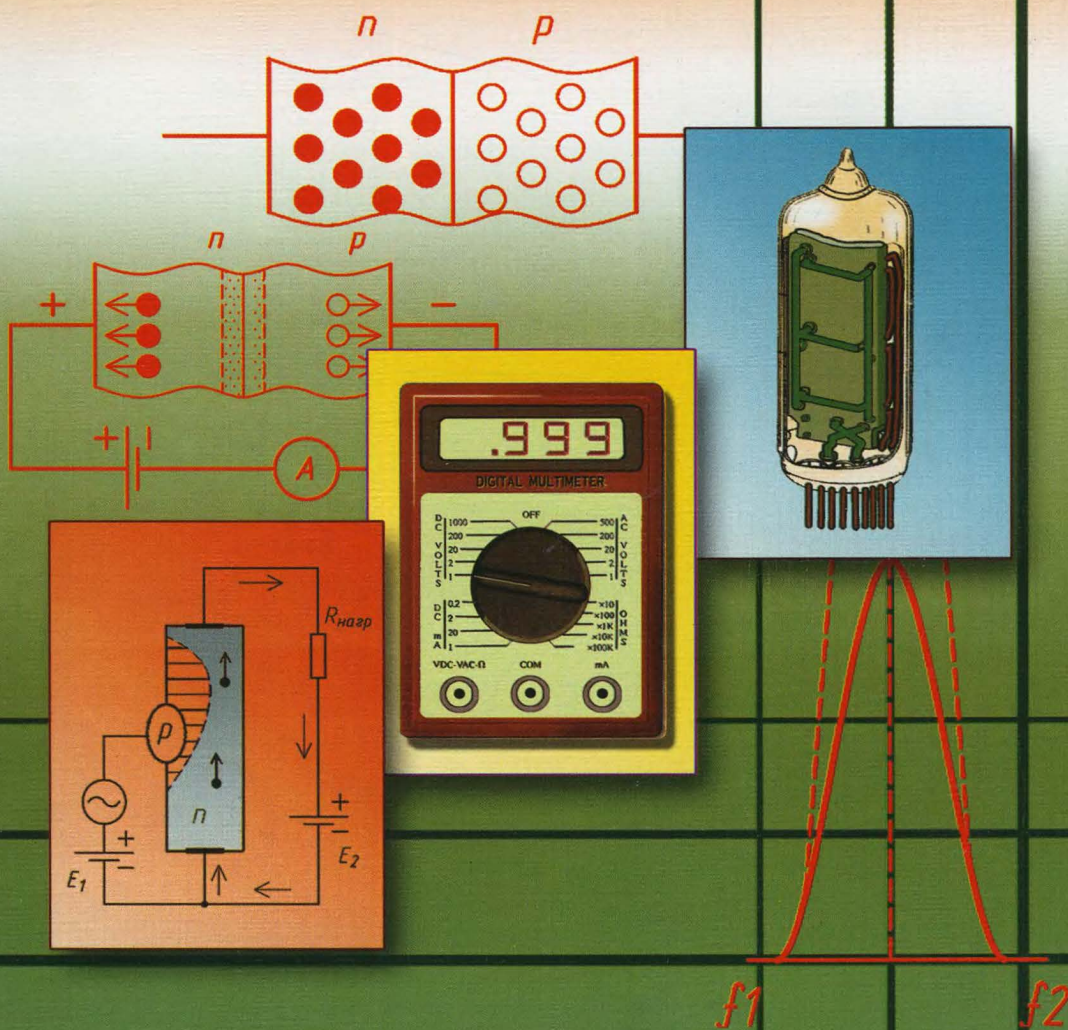


# Г.С.Гендин

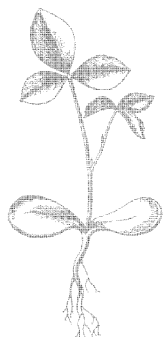
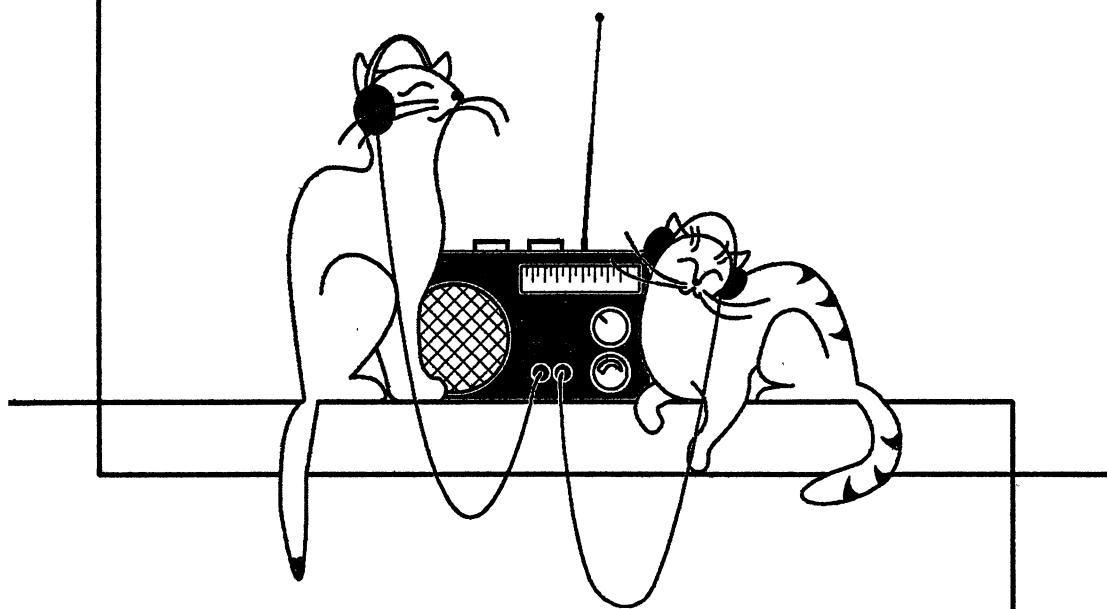
# ШКОЛА

# радиолюбителя



Г. С. Гендин

# ШКОЛА радиолюбителя



Издательство  
**РадиоСофт**  
Москва  
2003

ББК 74.200.585.01  
УДК 087.5  
Г34

*Оформление Абдрашитовой Л. К.*

**Гендин Г. С.**  
Г34 Школа радиолюбителя. — М.: ИП РадиоСофт, 2003.— 208 с.: ил.  
ISBN 5-93037-113-X

Это вторая книга из серии изданий, адресованных начинающему радиолюбителю в качестве учебно-практического пособия.

В этой книге на более серьезном уровне продолжено знакомство с различными схемами на полупроводниковой и радиовакуумной базе, основами звукотехники, электро- и радиоизмерениями. Изложение сопровождается большим количеством иллюстраций и практических схем.

ББК 74.200.585.01

ISBN 5-93037-113-X

© Г. С. Гендин, 2003  
© Оформление. ИП РадиоСофт, 2003

# СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ .....	5
ЗАНЯТИЕ ПЕРВОЕ .....	6
Теория .....	6
Урок 1. Принцип работы простейшей радиолампы — диода .....	10
