора радиогазеты! Вот к чему могут привести неинтересные передачи!) Поэтому усилитель, особенно мощный, нельзя оставлять без нагрузки, а при налаживании следует включать некоторый ее эквивалент.

Кстати говоря, мы уже встречались с неприятными последствиями изменения сопротивления нагрузки — ведь сопротивление любого электродинамического громкоговорителя меняется с частотой (рис. 14, 4). Было отмечено, что хорошим «лекарством» в этом случае является отрицательная обратная связь, она как бы стабилизирует режим усилительного каскада, ослабляет вредное влияние изменяющейся нагрузки.

5 + 10 + сколько угодно

Сейчас мы с вами рассмотрим конкретную схему простого школьного радиоузла (рис. 45). Одна из главных задач, которая ставилась при разработке этой радиолюбительской конструкции, состояла в том, чтобы максимально использовать детали, имеющиеся в продаже. Прежде всего это касалось силовых и выходных трансформаторов, для изготовления которых любителю не всегда легко найти нужные трансформаторные пластины и намоточный провод.

Из многих типов силовых трансформаторов, как правило,

легче всего достать трансформаторы от радиоприемников первого или второго класса, таких, как «Дружба», «Байкал», «Октава» и др. Эти трансформаторы могут обеспечить мощность выпрямленного тока 10—20 *вт*, и поэтому с их помощью можно питать усилитель с выходной мощностью 3—12 *вт*. Нужно сказать, что для школьного радиоузла такой мощности может и не хватить. Так, в частности, даже такая небольшая нагрузка, как 20 радиоточек, установленных в классах, и один «колокольчик», вывешенный у входа в школу, уже требует 12—15 *вт*. А что делать, если понадобится установить в школьном зале еще две-три звуковые колонки или радиофицировать спортивную площадку? Здесь может понадобиться усилитель с выходной мощностью 20, а то и все 50 *вт*. Но как совместить требование большой мощности с возможностью использовать только маломощные силовые трансформаторы?

Одним из возможных решений задачи является блочная схема, которая и была выбрана для нашего радиоузла.

В радиоузле имеются два усилительных блока: однотактный усилитель мощностью 5 *вт*, который мы в дальнейшем будем называть «блок 5У», и двухтактный десятиваттный усилитель — «блок 10У». Первый рассчитан на подключение 20 громкоговорителей, второй — на десятиваттный рупор. Без особых изменений схемы мощность блока 10У может быть повышена до 15 и даже до 20 *вт*. Для каждого усилительного блока есть свой выпрямитель сравнительно небольшой мощности: для блока 5У — выпрямитель 5В, для блока 10У — выпрямитель 10В. Каждый имеет свой выключатель сети, и поэтому блок 10У можно выключить, не выключая 5У.

Особенность схемы состоит в том, что блок 5У является вполне законченным маломощным радиоузлом и может работать самостоятельно. Именно в этом блоке сосредоточены все регулировки, к нему подключаются все источники сигнала. Что же касается блока 10У, то это лишь своего рода умушнитель. Он получает программу с выхода пятиваттного усилителя и без него работать не может. В случае необходимости к пятиваттному усилителю 5У можно подключить не один, а несколько одинаковых блоков 10У (разумеется, каждый со своим выпрямителем!) и таким образом в несколько раз повысить общую выходную мощность радиоузла.

Выходной каскад блока 5У собран на лампе 6ПЗС, которую при необходимости без каких-либо изменений схемы блока можно заменить и другой аналогичной лампой, например, 6П14П. Такая «старая» лампа 6ПЗС выбрана потому, что, по сравнению с другими широко распространенными вы-

ходными лампами, она отдает несколько бо́льшую мощность. А в блоке 5У каждый лишний ватт выходной мощности — это возможность дополнительного подключения еще 10 громкоговорителей. Попутно заметим, что к усилителю можно подключить и большее число громкоговорителей, чем это следует из нормы 0,1 *вт* на каждый громкоговоритель. Однако не забудьте, что при значительной перегрузке усилителя вам придется мириться с заметным уменьшением громкости каждой радиоточки. Это произойдет не только за счет увеличения числа «едоков», но также из-за уменьшения «общего котла» — дело в том, что при перегрузке падает выходная мощность усилителя.

Первый каскад в блоке 5У — это микрофонный усилитель, собранный на пентоде 6Ж8. Два последующих каскада — обычные усилители напряжения, собранные на двойном триоде 6Н8С. Микрофонный усилитель «по совместительству» является еще и простейшим приемником. Детектирование сигнала происходит в сеточной цепи лампы, а в анодной цепи на сопротивлении R_3 выделяется усиленное низкочастотное напряжение. Конденсатор C_{20} «срезает» и не пропускает к следующему каскаду высокочастотные составляющие протектированного сигнала.

С анодной нагрузки L_1 низкочастотное напряжение (это может быть усиленный сигнал с приемника либо с микрофона) подается на второй, затем и на третий каскад усилителя напряжения. Напряжение со звукоусилителя подается непосредственно на сетку второго каскада (левый триод лампы L_2). В сеточную цепь третьего каскада включен общий регулятор уровня R_{12} . Кроме того, имеются отдельные регуляторы уровня в цепи микрофона (R_1) и звукоусилителя (R_8). Регулировка уровня при приеме радиостанций осуществляется сопротивлением R_{12} . Напряжение на анод лампы L_1 подается через дополнительный фильтр R_4C_4 , так как для первого каскада требуется особо тщательная фильтрация выпрямленного напряжения. Кроме того, фильтр R_4C_4 предотвращает паразитную, обратную связь между каскадами через цепи питания. Без этого фильтра, а часто, к сожалению, и с ним может возникнуть самовозбуждение усилителя.

Все сопротивления регуляторов уровня объединены с выключателями. Один из них, Bk_3 , объединенный с общим регулятором уровня R_{12} , включает радиоузел в сеть, то есть подает напряжение на силовой трансформатор Tr_3 . Два других выключателя, Bk_1 и Bk_2 (совмещены с регуляторами уровня R_1 и R_8), замыкают накоротко колебательный контур приемника. Контакты обоих выключателей разомкнуты только тогда,

когда движки регуляторов находятся в крайнем нижнем положении, то есть тогда, когда ни с микрофона, ни со звуко-снимателя на вход усилителя сигнал не поступает. Схема позволяет вести передачу — речь на фоне музыки. Для включения микрофона либо звуко-снимателя достаточно опустить в крайнее нижнее положение соответствующий регулятор уровня R_1 или R_8 . Магнитофон можно включить в те же гнезда, что и звуко-сниматель. Лучше, конечно, установить для магнитофона дополнительную пару гнезд, а его сигнал с помощью делителя уравнивать с сигналом звуко-снимателя (рис. 68). Таким же образом подводится к радиоузлу сигнал с настоящего радиоприемника. Весьма удобно ввести в схему переключатель программ (рис. 68, 1). Но не забывайте, что этот переключатель находится в цепи с низким уровнем сигнала и поэтому очень «боится» наводок. Все провода, идущие к нему, а иногда сам переключатель нужно тщательно экранировать.

Питание блока 5У осуществляется от обычного кенотронного выпрямителя, в котором используется силовой трансформатор от приемника «Урал-57». Как уже говорилось, возможно использование любого другого аналогичного трансформатора. Фильтр выпрямителя трехзвенный. В первое звено желательнее вместо сопротивления R_{19} включить дроссель.

Теперь несколько слов об особенностях схемы и конструкции блоков 5У и 5В.

Выбранная упрощенная схема переключения программы имеет некоторые недостатки: сопротивления R_1 и R_8 нужно подобрать с таким расчетом, чтобы они полностью выключали микрофон и звуко-сниматель. В некоторых экземплярах сопротивлений движков не доходит до самого конца графитовой дужки, и вместо полного выключения они будут давать лишь резкое уменьшение уровня входного сигнала.

При включении микрофона к входной цепи лампы L_1 оканчивается подключенным конденсатор C_3 , который несколько заваливает частотную характеристику в области высших частот. Для того чтобы свести к минимуму этот завал, емкость C_3 должна быть как можно меньше. Кроме того, желательно уменьшить сопротивление R_2 , а также включить между ним и конденсатором еще одно сопротивление в 20—50 ком. Данные всех перечисленных деталей лучше всего уточнить при налаживании приемника, так как эти данные в значительной степени зависят от частоты принимаемой станции. В некоторых случаях может понадобиться включить между анодом и конденсатором C_5 дополнительное фильтрующее сопротивление 10—20 ком.

Если окажется, что в усилителе имеется значительный запас усиления, то имеет смысл несколько уменьшить сопротивление нагрузки R_3 и R_9 . Можно ввести отрицательную обратную связь, исключив конденсаторы C_8 и C_{10} . И конечно, при первой же возможности следует охватить отрицательной обратной связью выходной каскад. Для этого нужно сопротивление R_{15} заменить делителем и на нижнюю его часть подать (через гасящее сопротивление, рис. 39, б) напряжение с низковольтной обмотки трансформатора Tr_1 .

Выходной трансформатор Tr_1 блока 5У должен давать напряжение 30 в, которое поступает на абонентскую линию. В этом трансформаторе имеется низковольтная обмотка II на 2—5 в для включения контрольного громкоговорителя или головных телефонов. К этой обмотке можно также подключить стрелочный индикатор уровня. В тридцативольтовой обмотке имеются две одинаковые секции IIIа и IIIб, каждая из которых дает напряжение 15 в относительно средней точки. Это сделано в расчете на то, что с Tr_1 противофазные (опять-таки относительно средней точки) напряжения будут подаваться непосредственно на сетки двухтактного выходного каскада мощного усилителя. Таким образом, выходной каскад блока 5У одновременно является фазоинвертором для блока 10У. При анодном напряжении 250 в и классе усиления АВ переменное (эффективное) напряжение на сетке каждой лампы 6П14П должно составлять 7,5 в. Оно снимается с отводов (на схеме не указаны) от половины каждой секции IIIа и IIIб. Но если вы захотите получить от блока 10У большую мощность (при более высоком анодном напряжении, вплоть до 20—30 вт), его необходимо перевести в класс усиления АВ₂ или даже В₂. Для этого нужно увеличить отрицательное смещение (до 15—17 в) и повысить переменное напряжение на сетках. В этом случае сигнал на сетки ламп нужно будет подавать не с отводов, а с крайних выводов обмотки III, и в сеточную цепь каждой лампы включить последовательное ограничительное сопротивление 200—500 ом.

В качестве Tr_1 используется выходной трансформатор от радиолы «Дружба» («Люкс»). Его первичная обмотка остается без изменений — она полностью включается в анодную цепь лампы 6П3С. Вторичную обмотку нужно частично заменить. Дело в том, что вторичная обмотка этого трансформатора разбита на две части и одна из них для уменьшения индуктивности рассеивания помещена между секциями первичной обмотки. Внутренняя часть вторичной обмотки, естественно, остается, и она используется в качестве обмотки II. Наружная часть вторичной обмотки удаляется, и вме-

сто нее укладывается обмотка III с тремя отводами. После переделки трансформатор Tr_1 имеет следующие данные: сердечник III-19×28; обмотки I—2280 витков провода ПЭ-0,15; II—70 витков провода ПЭ-0,38; III (новая обмотка) — 150+150+150+150 витков провода ПЭ-0,31. Совершенно очевидно, что для изготовления Tr_1 можно взять и любой другой трансформатор с аналогичным сечением сердечника и аналогичной по числу витков и сечению провода первичной обмоткой. Во всех случаях обмотка III (полностью) должна содержать примерно в четыре-пять раз меньше витков, чем обмотка I. Иными словами, коэффициент трансформации должен быть примерно равен 0,25—0,2.

К особенностям выпрямителя 5В нужно отнести сопротивление R_{20} . По нему проходит весь анодно-экранный ток усилителя 5У, и на этом сопротивлении возникает постоянное напряжение 12—16 в. Точная величина этого напряжения определяется режимом ламп усилителя, а значит, и данными силового трансформатора Tr_3 .

Напряжение, возникающее на R_{20} , «минусом» подается на сетки ламп блока 10У и служит у них отрицательным смещением. Это напряжение не зависит от режима самого блока 10У, и поэтому его принято называть независимым или, иначе, фиксированным смещением. Независимое смещение, в отличие от автоматического (за счет анодного тока, проходящего по сопротивлению, включенному в катодную цепь), позволяет установить любой класс усиления, в том числе и класс В. Кроме того, переход с автоматического смещения на независимое несколько повышает выходную мощность усилительного каскада (табл. 13). Напряжение, которое терялось на катодном сопротивлении, теперь добавляется к общему напряжению между анодом и катодом. Чтобы тщательно отфильтровать постоянное напряжение, которому суждено попасть на управляющие сетки ламп, применяется эффективный фильтр $C_{18}R_{21}$. На частоте 100 гц (самая низкая, а значит, и самая опасная частота пульсации) емкостное сопротивление конденсатора примерно в 1000 раз меньше, чем сопротивление фильтра R_{21} .

Блок 10У представляет собой двухтактный усилитель, собранный по обычной схеме. В качестве выходного трансформатора без всякой переделки используется силовой трансформатор от приемника «Рекорд-53». Его сетевая обмотка выполняет роль обмотки I выходного трансформатора Tr_2 ; средней точкой служит отвод «110 в». С повышающей обмотки (в нашем трансформаторе Tr_2 это обмотка II) снимается низкочастотное напряжение 120 в, которое подводится к ру-

порному громкоговорителю. Вполне возможно применение и другого трансформатора в качестве Tr_2 . Если в анодные цепи ламп L_1 и L_2 будет включаться сетевая обмотка бывшего «силовика», то нужно убедиться в том, что обе ее секции намотаны одним и тем же проводом. Если же на роль Tr_2 будет выбран силовой трансформатор, рассчитанный на двухполупериодный выпрямитель, то повышающую обмотку, имеющую отвод от средней точки, можно использовать в качестве обмотки I, а сетевую — в качестве обмотки II. Во всех случаях накальная обмотка силового трансформатора (обмотка III трансформатора Tr_1) нужна для того, чтобы охватить усилительный каскад отрицательной обратной связью по напряжению.

Обратная связь подается с выхода блока 10У на вход оконечного каскада блока 5У. Такая схема обратной связи весьма проста и удобна: подбором сопротивления R_{16} можно легко менять напряжение обратной связи. Однако приведенная схема обладает одним серьезным недостатком — посторонние гармоники, которые возникают в блоке 10У в чистом виде, попадают на выход блока 5У. Здесь эти гармоники совсем не нужны — им «не в кого стрелять», нечего компенсировать. Вот почему при такой схеме отрицательная обратная связь уменьшает искажения в блоке 10У и, к сожалению, увеличивает искажения в блоке 5У. Опыт показывает, что искажения возрастают не очень сильно, всего на 1—2%, и с этим, пожалуй, можно мириться. Но после того как радиоузел налажен, можно попробовать избавиться от этих добавочных искажений, изменив схему отрицательной обратной связи. Проще всего применить схему, где анод и управляющая сетка связаны непосредственно через последовательную RC-цепочку (рис. 39, б). Емкость конденсатора должна составлять около 0,001 мкф, а сопротивление — 50—200 ком.

Существует и другой, более радикальный путь: можно снабдить блок 10У отдельным фазоинвертором и освободить от этой работы выходной каскад 5У. Для этого на самой панели 10У устанавливается еще одна лампа — любой триод или пентод небольшой мощности, и в его анодную цепь включается междупламповый трансформатор с сечением сердечника 2—3 см². Первичная обмотка трансформатора должна содержать около 1000—1500 витков провода ПЭ-0,1 (и толще), вторичная — примерно столько же витков, но с отводом от середины. Чтобы трансформатор не вносил значительных частотных искажений, его первичную обмотку нужно сильно зашунтировать, подключив параллельно ей сопротивление 10—20 ком. Такой трансформатор можно изготовить на базе

любого выходного трансформатора, удалив с него вторичную обмотку и несколько уменьшив число витков первичной обмотки. Напряжение на сетку фазоинвертора подается с делителя, включенного в сеточную цепь лампы L_3 вместо R_{15} . В качестве R_{15} целесообразно применить переменное сопротивление. С его помощью можно менять переменное напряжение на сетках ламп L_4 и L_5 .

Основная схема усилителя (рис. 45) позволяет менять режим только подбором постоянного смещения (регулируется сопротивлением R_{20}).

Схема выпрямителя 10В, по-видимому, не требует никаких пояснений. Здесь, так же как и в блоке 5В, используется силовой трансформатор от приемника «Байкал». Возможно применение любого другого аналогичного трансформатора. В частности, силовой трансформатор от «Дружбы» позволит заметно поднять постоянное напряжение, а значит, и выходную мощность.

Конструктивно радиоузел выполнен в виде четырех блоков, размещенных на деревянной раме. Панели для каждого блока изготовлены из трехмиллиметровой фанеры. Панель блока 5У желательно сделать из листового алюминия или стали толщиной 1—2 мм. В этом случае основные детали размещаются на фанерной плите с лепестками. В каждом блоке имеются монтажные гребенки (на рис. 45 они обозначены зеленым), через которые блоки соединяются между собой. Кроме того, на панелях имеется большое число монтажных лепестков.

Сверху весь радиоузел закрывают кожухом, в котором обязательно должны быть сделаны вентиляционные отверстия. Однако верхняя панель (точнее, верхние панели — у каждого блока своя небольшая панель) закрывается кожухом не полностью. Остается открытой передняя часть панелей, где установлены регуляторы уровня, выключатели, сигнальные лампочки. Здесь же удобно установить какой-либо из индикаторов выхода. Лучше, конечно, для каждого усилительного блока иметь свой индикатор, но в крайнем случае можно обойтись и одним индикатором, подключая его то к одному, то к другому выходу. Сзади усилителя остается открытой небольшая часть верхних панелей, где находятся зажимы для подключения абонентской линии, идущей к мощному громкоговорителю, и предохранители блоков питания.

Радиоузел может быть установлен в любом помещении, но, конечно, помещение это нужно выбирать так, чтобы в него попадало как можно меньше шума [18]. Дверь нужно тщательно обить плотной материей. Над дверью надо пове-

силь светящийся транспарант: «Тише. Микрофон включен». С помощью простейшего реле можно сделать так, что этот транспарант будет включаться одновременно с микрофоном.

Кроме хорошей изоляции от посторонних внешних шумов, полезно также улучшить акустические характеристики самого помещения радиоузла. Когда передача идет из обычной, не приспособленной для этого комнаты, у звука появляется неприятная гулкость. Происходит это потому, что в микрофон попадают звуковые волны, отраженные от стен, потолка, пола. Вот эти отраженные волны, которые особенно сильны в пустом помещении, попадают в микрофон с некоторым опозданием и ухудшают качество звучания.

Помещение, специально подготовленное для радио- или телевизионных передач, называют студией. Акустическая подготовка студии весьма сложна: в ней устанавливают большие щиты, с помощью которых направляют движение звуковых волн; стены студии закрывают многослойными звукопоглощающими покрытиями. Да и сама архитектура студии определяется необходимыми акустическими характеристиками.

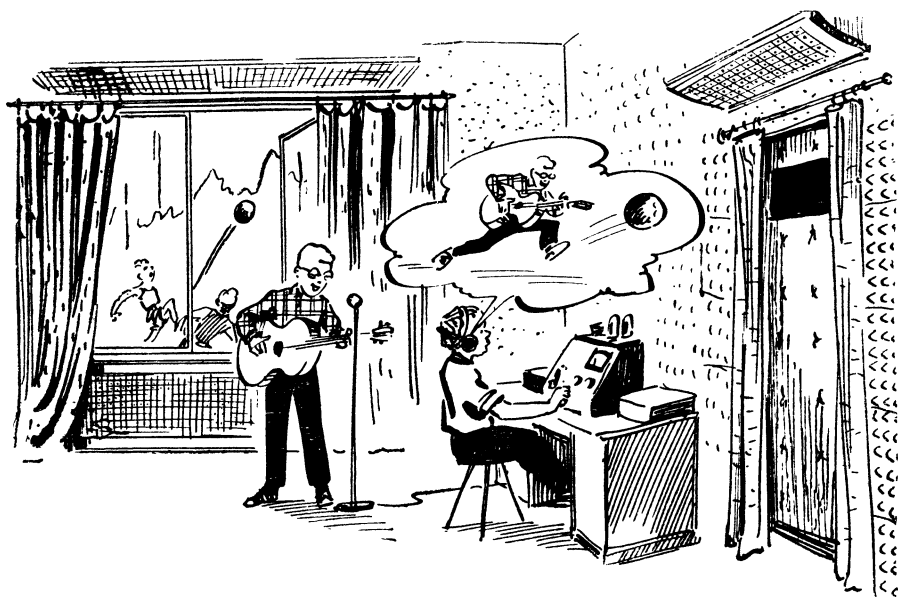


Рис. 70. Помещение, откуда ведутся радиопередачи (студия), полезно оборудовать звукопоглощающими щитами; звукопоглощающим материалом целесообразно покрыть стены; студия должна быть тщательно изолирована от внешних шумов.

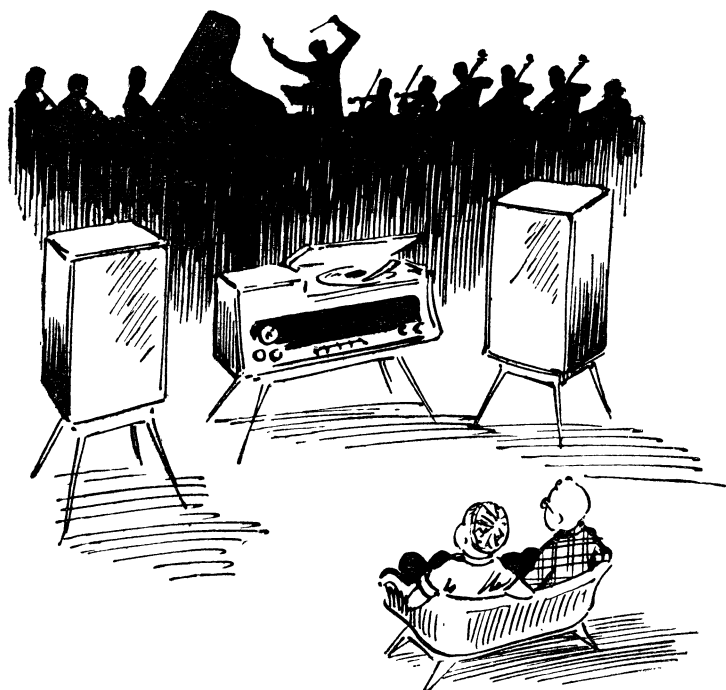
Разумеется, для школьного радиоузла трудно построить студию со сложным акустическим оформлением, однако установить в ней несколько звукопоглощающих щитов весьма полезно. Простые щиты можно сделать из двух деревянных реек, на которые набиты листы фанеры или картона. В фанере (или картоне) нужно сделать большое число отверстий диаметром около 1 см. Вместо дырчатой фанеры (картона) еще лучше применить материал с неровной поверхностью, например картонные (бугристые) прокладки для упаковки яиц. Нужно сказать, что акустические характеристики таких прокладок весьма высоки, и они представляют собой прекрасный материал для покрытия стен студии.

Настоящие студии отделены от помещения, где находится усилительная аппаратура, и техник может видеть дикторов и артистов только через звуконепроницаемое окно. На школьном радиоузле можно обойтись и без этой «роскоши» — установить всю аппаратуру в самой студии (рис. 67, 70).

И, наконец, последнее замечание.

Очень плохо, если велосипедист невнимателен на дороге, — это может иметь весьма неприятные последствия. Но, конечно, в десять, в сто раз опаснее, если растяпа сядет за руль автомобиля или автобуса, в котором едет много пассажиров. Вот почему на автобусах могут работать только водители высокого класса, имеющие большой опыт. Всякий, кто решился построить школьный радиоузел, может сравнить себя с шофером автобуса — в ваши руки попадает техника, оценку которой будет выставлять большое число людей. Вы можете как угодно относиться к постройке своего собственного приемника, но к изготовлению и монтажу радиоузла должны отнестись с максимальным вниманием, все работы выполнять аккуратно, тщательно проверять надежность креплений, паек, не жалеть времени на налаживание усилителей.

С некоторыми простейшими методами налаживания, позволяющими «выжать» из усилителя нужную мощность и свести к минимуму различные виды искажений, вы познакомитесь в конце следующей главы.



Г л а в а V

ВВВ—ВЫСОКАЯ ВЕРНОСТЬ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ

Около сорока лет назад начали работать первые радиовещательные станции, у жителей городов и деревень стали появляться простейшие, как правило, детекторные приемники. Просматривая газеты того времени, можно найти в них фотографии, на которых изображены первые радиослушатели. Склонившись над небольшим деревянным ящиком, прижав к уху головной телефон (наушник), смотрят на вас с фотографии люди со счастливыми, горящими глазами, с нескрываемым выражением удивления и восхищения.

Некоторое время спустя появились ламповые приемники с маломощными громкоговорителями, которые тогда называли репродукторами. Такой приемник уже могли слушать сра-

зу несколько человек. По вечерам вокруг него обычно собиралась вся семья, чтобы послушать музыку, прилетевшую за сотни, а то и за тысячи километров. Люди ходили в гости к обладателям приемников специально, чтобы посмотреть на волшебное радио. Приемники устанавливали в клубах и красных уголках и устраивали коллективное прослушивание передач — радиоконцерты.

Прошли годы. Приемники, а затем радиолы, магнитофоны, магнитолы стали привычным явлением — сегодня в нашей стране их количество исчисляется десятками миллионов. Но дело, разумеется, не только в количестве. Резко шагнула вперед техника радиоприема и звукоусиления, и никого сейчас уже не может удивить «просто приемник». Радиослушатели научились ценить такие качества приемника, как чувствительность, избирательность, «архитектурное оформление», точность настройки, удобство управления, надежность. И конечно, одно из самых главных качеств, определяющих достоинства современного приемника, так же как и любого другого звуковоспроизводящего аппарата, — это высокая верность воспроизведения (сокращенно ВВВ). За рубежом высококачественное звучание сокращенно называют «Хи-Фи» (Hi-Fi). Это название первых букв слов: High Fidelity (Хай Фиделити), что в переводе с английского означает «высокая верность».

Идеальной системой ВВВ можно считать такую, которая воспроизводит звук вообще без искажений, создает звуковое поле точно такое же, как и перед микрофоном. При этом должен остаться неизменным спектр звука, соотношение его отдельных составляющих, динамический диапазон громкости, распределение звуковых волн в пространстве. Одним словом, воспроизводимый звук должен быть точной, неотличимой копией «настоящего», того, который звучит в месте передачи — в концертном зале или в студии.

Борьба за высококачественное звучание, за высокую верность воспроизведения звука ведется на различных направлениях. Главный фронт этой борьбы проходит в лабораториях конструкторов и технологов, где создаются новые материалы для диффузоров и трансформаторов, новые конструкции ламп и громкоговорителей, новые схемы усилителей, где ведется борьба за снижение каждого процента $K_{н.и}$ и каждого децибела $K_{ч.и}$.

Во всех предыдущих разделах мы часто говорили о том, какими путями можно улучшить качество звучания, снизить разного рода искажения. В ряде случаев именно на это были направлены наши главные усилия и из этих соображений мы

выбирали схему усилителя, конструкцию акустического агрегата, элементы коррекции и регулировки.

Некоторым проблемам улучшения качества звучания и путям борьбы за высокую верность воспроизведения звука специально посвящена эта глава.

Поиски и находки

Конструкторы ищут пути снижения искажений при усилении, передаче, записи и воспроизведении звука примерно столько же лет, сколько существует эта область радиоэлектроники. В мире выходят сотни радиотехнических журналов, и вот уже на протяжении десятилетий почти в каждом из них непрерывно появляются заметки и статьи о каких-нибудь новинках звуковоспроизведения — новых схемах усилителей или конструкциях акустических агрегатов. Однако не все эти новинки (количество их наверняка исчисляется десятками тысяч) завоевывают признание специалистов, и, уж конечно, далеко не все получают путевку в будущее и находят широкое применение в массовой аппаратуре. Иногда новинкой является небольшая схемная «хитрость», красивая, но не дающая каких-либо существенных улучшений, иногда эффектное, но очень незначительное конструктивное усовершенствование.

Из всех новинок, в разное время появившихся в технике воспроизведения звука, многие навсегда приняты на вооружение и уже стали нормой, превратились в некие обязательные рекомендации и правила. Вспомним некоторые из этих рекомендаций и правил, с которыми мы встречались в предыдущих главах.

Для того чтобы не испортить частотную характеристику усилителя, нужно разумно выбирать элементы его схемы. Не следует чрезмерно увеличивать сопротивление анодной нагрузки и утечку сетки, слишком уменьшать емкость переходного конденсатора, экономить емкость шунтирующего конденсатора катодной цепи автоматического смещения; выходной трансформатор нужно выполнять с достаточной индуктивностью первичной обмотки и минимальной индуктивностью рассеивания; при выборе элементов усилителя удобно пользоваться эквивалентными схемами каскадов.

С помощью RC -, LC - и RL -цепочек, сопротивление которых изменяется с частотой, можно корректировать частотную характеристику усилительного тракта, заваливая либо поднимая ее в том или ином участке.