Урок 2. Связанные резонансные системы .....	15
Рабочее место .....	20
ЗАНЯТИЕ ВТОРОЕ .....	24
Теория .....	24
Урок 1. Принцип работы лампового триода .....	24
Урок 2. Формирование АЧХ связанных систем .....	32
Рабочее место .....	35
ЗАНЯТИЕ ТРЕТЬЕ .....	40
Теория .....	40
Урок 1. Многоэлектродные и комбинированные лампы .....	40
Урок 2. Образование биений при сложении двух частот .....	47
Рабочее место .....	53
ЗАНЯТИЕ ЧЕТВЕРТОЕ .....	55
Теория .....	55
Урок 1. Газонаполненные электронные приборы .....	55
Урок 2. Проблема сопряжения входного и гетеродинного контуров .....	63
Практика .....	66
ЗАНЯТИЕ ПЯТОЕ .....	70
Теория .....	70
Урок 1. Работа лампового каскада .....	70
Урок 2. Виды радиотехнических схем .....	79
Практика .....	87
ЗАНЯТИЕ ШЕСТОЕ .....	91
Теория .....	91
Урок 1. Введение в полупроводниковую технику .....	91
Урок 2. Знакомство с генераторами .....	98
Практика .....	102
ЗАНЯТИЕ СЕДЬМОЕ .....	104
Теория .....	104
Урок 1. Полупроводниковые диоды различного назначения .....	104
Урок 2. Составляем полную принципиальную схему супергетеродина .....	113



ЗАНЯТИЕ ВОСЬМОЕ .....	122
Теория .....	122
Урок 1. Устройство и принцип работы транзистора .....	122
Урок 2. Достоинства и недостатки супергетеродинного метода приема .....	132
ЗАНЯТИЕ ДЕВЯТОЕ .....	137
Теория .....	137
Урок 1. Практические схемы на транзисторах .....	137
Урок 2. Генераторы синусоидальных и импульсных сигналов .....	142
Практика .....	150
ЗАНЯТИЕ ДЕСЯТОЕ .....	156
Теория .....	156
Урок 1. Устройство и работа тиристорov. Знакомство с микросхемой .....	156
Урок 2. Виды искажений сигналов .....	167
Рабочее место .....	170
ЗАНЯТИЕ ОДИННАДЦАТОЕ .....	173
Теория .....	173
Урок 1. Механическая и оптическая запись/воспроизведение звука .....	173
Урок 2. Кое-что об электроакустике .....	179
Рабочее место .....	187
ЗАНЯТИЕ ДВЕНАДЦАТОЕ .....	190
Теория .....	190
Урок 1. Магнитная звукозапись .....	190
Урок 2. Общая методика электро- и радиоизмерений .....	196
Практика .....	203
ЛИТЕРАТУРА .....	206

# ПРЕДИСЛОВИЕ

«Школа радиолюбителя» — это вторая часть серии из трех книг и представляет собой самоучитель по радиотехнике, предназначенный молодым людям, решившим приобщиться к некогда огромной армии радиолюбителей.

Сегодня, несмотря на небывалое изобилие бытовой радиоаппаратуры промышленного производства и ее относительную доступность, наблюдается определенное повышение интереса к тому, что принято называть радиолюбительством, т. е. к процессу самостоятельного творчества в областях телевидения, магнитной записи звука и изображения, высококачественного звуковоспроизведения.

Возрождению радиолюбительского движения в значительной мере способствует возможность приобретения практически любых комплектующих изделий и материалов для самостоятельного творчества, широчайший выбор измерительной аппаратуры, а также технической литературы по всем отраслям радиотехники.

Однако в технической литературе сегодня преобладает *справочное* направление, тогда как теоретические вопросы и проблемы больше освещаются на уровне фундаментальных научных исследований. Что же касается изданий исключительно популярной «Массовой радиобиблиотеки» (МРБ), то ее книги и брошюры преимущественно посвящаются описанию конкретных радиолюбительских конструкций или представляют собой те же справочники.

На этом книжном поле сегодня явно ощущается дефицит литературы учебного характера для подготовки и становления радиолюбителя-конструктора, причем литературы системной, призванной провести читателя, преимущественно юного, от азов электро- и радиотехники до уровня, отвечающего сегодняшним требованиям к специалистам общего профиля, работающим в многочисленных областях радиотехники.

Издательство «РадиоСофт» делает попытку заполнить эту нишу.

Книги этой серии представляют собой три этапа обучения. Первая, уже вышедшая в свет книга, «Азбука радиолюбителя», начинается с самых азов и подводит читателя к пониманию основных процессов, связанных с передачей, распространением и приемом радиосигналов, а также назначением, функциями и особенностями всех схемных компонентов, составляющих класс *пассивных радиоэлементов*.

Эта вторая книга знакомит читателя с принципом работы и физикой процессов класса *активных радиоэлементов* — электровакуумных и газоразрядных приборов, транзисторов и микросхем, а также с работой узлов (каскадов) радиоаппаратуры, использующих активные элементы.

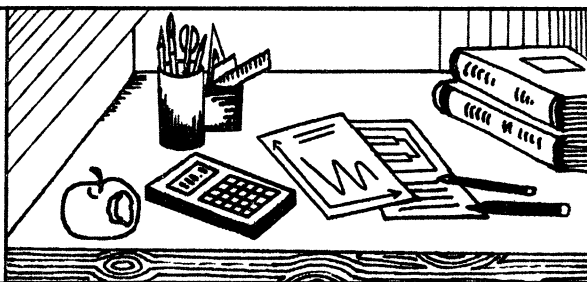
По мере освоения этого теоретического материала читателю будут предлагаться и постепенно усложняющиеся конструкции для самостоятельного изготовления.

Структура и построение второй книги в основном повторяет структуру «Азбуки радиолюбителя». Большая часть занятий состоит из трех самостоятельных разделов: теоретической части, оборудования рабочего места и практической работы. Основное отличие «Школы» от «Азбуки» состоит в более глубоком и строгом изложении теории, повышенной сложности конструкций, предлагаемых для собственного изготовления, и использованию различной измерительной аппаратуры при регулировке и налаживании этих конструкций.

По замыслу автора и издателя читатель, добросовестно прошедший оба курса и сдавший выпускной экзамен-тест, по уровню знаний и практическим навыкам не будет уступать выпускникам радиотехнических техникумов и профтехучилищ.