Цепи с реактивными элементами и в первую очередь RC -

цепочки широко используются для регулировки тембра — для изменения частотной характеристики в зависимости от требований слушателя.

Весьма эффективна отдельная регулировка тембра — завал-подъем частотной характеристики отдельно в области высших и низших звуковых частот.

Чтобы свести к минимуму нелинейные искажения, нужно разумно выбирать режим ламп. Если усилитель работает в классе А, то рабочая точка (начальное отрицательное смещение) должна соответствовать середине прямолинейного участка ламповой характеристики; переменное напряжение на сетке не должно заходить в область нижнего загиба (отсечка) и в область положительных значений (появление сеточных токов).

Усиление в классах В и АВ, а тем более В₂ и АВ₂, возможно только в двухтактных схемах при хорошей их симметрии, в частности при включении ламп с весьма близкими параметрами.

Применение двухтактной схемы снижает нелинейные искажения и в усилителе класса А.

Выходной каскад работает с минимальными искажениями только в том случае, если анодная цепь лампы хорошо согласована с нагрузкой; пересчитанное в первичную цепь выходного трансформатора сопротивление звуковой катушки должно быть равно оптимальному, то есть наиболее выгодному для данной лампы и данного ее режима сопротивлению анодной нагрузки.

Огромный эффект в улучшении частотной характеристики дает акустическое оформление громкоговорителя, в частности акустический экран больших размеров, достаточно большой ящик, акустический фазоинвертор с регулируемой площадью окна.

Существенно улучшает качество звучания ослабление резонансных явлений в громкоговорителе с помощью демпфирования его подвижной системы; эффективный способ акустического демпфирования — заполнение ящика звукопоглощающим материалом; электрическое демпфирование сводится к уменьшению выходного сопротивления усилителя.

Тщательной экранировкой входных цепей и применением некоторых специальных схем можно заметно снизить уровень фона переменного тока и тем самым улучшить такую важную характеристику, как динамический диапазон громкости.

Значительный эффект в улучшении всех характеристик усилителя дает отрицательная обратная связь. Она снижает

нелинейные искажения, уровень фона, в некоторых случаях и выходное сопротивление. Отрицательная обратная связь с использованием реактивных элементов, например конденсаторов, позволяет в широких пределах корректировать частотную характеристику усилителя.

Иллюстрацией всех этих рекомендаций могут служить практические схемы и конструкции, которые вы встречали в книге. Эти схемы и конструкции появлялись в разное время, но и сейчас многие из них (иногда с незначительными изменениями) находят применение в звуковоспроизводящей аппаратуре. А вот несколько еще незнакомых нам схемных решений. Их, пожалуй, нельзя отнести к числу очень популярных, однако эти схемы все же встречаются в любительских, а некоторые из них и в промышленных установках.

Один из способов уменьшения выходного сопротивления двухтактного усилительного каскада — это параллельное включение элементов нагрузки каждого плеча вместо обычного их последовательного включения (здесь речь идет о соединении элементов нагрузки для переменного тока). При обычном, то есть последовательном, включении элементов нагрузки каждого плеча R'_n и R''_n общее сопротивление $R_{n. \text{общ}}$, которое пересчитывается во вторичную обмотку выходного трансформатора и определяет демпфирующее действие выходного каскада, численно равно сумме R'_n и R''_n . Поскольку эти сопротивления равны, можно считать, что общее сопротивление вдвое больше любого из элементов нагрузки R'_n или R''_n (рис. 71, 1, а).

На рис. 71, 1, б упрощенно показана одна из схем параллельного включения R'_n и R''_n . Параллельное включение элементов нагрузки оказалось возможным благодаря тому, что лампы питаются не от общего источника анодного напряжения U_a , а от двух отдельных источников с одинаковыми напряжениями U'_a и U''_a .

Оправдано ли такое усложнение схемы?

При параллельном соединении общее сопротивление одинаковых элементов нагрузки равно половине любого из них. Таким образом, при параллельном соединении общее сопротивление $R'_{n. \text{общ}}$ уменьшается в четыре раза по сравнению с последовательной схемой, а это, в свою очередь, резко улучшает демпфирование громкоговорителя.

Совершенно очевидной для двухтактной параллельной схемы является еще одна особенность: общее оптимальное сопротивление нагрузки, — то есть то сопротивление, которое

громкоговорители с помощью выходного трансформатора должны внести в цепь его первичной обмотки, — также уменьшается в четыре раза. Так, например, если оптимальное сопротивление для одной лампы 6П18П составляет 3 *ком*, то при обычной двухтактной схеме в анодные цепи нужно включить 6 *ком*, а при двухтактной параллельной схеме — 1,5 *ком*. Для некоторых ламп в некоторых режимах оптимальное сопротивление нагрузки составляет всего несколько сот ом. Подобные величины позволяют обойтись вообще без выходного трансформатора.

Для бестрансформаторных выходных каскадов были разработаны высокоомные электродинамические громкоговорители. Звуковую катушку высокоомного громкоговорителя наматывают в несколько слоев очень тонким проводом — его диаметр обычно составляет 0,05 *мм*. Включив последовательно два-три высокоомных громкоговорителя, как раз и получают необходимое сопротивление нагрузки без всякого выходного трансформатора. При этом, естественно, резко улучшаются качественные показатели усилителя, так как выходной трансформатор всегда является источником значительных частотных и нелинейных искажений. Кроме того, выходной трансформатор создает дополнительные сдвиги фаз и таким образом ограничивает предельно допустимую глубину обратной связи (рис. 43).

На рис. 71, 1, *в* показана упрощенная схема подключения нагрузки к двухтактному параллельному выходному каскаду через разделительный конденсатор C_p . Применение C_p позволило отделить нагрузку от постоянных составляющих анодного тока и заменить два анодных выпрямителя одним, но с удвоенным напряжением. Лампы фактически представляют собой делитель, на котором действуют равные части (половина) постоянного напряжения $U_{в. общ.}$.

На рис. 71, 1, *г* приводится одна из возможных практических схем усилителя без выходного трансформатора. В усилителе работают два громкоговорителя 2ГД-6 (Gp_1 и Gp_2 , сопротивление звуковой катушки каждого 250 *ом*). При выходной мощности 2 *вт* нелинейные искажения не превышают 1,5%. Повысив анодное напряжение до 350 *в*, можно получить мощность 6—8 *вт* при $K_{н.н}$ не более 3%. Частотная характеристика подобных усилителей обычно линейна в пределах от 20—30 *гц* до нескольких десятков килогерц. У ряда специалистов существует мнение, что воспроизведение ультразвуковых частот имеет определенный смысл, так как их комбинационные частоты попадают в область слышимого звука, и это заметно способствует повышению естественности звучания.

Высокоомных громкоговорителей пока нет в широкой продаже, а выходные каскады без выходного трансформатора еще не встречаются в массовой аппаратуре: приемниках, усилителях, радиолах. В то же время радиолюбители находят применение этим усилителям, подключая к ним обычные низкоомные громкоговорители с выходными трансформаторами. Выходной трансформатор, разумеется, не позволяет воспользоваться всеми преимуществами двухтактной параллельной схемы, но некоторые ее достоинства проявляются весьма четко. Так, в частности, резко, в несколько раз уменьшается выходное сопротивление усилителя и улучшается демпфирование. Ввиду уменьшения сопротивления нагрузки оказывается возможным упростить конструкцию выходного трансформатора — уменьшить индуктивность первичной обмотки L_1 (рис. 49).

На рис. 71, 2 показана одна из возможных практических схем двухтактного параллельного усилителя с выходным трансформатором, где в последнем каскаде работает мощный двойной триод 6Н5С [15]. Выходная мощность усилителя составляет 2,5 *вт* при нелинейных искажениях 1% и 4 *вт* при нелинейных искажениях 5%; уровень фона 42 *дб*; чувствительность около 250 *мв*; частотная характеристика лежит в пределах 40 *гц* — 12 *кгц* при неравномерности на краях не более 2 *дб*.

Выходной каскад усилителя работает в классе АВ₁. Анодные напряжения на триодах лампы 6Н5С необходимо выравнять с точностью до 3 *в* путем тщательного подбора сопротивления R_{13} . Оно рассчитано на мощность 8—10 *вт* и может быть собрано из четырех двухваттных сопротивлений по 200 *ом*, соединенных последовательно, или по 3,2 *ком*, соединенных параллельно. Оптимальное сопротивление нагрузки выходного каскада — около 200 *ом*. Именно на эту величину и рассчитывают выходной трансформатор Tr_1 .

Предоконечный каскад — это фазоинвертор, выполненный на правом (по схеме) триоде лампы L_2 (6Н9С). Особенность каскада — бесконденсаторная связь с сетками выходных ламп, благодаря которой улучшается частотная характеристика. Режимы всех ламп подобраны с таким расчетом, чтобы постоянные напряжения на аноде и катоде фазоинвертора в точности соответствовали напряжениям на сетках L_3 . Именно поэтому и не нужны разделительные конденсаторы: между анодом и катодом, с одной стороны, и сетками — с другой, нет постоянного напряжения, от которого нужно было бы «защищать». Пусть вас не смущает то, что на управляющих сетках L_3 должен быть «плюс» — положительным напряжением

на сетках можно считать только относительно корпуса. В то же время на каждой сетке действует «минус» — постоянное отрицательное смещение 36 в относительно соответствующего катода ($180 \text{ в} - 144 \text{ в} = 36 \text{ в}$ и $72 \text{ в} - 36 \text{ в} = 36 \text{ в}$).

Выходной трансформатор собран на сердечнике из пластин Ш-20, толщина набора 20 мм. Первая и третья секции трансформатора содержат по 84 витка провода ПЭ-0,51, вторая секция — 336 витков провода ПЭ-0,35. При соединении секций нужно правильно определить начало и конец каждой из них. Трансформатор рассчитан на подключение громкоговорителей с общим сопротивлением 6—10 ом, в частности двух соединенных последовательно громкоговорителей 4ГД-1.

В модернизированном варианте этого усилителя [16] для расширения полосы частот нагрузка первого каскада уменьшена до 240 ком. Соответственно гасящее сопротивление R_5 уменьшено до 1,1 Мом, а сопротивление R_4 — до 1 ком. Смещение при этом повысилось до 1 в. Для увеличения глубины обратной связи изменено соотношение сопротивлений делителя: R_8 увеличено до 8,2 ком и R_{14} уменьшено до 8,2 ком. Несколько увеличена индуктивность первичной обмотки выходного трансформатора — секция II содержит 400 витков. Автоматическое смещение на сетку нижнего (по схеме) триода \mathcal{L}_3 заменено фиксированным. Оно подается от отдельного выпрямителя (рис. 71, 2, б), который собран на плоскостном диоде Д7Ж. Точка А подключается непосредственно к повышающей обмотке силового трансформатора, а выпрямленное напряжение (смещение) подается «минусом» прямо на сетку через фильтр $R_{11}C_{\phi}$ (0,5 мкф и более на 150 в). При этом, естественно, катод нижнего (по схеме) триода \mathcal{L}_3 заземляют. Анодное напряжение на \mathcal{L}_1 и левый триод \mathcal{L}_2 подают с точки «+290 в» через дополнительный развязывающий фильтр из конденсатора 30 мкф на 300 в и сопротивления 8,2 ком на 0,5 вт. На аноде \mathcal{L}_1 должно быть 80 в, а на экранной сетке — 30 в. Все сопротивления R' , R'' и R''' одинаковые — по 33 ком каждое.

Эти изменения несколько улучшили характеристики усилителя. При выходной мощности 6 вт нелинейные искажения составляют 4,5%, а при мощности 4 вт — около 1%; уровень фона снижен до 52 дб; чувствительность повышена до 230 мв; частотная характеристика лежит в пределах от 30 гц до 15 кгц при неравномерности на краях не более 1 дб. Но и в этом случае, по-видимому, не исчерпаны все возможности для дальнейшего совершенствования. Добавив еще один каскад с небольшим коэффициентом усиления, можно повысить чувствительность и применить эффективные схемы регули-

ровки тембра. Они позволяют скомпенсировать завалы частотной характеристики, создаваемые акустическим агрегатом.

Среди других схемных находок можно назвать экспандер — предложенное сравнительно давно устройство для расширения динамического диапазона громкости. По мере увеличения уровня сигнала экспандер повышает усиление и таким образом поднимает уровень самых громких звуков над уровнем самых тихих. Напомним, что реальный динамический диапазон оркестра составляет 70 дб, в то время как при радиопередаче или на фонограмме он сжат до 35—40 дб.

Оригинальная схема экспандера, примененная в одном из зарубежных радиовещательных приемников, показана на рис. 71, 3 [14]. Сам экспандер (L_3L_4) включается между двумя соседними каскадами обычного усилителя напряжения (L_1 и L_2). Первый каскад экспандера (L_3) — это дополнительный усилитель (триодная часть) и выпрямитель (диодная часть) низкочастотного сигнала. Полученное на выходе фильтра выпрямителя напряжение медленно меняется в соответствии с изменением уровня громкости. Это напряжение подается на сетку второй лампы (L_4), которая вместе с сопротивлением R_{10} образует делитель напряжения. С этого делителя выходной сигнал первого каскада усилителя (L_1) подается на сетку второго каскада (L_2). При повышении громкости передачи увеличивается сопротивление нижнего участка делителя, то есть внутреннее сопротивление лампы L_4 . Именно благодаря этому и происходит дополнительное повышение уровня громкости, расширяется динамический диапазон.

Управление экспандером осуществляется с помощью трех клавишей. При нажатии на первую, I, экспандер незначительно расширяет динамический диапазон. При нажатии на вторую, II, расширение диапазона достигает 14 дб, то есть на 14 дб повышается мощность звуков, соответствующих форте-фортиссимо. Третья клавиша, III, выключает экспандер и направляет сигнал с L_1 на L_2 прямым путем. Примененные в экспандере импортные лампы можно заменить отечественными: ЕВС-41 — лампой 6Г2 и ЕМ80 — лампой 6И1П. В процессе налаживания может оказаться необходимым несколько изменить элементы схемы, определяющие режим ламп.

А вот еще одна интересная находка — простое приспособление искусственной реверберации (рис. 71, 4).

Звуковые волны в закрытом помещении исчезают не сразу — многократно отражаясь от стен, они затухают постепенно и благодаря этому создают послезвучание, чем-то напоминающее эхо. Этот процесс и называют реверберацией.

Для количественной оценки введено так называемое стандартное время реверберации — время, в течение которого плотность звуковой энергии уменьшается в тысячу раз. Время реверберации зависит от размеров помещения, а также от того, насколько сильно поглощаются в нем звуковые волны. Так, в пустом концертном зале стандартное время реверберации составляет 1—2 сек, а когда зал заполнен публикой, это время может стать в полтора-два раза меньше. В небольшом жилом помещении время реверберации неумовимо мало, а в огромном и высоком зале Казанского вокзала в Москве время реверберации достигает 6—8 сек, и звук приобретает неприятную гулкость. В концертных залах и особенно в радиостудиях внутреннее архитектурное оформление, выбор отделочных материалов, драпировка стен — все это подчинено требованиям акустики и в том числе созданию необходимого времени реверберации.

Магнитная запись позволяет искусственно увеличивать время реверберации, создавать впечатление большого зала. Делается это так: вслед за основной воспроизводящей головкой пленка проходит еще несколько головок, которые воспроизводят звук с некоторым опозданием. Сигнал в этих вспомогательных головках постепенно ослабляют, и они становятся эквивалентом запаздывающих и постепенно затухающих звуковых волн. Искусственная реверберация, зачастую утрированная, создающая впечатление очень большого гулкого помещения, в последнее время довольно часто используется в радиопередачах, особенно в детских сказках или фантастических рассказах.

Несколько лет назад было предложено несложное приспособление для создания эффекта реверберации при воспроизведении грамзаписей и радиоприеме. Основа этого приспособления — стальная пружина. В одной из радиолюбительских конструкций [17] она изготовлена из рояльной струны диаметром 0,25 мм и длиной около 20 м. Проволоку навивают на болванку и получают пружину длиной около 50—60 см, которая легко уместится в ящике приемника или радиолы. Эта пружина представляет собой акустическую линию задержки — с ее помощью и создается необходимое для искусственной реверберации запаздывание звука.

Одним своим концом пружина прикреплена к якорю микрофона ДЭМ-4м, который в данном случае используется в качестве излучателя звуковых колебаний. К катушке ДЭМ-4м подводится низкочастотное напряжение, якорь начинает колебаться и передает колебания стальной пружине — по ней движется звуковая волна. Через несколько миллисекунд она

приходит к другому краю пружины, к которому прикреплен пьезокристалл из обычного звукоусилителя. Кристалл колеблется и создает запаздывающий электрический сигнал. В дальнейшем он направляется в усилительный тракт, где встречается с основным сигналом.

В действительности описанная система искусственной реверберации устроена и работает несколько сложнее. В частности, для того чтобы раскачать пружину, приходится дополнительно усиливать сигнал (рис. 71, 4, б), перед тем как подавать его на ДЭМ-4м. В создании эффекта реверберации принимают участие не только первая запаздывающая волна, но и отраженные волны, несколько раз пробежавшие по пружине туда и обратно. Изменяя с помощью переменных сопротивлений R_1 и R_2 уровень сигнала на входе и выходе пружины, можно усилить, либо ослабить эффект реверберации.

До сих пор мы рассказывали об интересных находках техники звуковоспроизведения, которые пока, однако, не нашли особо широкого применения в массовых приемниках, магнитофонах, радиолах. Ниже речь пойдет о таких усовершенствованиях, которые в последнее время встречаются уже довольно часто, особенно в аппаратуре высокого класса.

Оркестр по частям

Мы уже много раз говорили о трудностях усиления и воспроизведения широкой полосы частот: от 20—30 гц до 15—18 кгц (рис. 72). Сейчас ни у кого не вызывает сомнений, что для равномерного воспроизведения столь широкой полосы ее лучше всего разделить на две-три части: например, на полосу высших (выше 4—5 кгц) и низших (ниже 4—5 кгц) частот. Существует несколько путей раздельного воспроизведения высших и низших частот, и мы познакомимся с ними, начав с наиболее простых и, наверное, поэтому наиболее распространенных.

Первый шаг, который необходим для воспроизведения широкой полосы частот, — это применение нескольких громкоговорителей с разной специализацией, в частности высокочастотных и низкочастотных (рис. 73). Проще всего подключить их к общей вторичной обмотке выходного трансформатора, учитывая при этом сопротивление звуковой катушки каждого громкоговорителя и его номинальную мощность. Если эти данные не учтены, то может оказаться, что какой-нибудь из громкоговорителей работает с сильной недогрузкой, в то время как другие сильно перегружены. Так, если к усилителю

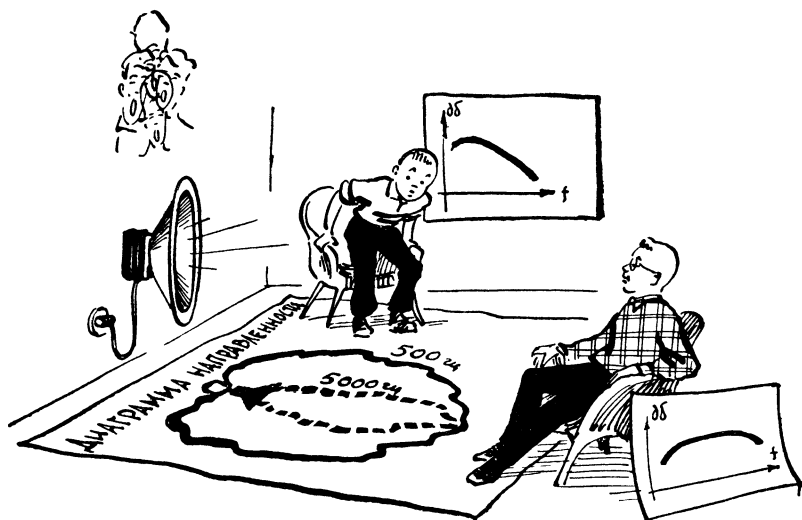


Рис. 72. Один громкоговоритель неравномерно воспроизводит широкую полосу частот, а из-за направленности излучения заваливает высшие частоты в стороне от главной оси. Одиночный громкоговоритель создает впечатление, что звук исходит из одной точки.

мощностью 5 вт подключить соединенные параллельно два громкоговорителя: 5ГД-14 и 1ГД-9, то первому из них достанется мощность около 3 вт, а второму — около 2 вт. При последовательном соединении это несоответствие еще больше усугубится и громкоговоритель 1ГД-9 будет работать (если, конечно, он будет работать!) с трехкратной перегрузкой.

При соединении громкоговорителей в группы нужно руководствоваться основными соотношениями для электрических цепей (рис. 30, 4, 5, 7, 8) и рассчитывать ток, напряжение и мощность, которые приходятся на тот или иной громкоговоритель. При этом помните, что в случае параллельного соединения громкоговорителей на каждом из них действует одно и то же напряжение, а ток разветвляется обратно пропорционально сопротивлению. При последовательном соединении ток в цепи всех громкоговорителей одинаков, а общее напряжение распределяется пропорционально сопротивлению звуковой катушки. Для того чтобы облегчить расчеты, в табл. 17 приведены значения тока $I_{зв}$ и напряжения $U_{зв}$ в цепи звуковой катушки громкоговорителя определенной мощности $P_{зв}$, имеющего определенное сопротивление звуковой катушки $R_{зв}$.

Таблица 17

**Мощность, напряжение и ток в звуковой катушке
громкоговорителя**

$P_{зв} (вт)$	1		2		3		4		5		10	
$R_{зв} (ом)$	5	6,5	4,5	5	4	4,5	5	4,5	5	4,5	4,5	8
$U_{зв} (в)$	2,2	2,5	3	3,2	3,5	3,65	3,9	4,2	4,5	4,65	6,7	8,9
$I_{зв} (а)$	0,45	0,4	0,65	0,6	0,86	0,82	0,77	0,92	0,9	1,1	1,5	1,12

На рис. 74, 1 показана возможная схема соединения двух громкоговорителей 1ГД-9 и одного 5ГД-14. Ввиду сравнительно большого сопротивления ветви с двумя последовательно соединенными громкоговорителями 1ГД-9 в эту ветвь идет небольшой ток и громкоговорителям достается небольшая часть общей мощности. При мощности усилителя 6,6 вт 5ГД-14 получает все сполна, а громкоговорители 1ГД-9 работают с некоторой (сравнительно небольшой) недогрузкой. Если усилитель развивает мощность меньше 6,6 вт, то пропорционально уменьшается мощность, поступающая на все громкоговорители. Другая сложная схема соединения громкоговорителей приведена на рис. 74, 2.

Иногда не удается сгруппировать громкоговорители так, чтобы их можно было подключить к общей вторичной обмотке. В этом случае в выходном трансформаторе делают две вторичные обмотки, к которым и подключают различные громкоговорители. Естественно, что расчет выходного трансформатора несколько усложняется, в частности изменяется порядок выбора числа витков вторичных обмоток. Рис. 74, 3 поясняет один из упрощенных способов расчета.

Громкоговоритель, подключенный к одной из вторичных обмоток, вносит свою долю в создание общего сопротивления анодной нагрузки. Иными словами, эквивалентное сопротивление нагрузки $R_{а. общ}$ в этом случае состоит из двух частей: R_{a1} (пересчитанное $R_{зв1}$) и R_{a2} (пересчитанное $R_{зв2}$). Оба сопротивления R_{a1} и R_{a2} к первичной обмотке подключены параллельно, и на них действует одинаковое переменное напряжение.

Чтобы подключенные ко вторичной обмотке громкоговорители отбирали у выходного каскада причитающуюся им часть общей выходной мощности, необходимо сохранить определенное соотношение между R_{a1} и R_{a2} . Отношение этих сопротив-

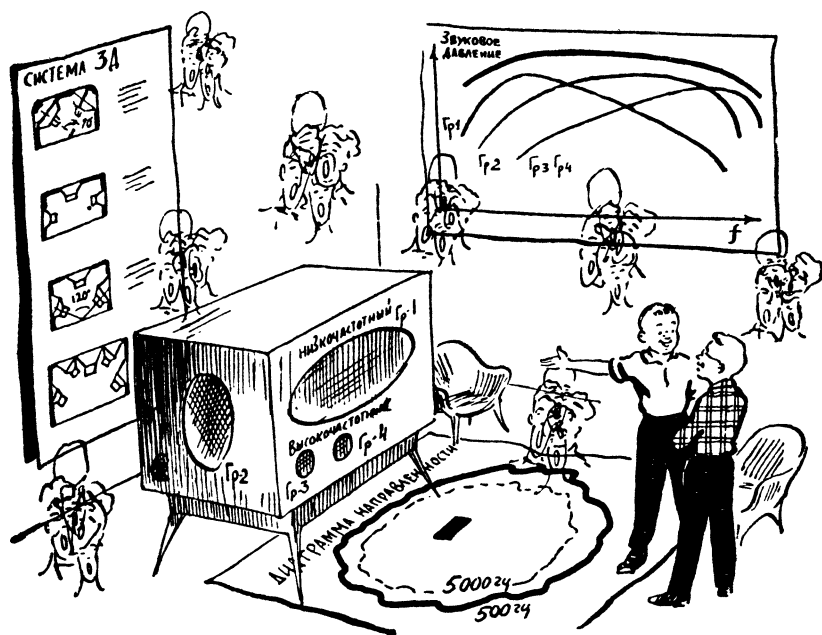


Рис. 73. «Коллектив» низкочастотных и высокочастотных громкоговорителей может воспроизвести весьма широкую полосу частот. При определенном подборе и расположении громкоговорителей, например по системе 3Д, создается эффект объемного звучания: кажется, что источник звука заполняет весь объем помещения.

лений, которое обозначено коэффициентом α (рис. 74, 3, б), должно быть обратно пропорционально отношению мощностей P_2 и P_1 . Это вполне понятно, так как при одинаковом подводимом напряжении отбираемая сопротивлением мощность будет тем больше, чем меньше само это сопротивление. Путем простейших алгебраических преобразований выведены формулы для определения R_{a1} и R_{a2} (рис. 74, 3, в, г). После того как найдены эти сопротивления, поочередно находят коэффициент трансформации для каждой вторичной обмотки (расчет ведется обычным способом, рис. 49), считая, что второй вторичной обмотки вообще не существует. При этом предполагается, что число витков первичной обмотки и необходимое (оптимальное) сопротивление всей нагрузки $R_{a. общ}$ известны. В качестве примера на рис. 74, 3, д приведены данные трансформатора для включения громкоговорителей ВГД-1. Иногда вместо двух обмоток делают одну с отводом (рис. 74, 3, в).

Разделение всего воспроизводимого диапазона на две (а иногда даже на три) части получило дальнейшее развитие в схемах с фильтрами, в схемах с раздельными выходными трансформаторами и в схемах с раздельными усилителями.

При подключении высокочастотной и низкочастотной групп громкоговорителей к общему трансформатору выходная мощность усилителя распределяется не совсем разумно. Каждой группе на всех частотах достается одна и та же часть общей мощности, в то время как основную мощность низших частот следовало бы передать низкочастотным громкоговорителям, основную мощность высших частот — высокочастотным. В какой-то степени можно устранить эту несправедливость, применив простейшие фильтры (рис. 74, 4). Роль фильтра неплохо выполняет даже один конденсатор C_{ϕ} емкостью в несколько микрофард (рис. 74, 4, а, б, в), который не пропускает низшие частоты к высокочастотному громкоговорителю. Для иллюстрации фильтрующей способности конденсатора приводится график (рис. 74, 4, д), где показано, как меняется напряжение на входе высокочастотного громкоговорителя 1ГД-9 при включении его через конденсатор той или иной емкости. Для одного такого громкоговорителя обычно выбирают емкость 4 мкф, для двух, соединенных последовательно ($R_{\text{общ}} = 13 \text{ ом}$) — 2 мкф, для двух, соединенных параллельно ($R_{\text{общ}} \approx 3,3 \text{ ом}$), — 10 мкф.

Более сложный фильтр включает и катушку L_{ϕ} , которая препятствует прохождению высших частот к низкочастотному громкоговорителю (рис. 74, 4, в, г, е). При последовательном соединении громкоговорителей элементы фильтра включаются так, чтобы шунтировать соответствующую группу для посторонних частот (рис. 74, 4, г). Данные фильтрующих элементов можно определить по графику рис. 74, 4, е, а данные катушки подсчитать по простейшей формуле (рис. 74, 4, ж). Провод для катушки должен быть достаточно толстым (0,5—0,7 мм), для того чтобы она отбирала как можно меньшую часть полезной выходной мощности усилителя. В качестве C_{ϕ} можно включить низковольтный бумажный конденсатор, либо два электролитических, соединенных навстречу (рис. 74, 4, з). Применив фильтр, в том числе простейший, в виде одного конденсатора, можно, не опасаясь перегрузки, подавать на высокочастотный громкоговоритель мощность в полтора-два раза больше номинальной.

В подобных схемах частота раздела равна 4—5 кГц.