# ЗАНЯТИЕ ПЕРВОЕ

## Теория



На протяжении всех 12 занятий первой книги — «Азбука радиолюбителя» — мы познакомились практически со всеми представителями большого класса радиокомпонентов, так называемыми *пассивными радиоэлементами*: резисторами, конденсаторами, катушками индуктивности, вентилями (диодами), их назначением, свойствами, выполняемыми в различных схемах функциями.

Что является характерным и общим для всех этих очень различных по своим свойствам деталей, и почему их относят к классу *пассивных* радиоэлементов? И потом: если есть *пассивные* радиоэлементы, то, скорее всего, должны существовать и противоположные им *активные* радиоэлементы?

При всей кажущейся простоте ответить на этот вопрос совсем не так легко. Чтобы не быть голословными, приведем официальное определение, с которого начинается «Справочная книга радиолюбителя-конструктора» под общей редакцией проф. Н. И. Чистякова:



Электронные цепи, содержащие транзисторы или  
иные приборы, усиливающие проходящие через них сиг-  
налы, называются активными цепями. Цепи, в кото-  
рых усиления не происходит, называются пассивными.

В строгом соответствии с этим определением усилительный каскад на транзисторе, собранный по схеме с общим эмиттером, является активной цепью, поскольку сигнал на его выходе может быть больше сигнала на входе, т. е. налицо *усиление сигнала*. Но если в том же каскаде тот же самый транзистор включен по схеме с общим коллектором, то сигнал на выходе каскада оказывается меньше входного сигнала, т. е. происходит не *усиление*, а, напротив, *ослабление* «...проходящего через транзистор...» сигнала. Получается, что в первом случае мы имеем дело с активной цепью, а во втором — с пассивной, хотя на самом деле это одна и та же цепь.

И как быть в свете приведенного определения не с усилителями, а с генераторами, к которым никак нельзя приложить понятие «...проходящий через них сигнал...»? К какому классу следует отнести генераторы: к *активным* цепям или к *пассивным*?

Между тем сам факт увеличения выходного сигнала относительно входного присущ не только *активным* цепям: таким же свойством обладают и повышающие

трансформаторы и резонансные контуры на частоте резонанса, которые при всем желании нельзя отнести к активным, хотя сигнал на их выходе больше, чем на входе, а для трансформатора к тому же справедливо утверждение, что «...сигнал проходит через него».

Как видим, приведенное официальное определение очень трудно признать однозначным, исчерпывающим и всеобъемлющим. Можно попытаться использовать другой критерий, сравнивая выходной и входной сигналы не по их величине (амплитуде), а, скажем, по мощности. А заодно ограничить принадлежность к активным радиоэлементам (цепям) понятием *четырёхполюсник*. Этим сразу же выводятся за рамки активных элементов и резонансные контуры и трансформаторы, поскольку они не увеличивают *мощность* входного сигнала.

А все виды генераторов, напротив, становятся активными элементами на законном основании, поскольку мощность на их выходе всегда является положительной величиной, тогда как входной сигнал равен нулю (его просто не существует у генераторов с самовозбуждением) либо он значительно меньше по мощности, чем выходной сигнал у генераторов с внешним возбуждением.

Введение этих критериев существенно разграничивает понятия *активный радиоэлемент* и *пассивный радиоэлемент*, а если к этому добавить, что увеличение мощности выходного сигнала происходит исключительно за счет энергии дополнительного внешнего источника, становится возможным предложить следующее определение:



*Активным радиоэлементом называется работающий от внешнего источника электроэнергии четырёхполюсник, сигнал на выходе которого превосходит по мощности подводимый к нему электрический сигнал.*

*Увеличение мощности при этом происходит исключительно за счет энергии внешнего источника.*

Приняв такое определение, можно утверждать, что **любой радиоэлемент, не удовлетворяющий хотя бы одному из перечисленных условий, является пассивным радиоэлементом.**

Все радиоэлементы, изучению которых была посвящена первая книга «Азбука радиолюбителя», относились к группе *пассивных*. Во второй книге «Школа радиолюбителя» мы будем параллельно изучать большую часть активных радиокомпонентов (радиолампы, транзисторы, микросхемы и т. п.) и расширять знания о резонансных системах, которые строятся из уже известных нам одиночных резонансных контуров и по нашему новому определению относятся к пассивным.

Но прежде чем мы перейдем к существу дела, еще раз вернемся к официальному определению активных радиоэлементов в «Справочнике радиолюбителя» и нашему определению. В официальном определении сказано, что активные цепи, содержащие транзисторы или иные активные элементы, *усиливают проходящие через них* электрические сигналы, а в нашем определении об усилении сигналов ничего не говорится. Почему?