Значительно лучше используются достоинства двухполосной системы в усилителях с двумя выходными трансформаторами (рис. 74, 5). В этом случае удастся в какой-то степени

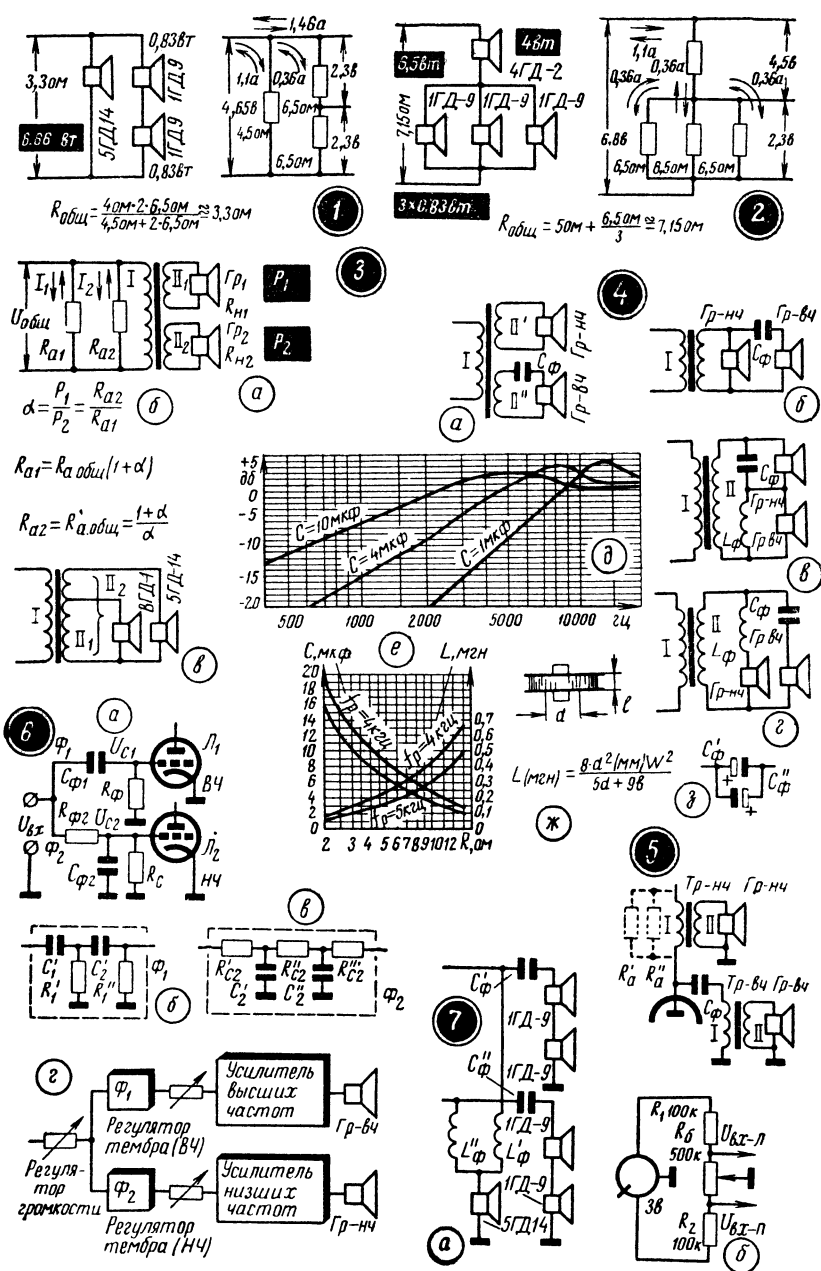


Рис. 74. Элементы двухканальных акустических систем.

примирить противоречивые требования; создать низкочастотный трансформатор с большой индуктивностью первичной обмотки, а высокочастотный — с малой индуктивностью первичной обмотки и благодаря этому с небольшой индуктивностью рассеивания. Пример подобной схемы мы уже встречали в одном из одноканальных усилителей (рис. 51).

Но, конечно, в полной мере воспользоваться возможностями разделения всего диапазона звуковых частот на части можно лишь в том случае, когда такое разделение происходит в самом усилителе низкой частоты (рис. 74, 6). Во-первых, в этом случае легче раздвинуть граничные частоты самого усилителя. Во-вторых, отделив высшие частоты от низших в таком опасном источнике нелинейных искажений, как выходной каскад, мы препятствуем появлению «гибридных» комбинационных частот, которые особенно неприятно воспринимаются слухом. В-третьих, регулируя усиление в каждом из каналов, мы фактически осуществляем раздельную эффективную регулировку тембра.

В двухканальных усилителях частоту раздела выбирают в пределах 800 гц — 1500 кгц. Разделение осуществляется на входе усилителя, а иногда после первого каскада. В некоторых схемах раздельными являются только выходные каскады усилителя, а весь усилитель напряжения — общий для обоих каналов.

Разделительные фильтры Φ_1 и Φ_2 весьма просты и состоят из нескольких конденсаторов и сопротивлений. Совершенно ясно, что после разделения в каждом канале принимаются все меры, чтобы без искажений усилить и воспроизвести «свою» часть всего диапазона частот. Например, в канале низших частот емкость переходных конденсаторов выбирают побольше, в то время как в канале высших частот она сравнительно невелика. Различные требования предъявляются и к выходным трансформаторам: в одном случае главное требование — большая индуктивность первичной обмотки (канал низших частот), в другом случае — минимальная индуктивность рассеивания (канал высших частот). В остальном же усилители отдельных каналов мало чем отличаются от обычных усилителей низкой частоты.

На рис. 78, 2 и 62 приведены схемы двухканальных усилителей — сравнительно простая и более сложная. В первом усилителе (рис. 78, 2) выходная мощность каждого канала составляет примерно 3 вт при $K_{н.н}$ около 5%. Частотная характеристика 60 гц — 12 кгц имеет неравномерность ± 2 дб. В канале высших частот использован выходной трансформатор Tr_1 от радиолы «Рекорд-61», а в канале низ-

ших частот (Tr_2) — от радиолы «Дружба». В качестве обмотки I (Tr_2) включены, разумеется последовательно, обе секции первичной обмотки, каждая из которых содержит 1140 витков ПЭЛ-0,15. Число витков вторичной обмотки увеличено до 200.

Усилитель, схема которого приведена на рис. 62, воспроизводит полосу частот от 30 гц до 15 кгц. Мощность канала высших частот 2 вт, канала низших частот 4 вт. Коэффициент нелинейных искажений на средних частотах не превышает 0,5%, на краях диапазона — 2%. Чувствительность усилителя 150 мв, уровень фона в канале низших частот 50 дб. Разделение каналов (частота раздела 1000 гц) происходит после первого (общего) каскада (L_{1a}). Сопротивление R_1 — регулятор громкости, сопротивления R_{24} и R_8 — регуляторы тембра соответственно высших и низших частот. На частоте 50 гц и 15 кгц глубина регулировки ± 18 дб и ± 15 дб. Чтобы усилить подавление низших частот в высокочастотном канале, с выходного трансформатора Tr_1 подается напряжение отрицательной обратной связи в катодную цепь L_{16} . Для снижения $K_{н.н.}$ к этой же лампе подводится и напряжение обратной связи от «своего» выходного трансформатора — его вторичная обмотка включена непосредственно в катодную цепь лампы последовательно с сопротивлением автоматического смещения R_{28} . Отрицательной обратной связью охвачен также и выходной каскад (R_{31} не зашунтировано конденсатором).

Усилитель канала низших частот двухтактный, фазоинвертор с разделенной нагрузкой (R_{12} , R_{15}). В катодную цепь левого триода лампы L_2 включена цепочка автоматического смещения (R_{13} , R_{14}), к нижней части которой подводится напряжение отрицательной обратной связи. Выходной трансформатор Tr_1 выполнен на сердечнике сечением 6,6 см² (пластины III-22, набор 3 см). Данные обмоток: Ia и Ig — по 1140 витков, Ib и Iv — по 860 витков провода ПЭ-0,16; вторичная обмотка — 140 витков провода ПЭ-0,64. Размещение обмотки на каркасе показано на рис. 62.

Питание анодных цепей усилителя осуществляется от двухполупериодного (мостового) выпрямителя, причем в фильтре имеется дроссель. На накал первой лампы подается постоянное напряжение. Для этого к общей накальной обмотке (а если есть лишняя шестивольтовая обмотка, то к ней) подключают мостиковый выпрямитель с конденсатором фильтра 500 мкф на 10 в (рис. 48, 3, г). Усилитель смонтирован на единой гетинаксовой панели с большим числом монтажных лепестков (рис. 63). Через дополнительный слой изолятора она прикреплена к металлическому шасси, на котором уста-

новлены лампы и трансформаторы. В крайнем случае можно применить и тщательно обработанную панель из фанеры.

Двухканальные усилители с подобным набором ламп весьма популярны у радиолюбителей [13]. Аналогичные усилители применены и в ряде промышленных звуковоспроизводящих установок, в частности в низкочастотном тракте радиокомбайна «Кристалл-104».

Для чего человеку два уха?

На этот, казалось бы, смешной вопрос ответить не так-то просто. Можно, конечно, предположить, что природа снабдила человека запасными органами, заботясь о резерве организма. И действительно, заболит одна почка — ее функции берет на себя вторая, засорится правый глаз — мы продолжаем неплохо видеть одним левым. Но если принять такую гипотезу, то чем объяснить отсутствие резерва у такого ответственного органа, как сердце? И почему нет резерва у печени и желудка, у ответственных желез внутренней секреции? Одним словом, когда речь заходит о происхождении парных органов, появляется огромное множество «для чего?», «почему?» и «каким образом?», на которые пока трудно дать определенный ответ.

Но как бы там ни решилась загадка происхождения «двух ушей», как бы ни объяснялось их появление в процессе эволюции, мы твердо знаем, что дает нам наличие именно двух органов слуха. Два уха позволяют определить место, где находится источник звуковых волн, и следить за его движением, позволяет намного лучше ориентироваться в сложном мире звуков (рис. 75). Попробуйте, находясь на шумной улице, на минутку закрыть одно ухо, и вы сразу поймете, как много дает нам бинауральный эффект — эффект двух ушей.

На самых низких частотах, ниже 300 *гц*, бинауральный эффект практически отсутствует и ухо не фиксирует направление звука (рис. 75, *а*). На частотах от 300 до 1000 *гц* становится заметным сдвиг фаз звуковых волн, попадающих в правое и левое ухо. Мозг мгновенно вычисляет, какому направлению может соответствовать эта разность, и таким образом определяет, откуда идет звук (рис. 75, *б*).

На частотах более 1000 *гц* сдвиг фаз становится очень небольшим (длина волны уменьшается) и поиск направления осуществляется за счет сравнения силы звука, приходящего с разных сторон (рис. 75, *в*).

Изумительная «машина» слуховых центров мозга непре-

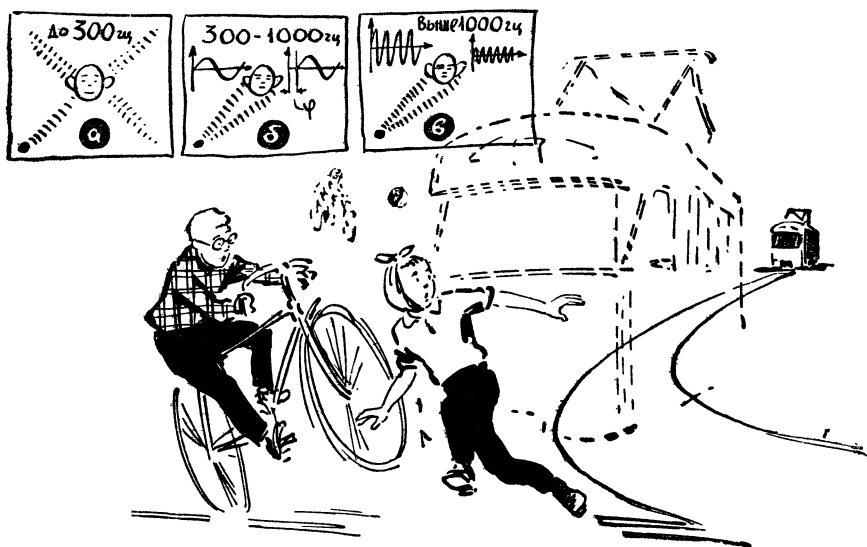


Рис. 75. Бинауральный эффект создает у человека ощущение пространства, позволяет определить направление, с которого приходят звуковые волны, облегчает оценку расстояния до источника звука.

равно сравнивает множество сигналов, поступающих из правого и левого уха, воссоздает в нашем сознании сложную картину пространственного распределения большого числа источников звука. И если мы хотим, чтобы реальная, то есть существующая в месте передачи, объемная звуковая картина сохранилась при воспроизведении грамзаписей или при радиоприеме, нужно, чтобы акустические агрегаты без искажений воспроизвели распределение звуковых колебаний в пространстве. Проще говоря, нужно, чтобы к радиослушателю звуки инструментов большого оркестра или голоса отдельных певцов хора приходили с тех же направлений, что и к слушателю, сидящему в концертном зале.

Подобное требование является для нас новым. До сих пор мы рассматривали методы борьбы со всеми видами искажений и не обращали внимания на искажения пространственной звуковой картины. И прежде, чем рассказывать, как устраняют этот вид искажений, несколько слов о том, как его... специально создают.

В свое время было отмечено, что если в звуковоспроизводящей установке имеется только один громкоговоритель, то

создается впечатление, что большой оркестр или хор находится в одной точке (рис. 72). Простейший способ устранения этого недостатка — система ЗД (рис. 73), которая создает объемное звучание, как бы размазывает источники звука по всему помещению. Системы объемного звука, в том числе и ЗД, — это, конечно, обман, умышленное искажение действительной пространственной картины. Но все же этот обман больше похож на правду, чем звучание одинокого громкоговорителя. Вот почему системы объемного звучания получили очень широкое распространение. Во всяком случае, весьма простая система ЗД применяется в большинстве современных приемников, радиол, магнитофонов.

Следующий шаг на пути создания «обманывающих» акустических систем — это псевдостереофония. Один из основных вариантов этой системы рассчитан на применение двухканального воспроизводящего агрегата. Это может быть двухканальный усилитель (рис. 74, 6) или просто акустический агрегат с двумя группами громкоговорителей (рис. 74, 1, 2, 3, 4). И в том и в другом случае высокочастотные и низкочастотные громкоговорители размещают в разных местах комнаты (рис. 76). При этом у слушателя создается впечатление, что

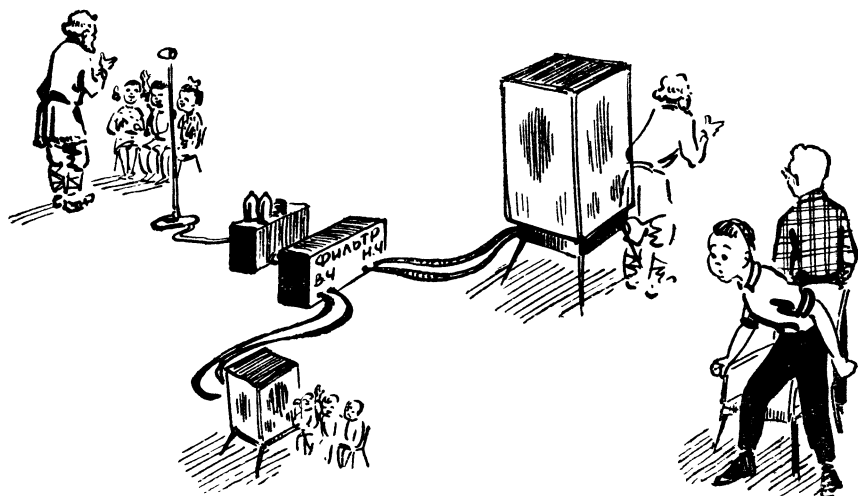


Рис. 76. В системе псевдостереофонии высшие и низшие частоты воспроизводятся отдельными разнесенными в пространстве громкоговорителями; высокочастотные источники звука кажутся расположенными в одной части комнаты, низкочастотные — в другой, возникает иллюзия оркестра или ансамбля.

в разных местах находятся различные группы инструментов оркестра, а иногда даже и певцы с разными голосами (например, бас и сопрано). Вы сами понимаете, что и в этом случае мы умышленно искажаем реальную звуковую картину и опять-таки делаем это для того, чтобы сравнительно простыми средствами создать у слушателя иллюзию оркестра.

Само слово «псевдостереофония» говорит о том, что создается не настоящее распределение звука в пространстве. Настоящая стереофония, то есть воспроизведение реальной звуковой картины, требует принципиально иных и, кстати говоря, не очень-то простых технических решений.

Что нужно для того, чтобы получить неискаженное стереофоническое звучание? Для этого необходимо установить в месте передачи большое число микрофонов и соединить каждый из них со своим громкоговорителем, установленным в месте приема, причем в том же участке пространства, что и микрофон.

Установить большое число микрофонов и громкоговорителей не так-то уж трудно. А вот создание большого числа каналов связи для каждой пары «громкоговоритель — микрофон» — это задача не из простых и, уж во всяком случае, не из дешевых.

Многоканальные системы стереофонии уже много лет применяются в кино. В широкоэкранном кино звук записан на трех дорожках (разумеется, с помощью трех микрофонов) и воспроизводится с помощью трех отдельных усилителей и трех групп громкоговорителей. В широкоформатном кино работают девятиканальные стереофонические установки, и в каждом канале имеется своя фонограмма, свой усилитель и акустический агрегат.

Ну, а как быть со стереофонической грамзаписью? Нельзя же всерьез говорить об одновременном проигрывании девяти или даже трех пластинок. И для радиовещания многоканальные стереофонические системы непригодны, так как для каждого канала нужен свой радиопередатчик и свой приемник.

И все же создание сравнительно простых и доступных широкому кругу слушателей стереофонических систем грамзаписи и радиовещания стало возможным после того, как необходимое число каналов удалось уменьшить до двух. В этом случае, правда, пространственное «размещение» источников звука воспроизводится не совсем точно, но все же звуковая картина очень напоминает настоящую. В то же время два стереоканала удается втиснуть на одну стандартную магнитную пленку, на одну граммофонную пластинку и пере-

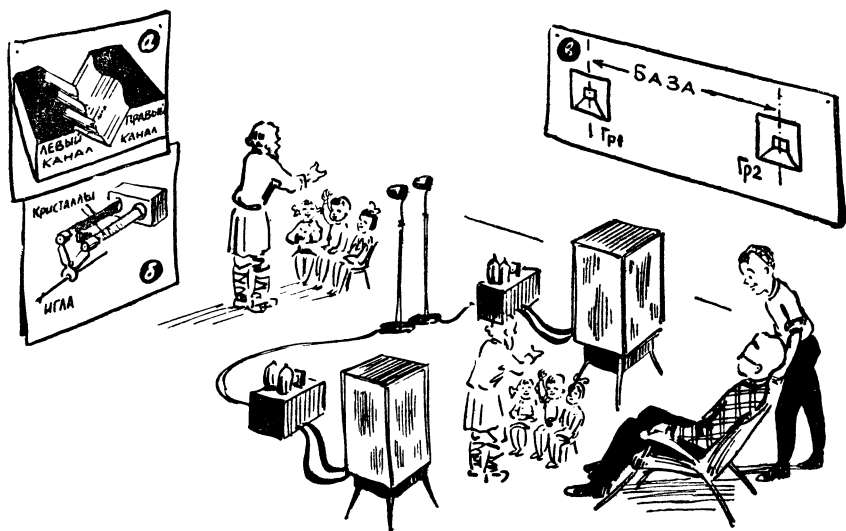


Рис. 77. Двухканальная стереофония создает звуковую картину, близкую к реальной. Звук воспринимается двумя микрофонами; его передают по двум каналам связи (записывают на двух фонограммах) и воспроизводят двумя разнесенными агрегатами.

давать их через одну радиостанцию и принимать одним радиоприемником. Воспроизведение таких записей или радиопередач осуществляется двумя усилителями и двумя акустическими агрегатами, расположенными на некотором удалении один от другого (рис. 77).

Из нескольких систем двухканальной стереофонии наибольшей популярностью пользуется так называемая система MS, принятая во многих странах мира, в том числе и в нашей стране. При MS-стереофонии используются два установленных в одной точке микрофона с разными характеристиками направленности — ДН и ОН. Каждый из микрофонов создает свой сигнал, который передается по отдельному каналу и воспроизводится отдельной группой громкоговорителей.

При стереофонической радиопередаче оба канала переносятся одной радиоволной, а в приемнике происходит их разделение с помощью несложной приставки [14].

Звуковая дорожка (канавка) стереофонической грампластинки напоминает желоб со скошенными стенками (рис.

77, а), причем на каждой стенке записан сигнал лишь одного из двух каналов. Игла звукоснимателя, двигаясь по такой канавке, совершает сложные колебания, которые передаются двум пьезокристаллам. Один из кристаллов воспроизводит электрический сигнал левого, а другой — правого канала.

На рис. 78, в показана схема простого радиограммофона для воспроизведения стереофонических грамзаписей. Как и следовало ожидать, он состоит из двух одинаковых усилителей с двумя одинаковыми громкоговорителями. Отсюда напрашивается важный вывод: для стереофонии можно применить любой из уже знакомых нам усилителей, умножив его на два, то есть сделав два одинаковых усилителя с одинаковыми акустическими агрегатами для левого и правого каналов. Нужно лишь применить в усилителях спаренные регуляторы громкости и тембра R_4R_{12} и R_5R_{11} . Они нужны для того, чтобы при регулировках сохранялось необходимое соотношение сигналов в «левом» и «правом» каналах. В этом случае двухканальная стереофония может дать звуковую картину, очень близкую к настоящей. При воспроизведении обычных — монофонических — грамзаписей оба усилителя стереоустановки могут работать одновременно, для чего достаточно соединить параллельно их входные цепи.

Помимо классических стереоустановок с одинаковыми усилителями и акустическими агрегатами, находят применение «суррогатные» и «гибридные» установки. Это, разумеется, неофициальные названия, и мы ввели их лишь потому, что они неплохо отражают суть дела.

В первом случае используются неодинаковые, хотя и близкие по параметрам усилители: например, обычная радиола и добавленный к ней самодельный усилитель с громкоговорителем. При этом, правда, трудно воспроизвести реальную звуковую картину, но все же она получается вполне правдоподобной. Многое зависит от того, как будут отрегулированы усилители, насколько удастся подогнать их выходную мощность и частотную характеристику. Для этого, прислушиваясь к звучанию всей установки, постепенно поворачивают регуляторы громкости и тембра поочередно в каждом усилителе. В ряде случаев в установку вводят регулятор стереобаланса, который позволяет на расстоянии менять соотношение сигналов в левом и правом каналах. Одна из возможных схем такого регулятора приведена на рис. 74,7 б. Сопротивление включено в цепь отрицательной обратной связи, и в зависимости от поворота движка уменьшается ее глубина для одного канала и увеличивается для другого.

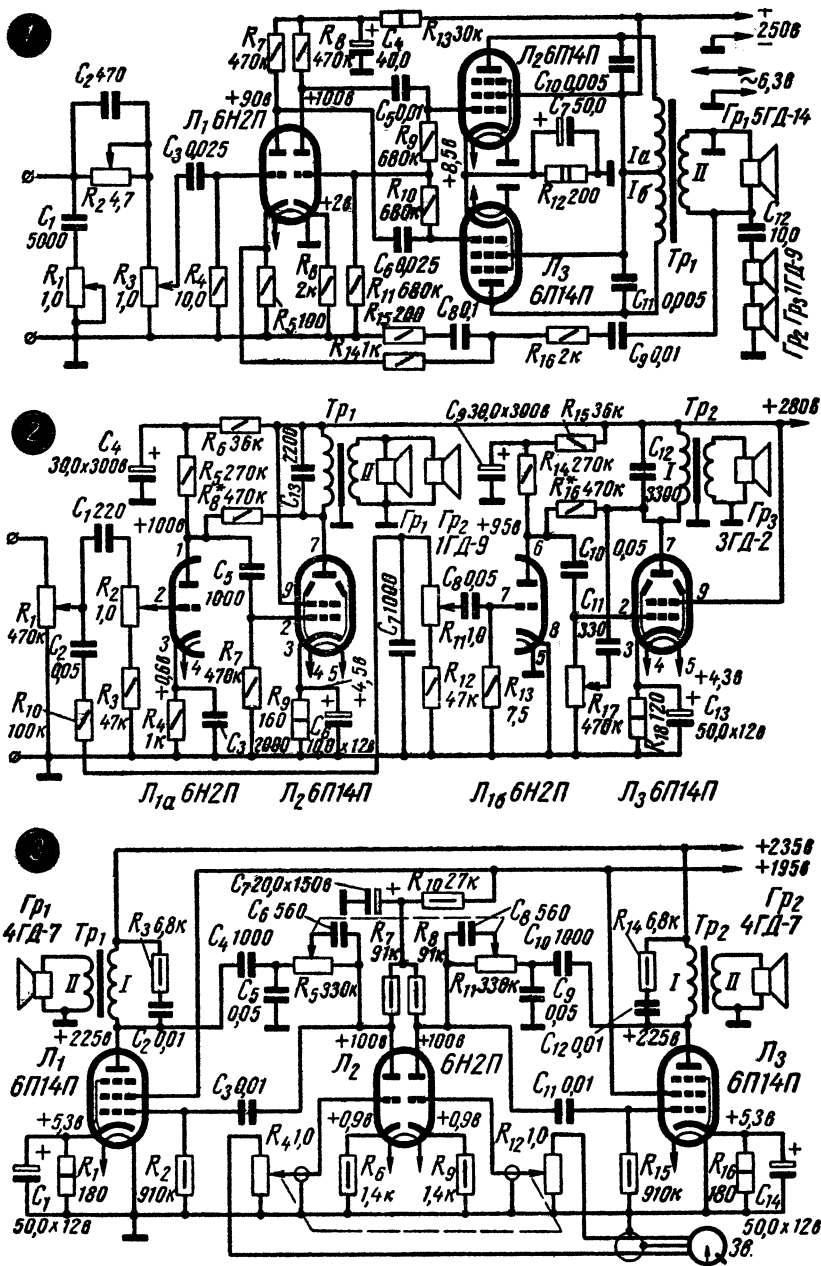


Рис. 78. Три трехламповых усилителя: двухтактный (1), двухканальный (2) и стереофонический (3).

«Гибридными» можно назвать такие звуковоспроизводящие установки, в которых имеется один мощный низкочастотный монофонический агрегат и два разнесенных высокочастотных стереофонических агрегата сравнительно небольшой мощности. При конструировании «гибридных» систем исходят из того, что стереозффект проявляется лишь на высших частотах, и поэтому сравнительно сложный и дорогой низкочастотный тракт может быть общим — все равно он не участвует в создании стереофонии. Частоту разделения каналов выбирают в пределах 250—300 гц, то есть значительно ниже, чем в монофонических двухканальных системах (рис. 74, б, б).

Одна из возможных схем разделения каналов показана на рис. 74, а. Каждый из дросселей L_1 и L_2 намотан на стальном сердечнике сечением 4 см² проводом ПЭ-0,5 до заполнения каркаса. Общий низкочастотный агрегат установлен в середине комнаты, там же, где и усилитель с проигрывателем. Высокочастотные агрегаты — их может быть два или четыре — разносят на расстояние 2—4 м один от другого. В небольших помещениях база (рис. 77) может быть уменьшена до 1,2—1,5 м. Однако на уменьшение базы стоит идти лишь в самом крайнем случае, так как при этом ухудшается иллюзия концертного зала.

Вполне возможно создание «гибридной» стереофонической установки с использованием уже знакомого нам двухканального усилителя, например по схеме, аналогичной рис. 62. В этом случае общим будет весь низкочастотный тракт, включая и мощный усилитель, а высокочастотный стереофонический тракт будет состоять из двух одинаковых двухламповых усилителей небольшой мощности. Граничную частоту необходимо снизить три-четыре раза. Для этого можно в полтора-два раза увеличить емкость конденсаторов фильтра C_5C_6 $C_{15}C_{16}$ и во столько же раз уменьшить сопротивления R_5 и R_{23} . Кроме того, в схему следует ввести еще одну лампу 6Н2П. Одна половина ее будет дублировать L_{1a} , другая половина будет играть роль L_{16} во втором высокочастотном канале.

При конструировании и налаживании любых стереофонических усилителей нужно добиваться высокого переходного затухания. Это значит, что переход сигнала из одного канала в другой, например из-за наводок, должен быть сведен к минимуму.

В заключение стоит заметить, что двухканальная стереофония — дело сравнительно молодое и по многим вопросам здесь расходятся не только мнения слушателей, но и выводы специалистов. Так существуют разные рекомендации по выбору ширины базы, конструированию «гибридных» систем,

расчету частотной характеристики каналов, по-разному оценивается влияние на стереоэффект самих помещений, где установлены микрофоны и громкоговорители. Одним словом, в области двухканальной стереофонии еще далеко не исчерпаны возможности для радиолюбительских экспериментов.

Самая ответственная операция

Заключительным этапом создания какой-либо радиолюбительской установки, в том числе и звуковоспроизводящей, является ее наладивание. Это и есть самая ответственная операция, которая выявляет основные достоинства и недостатки схемы и конструкции, дает возможность «выжать» высокие качественные показатели.

Бывает так, что аккуратно смонтированный усилитель или радиоузел сразу же после включения в сеть начинает хорошо работать, и в дальнейшем улучшить его характеристики почти не удастся. Значительно чаще установка не сразу проявляет все свои способности. Приходится довольно долго возиться — подбирать режимы ламп, регулировать глубину обратной связи, проверять детали, менять некоторые монтажные цепи, — прежде чем удастся получить обещанные в описании качественные показатели. И конечно, весьма вероятно, что из-за ошибки в монтаже первое же включение усилителя может вызвать какую-нибудь аварию с шумом и даже с дымом — пробой конденсатора, подгорание сопротивления, а иногда и повреждение весьма ответственных деталей, в частности силового трансформатора.

Заранее никто не знает, как развернутся события, что произойдет с усилителем, как он будет работать (если вообще будет!) после включения. Поэтому главную операцию — наладивание — лучше всего начинать с тщательной проверки монтажа, причем до, а не после включения аппаратуры в сеть.

Помимо обычной проверки монтажа по принципиальной или монтажной схеме, нужно убедиться в отсутствии коротких замыканий или обрывов в цепях питания. Для этого прежде всего подключите омметр к сетевой вилке при разомкнутом выключателе сети Vk_C (рис. 79, а) — омметр должен показать бесконечно большое сопротивление. После этого можно замкнуть выключатель сети, и, если все в порядке, омметр покажет сопротивление сетевой обмотки — обычно 100—300 ом.

Кроме того, нужно проверить, не соединились ли каким-нибудь образом сетевые провода с корпусом (шасси) усилителя (рис. 79, б, омметр показывает разрыв цепи).

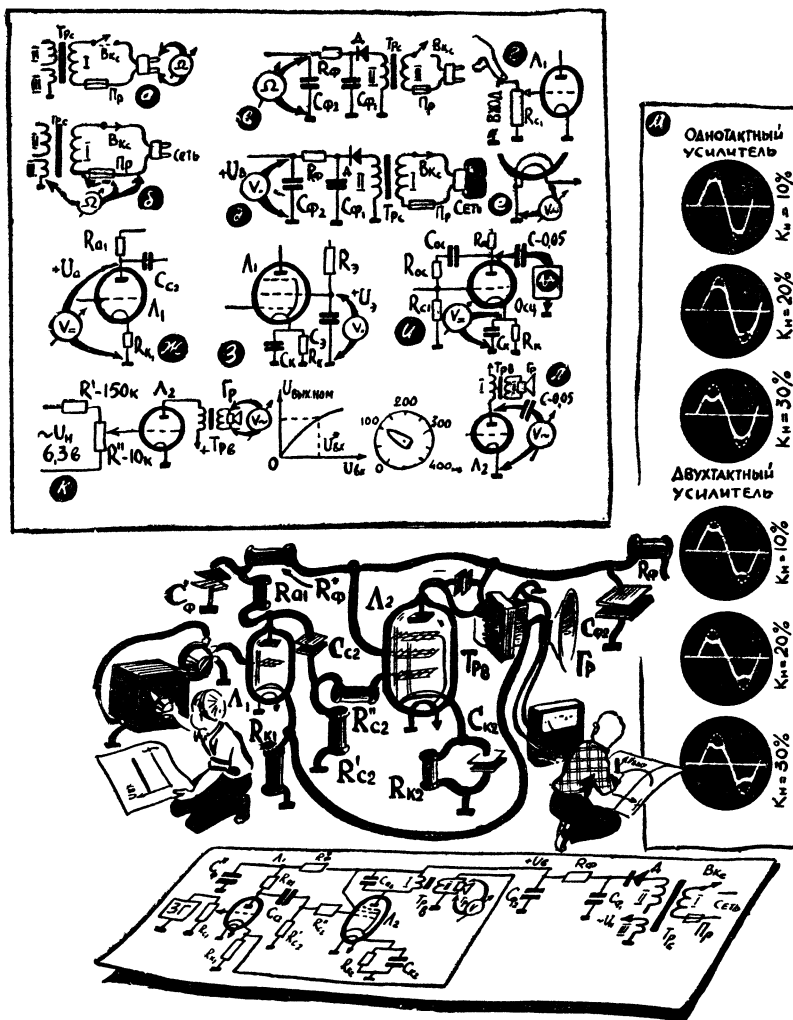


Рис. 79. Проверка, подготовка к включению и налаживанию усилителя сводятся к некоторому комплексу сравнительно простых операций.

Очень важно убедиться в отсутствии замыканий в цепи выпрямленного анодного напряжения. Не включая усилитель в сеть, омметром определяют сопротивление между «плюсом» и корпусом (рис. 79, в). Оно должно составлять несколько сот и в крайнем случае несколько десятков килоом. Пониженное сопротивление чаще всего бывает из-за чрезмерно большой

утечки конденсаторов фильтра выпрямителя или конденсаторов развязывающих фильтров, а также из-за замыкания какой-либо «плюсовой» цепи на корпус.

Проверив цепи питания и еще раз (как говорится, на дорогу!) взглянув на монтаж, попробуйте включить усилитель в сеть. Первые несколько минут внимательно следите за тем, как он себя ведет: достаточно ли ярко светятся катоды всех ламп, не почернело ли какое-нибудь сопротивление, не пахнет ли горелым... Если сразу же после включения появляются тревожные симптомы, то нужно немедленно выключить усилитель и не включать его до тех пор, пока не будет найдено повреждение или ошибка в монтаже. То же самое нужно сделать, если после включения систематически перегорает предохранитель, — это говорит о том, что усилитель потребляет слишком большúю мощность, по-видимому, из-за короткого замыкания в какой-либо цепи.

Но предположим, что включение усилителя прошло благополучно и можно попробовать, «дышит» ли он. Для этого при введенном регуляторе громкости достаточно прикоснуться отверткой, проводом или просто пальцем к входному гнезду, к верхнему лепестку самого регулятора, — словом, к любому участку сеточной цепи первой лампы (рис. 79, *з*). При этом, если усилитель «жив», вы услышите сильный фон. Это «подает голос» слабый электрический сигнал — напряжение, наведенное сетью переменного тока на отвертку, проводе или на вашей руке и прошедшее по всему усилительному тракту.

Но может случиться и так, что вам не понадобится проверять работоспособность усилителя — он сам заявит о себе, начав «реветь» сразу же после включения. Это может произойти в результате самовозбуждения, потому что существуют не предусмотренные, так называемые паразитные обратные связи, охватывающие один или несколько каскадов. На каких-то частотах паразитная обратная связь оказывается положительной, с выхода на вход каскада (или группы каскадов) сигнал поступает в фазе, и усилитель превращается в генератор (рис. 43). Кстати говоря, вполне вероятной причиной самовозбуждения может быть неправильное включение обмотки выходного трансформатора, с которой снимается напряжение отрицательной обратной связи. Может случиться, что после переключения выводов этой обмотки (рис. 39, *1*) самовозбуждение сразу исчезнет. Это значит, что обратная связь была положительной и лишь после переключения выводов стала отрицательной.

Поиск и устранение конкретных причин самовозбуждения — дело нелегкое. Прежде всего стоит проверить, не свя-

заны ли каскады через цепи питания. Для этого можно увеличить емкость фильтра выпрямителя $C_{\Phi 2}$ либо подать питание на первые каскады через дополнительный фильтр $R_{\Phi}^* C_{\Phi}^*$. Кроме того, целесообразно проверить и другие развязывающие элементы, например конденсаторы, соединяющие экраны сетки с корпусом. Иногда можно устранить самовозбуждение, несколько снизив усиление одного из предварительных каскадов. Для этого можно увеличить гасящее сопротивление (понижить напряжение на экранной сетке) либо уменьшить сопротивление анодной нагрузки. Среди других эффективных мер нужно назвать включение антипаразитного сопротивления в цепь сетки выходного каскада (R_{c2}''), некоторое увеличение емкости, шунтирующей первичную обмотку выходного трансформатора; введение дополнительных цепей отрицательной обратной связи в первых каскадах: $R_{o.c} C_{o.c}$ либо отключение C_k (рис. 79, *и*). И конечно, очень важно при поиске и устранении причин самовозбуждения обращать самое серьезное внимание на монтаж, на возможность паразитных связей между анодными и сеточными цепями ламп. Часто бывает так, что причиной самовозбуждения оказывается какой-нибудь неудачно расположенный или лишний, болтающийся «без дела» проводник, незаземленный экран, плохая пайка в цепи развязывающих фильтров, слишком близкое соседство деталей и особенно проводов сеточных и анодных цепей.

В ряде случаев самовозбуждение усилителя происходит не на звуковых (слышимых) частотах, а на ультразвуковых, вплоть до нескольких тысяч мегагерц. Не нужно думать, что неслышимое самовозбуждение не приносит вреда — оно резко меняет режимы ламп и приводит к сильнейшим искажениям звукового сигнала. Обнаружить сверхзвуковую генерацию можно с помощью осциллографа или милливольтметра, включенного на выход усилителя (милливольтметр — прибор, снабженный ламповым либо транзисторным усилителем и измеряющий благодаря этому очень малые переменные напряжения).

Можно обнаружить самовозбуждение и с помощью вольтметра постоянного напряжения. Его подключают к аноду или к цепи автоматического смещения (рис. 79, *ж, и*), а затем замыкают на землю управляющую сетку через конденсатор емкостью в несколько тысяч пикофарад. Если при этом показания вольтметра меняются, значит, каскад работает с самовозбуждением — замыкание сетки снимает с нее переменное напряжение, а это, в свою очередь, приводит к изменению режима лампы.

Другое неприятное явление, с которым можно столкнуться

сразу же после включения усилителя, — сильный фон переменного тока. В этом случае опять-таки нужно вооружиться терпением и найти источник неприятностей. Иногда эту операцию облегчают, поочередно вытаскивая лампы, начиная с первой. В остальном же руководство к поискам выглядит просто: ищите незаземленные экраны и сердечники трансформаторов, корпуса металлических ламп, переменных сопротивлений, ищите неэкранированные провода с низким уровнем сигнала, сеточные цепи, слишком близко расположенные к проводам сетевого тока (например, к накальным), проверьте фильтр выпрямителя.

Наряду с такими шумными неприятностями, как самовозбуждение и фон при предварительной проверке усилителя вас может ожидать сюрприз совсем другого рода — мертвая тишина. Это значит, что сигнал не проходит со входа на выход и в усилительном тракте где-то существует разрыв. Поиск его можно начать с проверки режимов ламп (рис. 79, *д, е, ж, з, и*) — ведь, если на анод или на нить накала не подается напряжение, лампа не усиливает, а значит, не передает сигнал со своего входа на выход. Затем обычно проверяют исправность цепей, начиная с самого конца — с выходного трансформатора и громкоговорителя. Чаще всего при этом обнаруживается какая-нибудь смешная ошибка, например не подключенный вывод сопротивления. Бывают, правда, и весьма каверзные повреждения, например, такие, как обрыв вывода переходного конденсатора C_{c2} .

Но вот наконец все неприятности позади, усилитель спокойно работает и не только гудит при прикосновении к сетке, но уже неплохо воспроизводит граммофонные записи. Насладившись первыми успехами, порадовав родственников и соседей, вы можете переходить к заключительному этапу налаживания — к «выжиманию» высокого качества звучания. Здесь возможны два принципиально различных варианта: первый — у вас есть контрольно-измерительные приборы; второй — у вас нет контрольно-измерительных приборов. Мы рассмотрим первый вариант налаживания и попутно будем давать некоторые рекомендации тем, для кого этот вариант, к сожалению, неприемлем.

Трудно рекомендовать какой-либо обязательный порядок измерения параметров и доводки усилителя. По-видимому, стоит начать с измерения номинальной выходной мощности и определения чувствительности. Для этого вместо звукоусилителя включают звуковой генератор (ЗГ) и подают с него небольшое — десятки милливольт (на микрофонный вход — 1 мв) — напряжение $U_{вх}$ с частотой 1000 гц. Постепенно уве-

личивая входной сигнал, следят за картинкой на экране осциллографа (рис. 79, м). Значение $U_{\text{вх}}$, при котором начнут появляться искажения, можно считать чувствительностью усилителя, а напряжение на звуковой катушке громкоговорителя — номинальным выходным напряжением $U_{\text{вых.ном}}$. Теперь нетрудно подсчитать и номинальную выходную мощность (рис. 31, б).

Если в вашем распоряжении нет осциллографа и звукового генератора, то проверить чувствительность и выходную мощность можно подручными средствами, сняв так называемую амплитудную характеристику усилителя.

Для этого с накальной обмотки напряжение 6,3 в подают на делитель, составленный из постоянного сопротивления $R' = 150 \text{ ком}$ и переменного $R'' = 10 \text{ ком}$ (рис. 79, к). Нетрудно подсчитать, что на всем переменном сопротивлении действует $1/16$ часть накального напряжения, то есть примерно 400 мв (0,4 в). Разделив весь угол поворота оси переменного сопротивления R'' на восемь частей, изготовив небольшую шкалу и закрепив на оси простейшую стрелку, вы получите своеобразный калиброванный генератор сигналов.

Теперь, постепенно увеличивая $U_{\text{вх}}$ (вращением ручки R''), следите за изменением выходного напряжения — его можно измерять обычным авометром (рис. 79, к, л). В итоге вы сможете построить амплитудную характеристику — график, который покажет, как меняется $U_{\text{вых}}$ при изменении $U_{\text{вх}}$.

До тех пор пока график линеен, то есть имеет вид прямой линии, можно считать, что все хорошо, так как выходной сигнал послушно следует за входным. Загиб амплитудной характеристики соответствует области нелинейных искажений (сравните с амплитудной характеристикой громкоговорителя, рис. 15). По началу загиба вы и определяете чувствительность (по положению стрелки на шкале R''), а также $U_{\text{вых.ном}}$ и $P_{\text{вых.ном}}$. Учтите, что полученные результаты могут оказаться несколько заниженными, так как на низших частотах, в том числе и на сетевой частоте 50 гц, частотная характеристика усилителя обычно имеет некоторый завал.

Предложенные способы, конечно, не дают возможности строго определить номинальную мощность и чувствительность. Для этого нужно было бы точно измерять $K_{\text{н.и}}$ с помощью особого прибора — измерителя нелинейных искажений (рис. 31, з). Однако оба способа позволяют оценить выходные данные усилителя и в случае необходимости подобрать оптимальное сопротивление нагрузки. Подобную операцию любители выполняют редко, но она настолько важна, что стоит коротко сказать, как это делается.

Сопротивление анодной нагрузки R_a особенно важно сделать оптимальным для выходной лампы, которая вырабатывает выходной сигнал и в большей степени определяет нелинейные искажения всего усилителя. Оптимальная величина R_a для той или иной лампы указана среди ее основных параметров (рис. 80, табл. 13).

Однако в реальном случае из-за применения отрицательной обратной связи и выбора пониженных (или повышенных) напряжений оптимальное значение R_a может несколько отличаться от рекомендованного. Как быть в этом случае? Разумеется, неудобно подбирать оптимальную нагрузку, меняя выходные трансформаторы или громкоговорители. Иногда, предвидя операцию по подбору R_a , делают секционированную вторичную обмотку выходного трансформатора, а затем пробуют подключать громкоговоритель к различным отводам.

Но можно поступить еще более строго — заранее определить оптимальную величину R_a для выбранной схемы и выбранного режима лампы, затем с учетом этой величины изготовить (или переделать готовый) выходной трансформатор. Для определения оптимальной нагрузки вместо громкоговорителя включают проволочный реостат и снимают амплитудные характеристики для нескольких значений $R_{зв}$ (рис. 50). В итоге получают график, который показывает, как меняется $U_{вых}$ при изменении нагрузки. По этому графику и находят оптимальное значение R_a .

Если имеется измеритель нелинейных искажений, то можно найти R_a , соответствующее минимальному значению $K_{н.и}$. Минимальные искажения, как правило, бывают при мощности несколько меньшей, чем максимальная. Поэтому оптимальным следует считать сопротивление нагрузки на 10—15% меньшее, чем было определено из условий максимальной мощности. Подбирая оптимальную нагрузку, целесообразно одновременно найти удачный режим выходного каскада, в частности тщательно подогнать смещение. Кстати говоря, с подбора смещения следует во всех случаях начинать подгонку режимов любого каскада.

С помощью звукового генератора нетрудно снять частотную характеристику усилителя — изменяя частоту входного сигнала ($U_{вх}$), нужно измерять уровень выходного ($U_{вых}$). Эту операцию лучше вначале проводить при отключенных цепях обратной связи. Затем, проверяя частотную характеристику, можно постепенно вводить обратную связь, подбирать элементы коррекции и регулировки тембра. Напоминаем, что частотная характеристика, так же как и другие показатели, определены нами для электрического тракта, то есть не



Рис. 80. Параметры и схемы цоколевки некоторых электронных ламп.

учитывают «последнего слова» громкоговорителей. Чтобы получить характеристики, снятые по звуковому давлению, то есть оценивающие всю звуковоспроизводящую установку, нужен измерительный микрофон с милливольтметром (рис. 15, 16). Все акустические измерения обычно проводят в специально оборудованной камере.

Несколько слов об особенностях налаживания двухтактных выходных каскадов. Здесь одна из главных задач — добиться симметрии плеч. Для проверки симметрии можно сетку одной из ламп двухтактного каскада отсоединить от фазоинвертора и подключить к сетке второй лампы. В этом случае при идеальной симметрии выходное напряжение должно быть равно нулю.

Можно было бы еще многое рассказать об особенностях налаживания конкретных схем усилителей, о влиянии тех или иных элементов схемы на качественные показатели. Однако подобный рассказ в большей степени был бы повторением того, что уже известно из предыдущих разделов книги. Ведь налаживание усилителя — это своего рода экзамен, который хотя и является продолжением учебы, но в основном сводится к проверке уже накопленных знаний. Этот экзамен всегда проходит успешно, если поняты и прочувствованы физические основы работы усилителей и принципы построения усилительных схем.

Для подтверждения сказанного приведем несколько примеров.

Включенный усилитель молчит, и в поисках повреждения вы начали проверку режимов ламп. При этом оказалось, что на аноде одной из первых ламп напряжение значительно больше указанного на схеме и равно общему анодному напряжению U_a . Таким образом на сопротивлении нагрузки R_a вообще нет падения напряжения, а это в принципе может быть только в двух случаях, если $R_a=0$ или если $I_a=0$ ($U = I \cdot R!$).

Вторую причину легко сразу же исключить с помощью омметра. Что же касается отсутствия анодного тока, то оно, в свою очередь, может быть вызвано несколькими причинами: обрывом в анодной цепи (одна из вероятных причин обрыва — повреждение сопротивления), обрывом в катодной цепи, запирающим лампы (например, из-за обрыва в цепи управляющей или экранной сетки), неисправностью самой лампы.

После того как вы мысленно составили «черный список» — перечень возможных повреждений, неисправность в усилительном каскаде легко найти самыми простыми средствами.

Другой пример. При проверке режимов оказалось, что напряжение смещения на катодном сопротивлении равно нулю. Сначала убедитесь, что анодный ток не равен нулю (то есть, что нет повторения предыдущего случая). Проверьте напряжение на аноде — если оно меньше, чем U_a , то, значит, анодный ток есть. Теперь остается единственное предположение: $R_k = 0$. Вероятнее всего, что в этом «виноват» пробитый конденсатор C_k , который даже при исправном R_k накоротко замыкает участок «катод — корпус».

Наконец, еще пример. При работе со звукоусилителем усилитель развивает нормальную мощность уже при небольшом угле поворота регулятора громкости. Дальнейший поворот регулятора приводит к сильным нелинейным искажениям. Проверяете чувствительность — она оказывается значительно выше нормы и составляет 30—50 мв (должно быть 150—250 мв). Имеющийся запас усиления можно немедленно пустить в дело — создать дополнительные цепи обратной связи, уменьшить сопротивления анодной нагрузки, сопротивления утечки сетки и тем самым несколько расширить частотную характеристику.

При нехватке усиления нужно, наоборот, ослабить обратную связь (лучше всего зашунтировав конденсаторами сопротивления в катодных цепях первых ламп) или, в крайнем случае, повысить сопротивление нагрузки реостатных каскадов.

Заканчивая разговор о самой главной операции — налаживании, хочется сказать несколько ободряющих слов тем, кому придется выполнять ее по второму варианту — без измерительных приборов. Помимо рекомендаций, сделанных несколько раньше, вы можете выполнять почти все операции, для которых нужны измерительные приборы. Низкочастотным генератором для вас будет проигрыватель с хорошей записью большого оркестра, а индикатором выхода — собственное ухо. Конечно, такая замена не является эквивалентной: то, что могут показать приборы, не всегда удастся уловить на слух. И все же после хорошей тренировки вы наверняка научитесь замечать даже незначительные подъемы и завалы частотной характеристики усилителя, небольшие изменения коэффициента нелинейных искажений.

Чтобы налаживать усилители и акустические агрегаты на слух, нужно прежде всего иметь слух, нужно чувствовать музыку, не только слушать, но и слышать звучание музыкальных инструментов и певческих голосов.

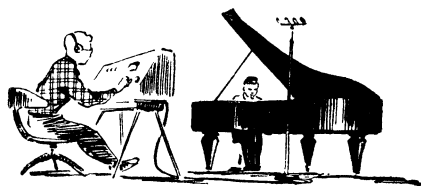
Только вы, пожалуйста, не поймите сказанное так, будто музыкальность — это средство, а высококачественная аппара-

тура звуковоспроизведения — это цель. Скорее, все наоборот — мы добиваемся высокой верности воспроизведения, чтобы во всей полноте услышать настоящую музыку.

Понимание музыки, чувство музыки — это одно из самых замечательных человеческих качеств. Вот как образно, как страстно об этом сказал Шекспир:

Тот, у кого нет музыки в душе,
Кого не тронут сладкие созвучья,
Способен на грабеж, измену, хитрость;
Темны, как ночь, души его движения
И чувства все угрюмы, как Эреб;
Не верь такому.

Стремление к музыке, ощущение гармонии и ритмов заложено в самой человеческой природе и безусловно связано с тем, что человек живет в богатейшем мире звуков. Сама же музыка — это одно из величайших духовных богатств цивилизации. И справедливому распределению этого богатства, приобщению многих миллионов людей к сокровищам музыкальной культуры помогают скромные усилители и радиоузелы, с некоторыми из которых вы познакомились в этой книге.



РЕКОМЕНДУЕМЫЕ КНИГИ И СТАТЬИ ПО РАДИОТЕХНИКЕ

1. Н. Арбузов. Музыкальная акустика. М., Изд. «Искусство», 1950.
2. Г. Анфилов. Физика и музыка. М., Детгиз, 1962.
3. А. Дольник. Микрофоны. М., Изд. «Энергия», 1964 (МРБ, вып. 497).
4. А. Дольник. Громкоговорители. М., Изд. «Энергия», 1964 (МРБ, вып. 555).
5. А. Дольник, М. Эфрусси. Как сделать установку с хорошим звучанием. М., Изд. ДОСААФ, 1965.
6. И. Жеребцов. Электротехника для радиста. М., Изд. ДОСААФ, 1965.
7. Радиоэлектроника. Учебник для профессионально-технических училищ. М., Трудрезервиздат, 1963.
8. Г. С. Цыкин. Усилители электрических сигналов. М., Госэнергоиздат, 1961 (МРБ, вып. 414).
9. И. Х. Геллер. Селеновые выпрямители. М., изд. «Энергия», 1964. (МРБ, вып. 496).
10. В. Большов. Радиолюбительские усилители низкой частоты. М., Изд. Госэнергоиздат, 1961 (МРБ, вып. 422).
11. В. Костиков. Простой усилитель низкой частоты. Журнал «Радио» № 7 за 1959 год, стр. 49, 50.
12. А. Кузьменко. Высококачественный усилитель низкой частоты. Журнал «Радио» № 5 за 1957 год, стр. 51, 52.
13. В. Мощаков. Двухканальный усилитель. Журнал «Радио» № 5 за 1961 год, стр. 34—36.
14. С. Флейшер. Новое в ламповых радиовещательных приемниках. М., Госэнергоиздат, 1961 (МРБ, вып. 417).
15. Г. Крылов. Простой усилитель НЧ. Журнал «Радио» № 1 за 1961 год, стр. 53.
16. Г. Крылов. Модернизация простого усилителя НЧ. Журнал «Радио» № 4 за 1961 год, стр. 52.

17. М. Эрлик. Самодельный ревербератор. Журнал «Радио» № 12 за 1963 год, стр. 46, 47.
18. Е. Ризкин. Как построить колхозную речевую студию. М., Госэнергоиздат, 1956 (МРБ, вып. 239).
19. В. Борисов. Школьный радиоузел. М., Изд. «Молодая гвардия», 1959.
20. В. К. Лабутин. Книга радиомастера. М., Изд., «Энергия», 1965 (МРБ, вып. 543).
21. Справочник начинающего радиолюбителя под редакцией Р. М. Малинина. М., Изд. «Энергия», 1965 (МРБ, вып. 581).
22. Справочник радиолюбителя под редакцией А. А. Куликовского. М., Изд. Госэнергоиздат, 1961 (МРБ, вып. 394).
23. Р. Сворень. Шаг за шагом. От детекторного приемника до супергетеродина. М., Детгиз, 1963.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Глава I. ЗВУК

Вы тронули гитарную струну...	4
Звук на анализе	15
«Я вас слушаю!..»	26
Изумительная биологическая машина	32
Дирижер взмахнул палочкой	44

Глава II. БРИГАДА ПЕРЕВОДЧИКОВ

Что такое «плохо»?	62
Все начинается с микрофона	74
Громкоговоритель	82
Внимание — ящик!	91

Глава III. ОДНОТАКТНЫЕ УСИЛИТЕЛИ

Шаг назад	104
Усилитель — каким он должен быть?	123
Фильтры и тембры	130
Фокусы с фазами	140
Музыка в чемодане	154

Глава IV. ДВУХТАКТНЫЕ УСИЛИТЕЛИ

А, В и АВ с единицами и двойками	177
Усижительная схема «Тянитолкай»	184
«Кру-гом!»	193
От двух до пятидесяти	198
Радиоузлы: вход и выход	204
5 + 10 + сколько угодно	219

Глава V. ВВВ — ВЫСОКАЯ ВЕРНОСТЬ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ

Поиски и находки	231
Оркестр по частям	240
Для чего человеку два уха?	248
Самая ответственная операция	256

ДЛЯ СРЕДНЕГО И СТАРШЕГО
ВОЗРАСТА

Сворень Рудольф Анатольевич

УСИЛИТЕЛИ И РАДИОУЗЛЫ

Ответственный редактор Э. П. Микоян.
Художественный редактор Г. Ф. Ордынский.
Технический редактор Т. М. Страхова.

Корректоры

Л. М. Николаева и Т. Ф. Юдичева.

Сдано в набор 5/VIII 1965 г. Подписано
к печ. 8/XII 1965 г. Формат 60×90¹/₁₆ —
17,5 печ. л. (16,3+4 вкл.=16,6 уч.-изд. л.).
Тираж 100 000. ТП 1965 № 275. А13 501.

Цена 68 коп.

Издательство «Детская литература».

Москва, М. Черкасский пер., 1.

Отпечатано с матриц ф-ки «Детская книга» № 2, Ленинград, 2-я Советская, 7, на
ф-ке «Детская книга» № 1 Росглавполи-
графпрома Государственного комитета
Совета Министров РСФСР по печати.
Москва, Суцевский вал, 49. Заказ № 2760.

Издательство „ДЕТСКАЯ ЛИТЕРАТУРА“

В 1965 и в 1966 годах в издательстве „Детская литература“ вышли и выйдут в свет следующие научно-художественные книги по физике, химии и технике:

Зубарев Г.

ТВОИ ДРУЗЬЯ ПОЛИМЕРЫ.

В занимательной форме автор знакомит юных читателей с новыми достижениями волшебницы химии, с различными искусственными материалами

Кондратов А.

АЛЛО, РОБОТ!

Автор рассказывает школьникам об одной из самых увлекательных областей кибернетики, проблеме машинного языка. Ребята узнают, как создание «языка машин» потребовало научного изучения систем сигнализации животных

Рыдник В.

ОХОТНИКИ ЗА ЧАСТИЦАМИ.

Эта книга об истории открытия и изучении элементарных частиц, начиная с первой из них — электрона, а затем — позитрона, мюона, нейтрино, античастиц

Анфилов Г.

БЕГСТВО ОТ УДИВЛЕНИЙ.

В книге говорится о том, что удивительное рядом, что надо уметь его заметить. С этого начинается наука. Автор раскрывает историю познания некоторых явлений природы

Гильзин К.

НОВЕЛЛЫ О МИРЕ ИНЫХ КОНСТАНТ.

Книга содержит своеобразные беседы об основных законах природы. Автор переносит читателя в воображаемый мир, в котором физические константы, хорошо известные из школьных учебников, имеют иную величину, помогает ввести читателей в круг проблем, стоящих перед современной наукой

Келер В.

ВОЗВРАЩЕНИЕ ЧАРОДЕЯ.

Эта книга — поэтический рассказ о достижениях современной физики в изучении окружающего мира, об основных законах и явлениях природы

Эти книги по мере выхода их в свет вы сможете приобрести в магазинах Книготорга и потребительской кооперации. Книги высылаются также по почте наложенным платежом отделом «Книга — почтой» областных, краевых и республиканских Книготоргов.

Цена 68 коп.