Ответ очень простой, хотя на первый взгляд и парадоксальный. Дело в том, что никакой так называемый *усилитель*, равно как и любой активный элемент, на самом деле никаких электрических сигналов не усиливает и усиливать просто не может.

А чтобы этот парадокс стал объясним, придется прибегнуть к приему, которым мы часто пользовались в первой книге: к аналогии. И на этот раз рассмотрим физику процессов, происходящих в обычном диапроекторе, слайдоскопе или в кино.



Можно утверждать, что любой из комплексов этих аппаратов состоит из *источника света, оптического преобразователя — объектива и экрана*, на котором производится увеличенное изображение слайда (кинокадра). Изображение на слайде или диапозитиве мы вправе считать *входным сигналом*, а изображение на большом экране — *выходным сигналом*.

Рассмотрим, что происходит при работе слайдоскопа или диапроектора. Если в приемное окно не вставлен никакой кадр (входной сигнал отсутствует), большой экран равномерно освещен. При этом, несмотря на отсутствие *входного сигнала*, расходуется энергия внешнего источника (лампы), идущая на освещение экрана.

Теперь вставим в проектор диапозитив. На экране появится точная масштабная (увеличенная) копия входного сигнала, причем яркость этого изображения никак не зависит от самого слайда, а определяется исключительно интенсивностью светового потока источника света. Или, что то же самое,— *мощностью* внешнего источника энергии.

Нетрудно видеть, что в процессе *проекции* на экран произошло очевидное *увеличение* (читай — усиление) размеров и яркости изображения, нанесенного на слайде, однако никакого изменения *самого слайда* (читай — входного сигнала) при этом не произошло: слайд и изображение на нем остались неизменными. Более того, они будут продолжать оставаться неизменными, даже если мы с помощью оптики будем изменять размеры и яркость изображения на большом экране (читай — изменять выходной сигнал).

Отсюда можно сделать важный вывод: ни слайдоскоп, ни кинопроектор вовсе не увеличивают и не усиливают изображение на слайде или кинокадре. Они создают свое собственное оригинальное изображение на большом экране, используя в качестве *рисовального материала* световую энергию лампы, в качестве *кисти или карандаша* оптический преобразователь, а слайду или кинокадру при этом отводится скромная роль оригинала, с которого на большом экране рисуется точная копия.

Совершенно точно так же следует рассматривать и любой радиотехнический усилитель. Проводя аналогию с диапроектором, можно утверждать, что в усилителе роль источника света выполняет источник электропитания (сетевой выпрямитель или гальванический элемент), роль большого экрана — нагрузка усилителя, роль оптического преобразователя — собственно активный (усилительный) элемент — радиолампа или транзистор, роль слайда — входной сигнал, подводимый к усилителю, а большое изображение на экране есть не что иное, как усиленный сигнал на выходе (на нагрузке) усилительного каскада.

И тогда надо будет признать, что любой так называемый *усилитель* по существу является всего лишь преобразователем энергии внешнего источника, позволяющий получить на выходной нагрузке электрический сигнал, в той или иной степени приближающийся к форме сигнала, подводимого ко входу усилителя.

Однако что это еще за оговорка: «...приближающийся по форме...»? Это вовсе не оговорка. В любом усилителе за счет различных искажений выходной сигнал всегда и неизбежно отличается по форме от входного. В очень хороших усилителях эта разница может составлять тысячные доли процента и быть незаметна даже по приборам, но во многих бытовых радиоаппаратах среднего класса — приемниках, магнитофонах, плеерах — вполне может достигать и 10%.

И последнее: ни про один усилитель нельзя сказать, что «...электрический сигнал проходит через него...». Так же, как изображение на слайде вовсе не проходит через оптическую систему, так и входной сигнал, подводимый к усилителю, дальше входных клемм никуда не проходит. Его функции ограничиваются управлением преобразователя, будь то радиолампа, транзистор или микросхема. При этом в большинстве случаев энергия входного сигнала либо вовсе не расходуется (или расходуется ничтожно), как в случае использования радиоламп и полевых транзис-

торов, либо частично расходуется, но не в процессе усиления, а на активных элементах, составляющих входную цепь усилителя на биполярных транзисторах.

Понятно, что ни о каком «прохождении электрического сигнала через усилитель» говорить не приходится. Однако совершенно очевидно, что за счет энергии источника питания *мощность* выходного сигнала может во много раз превосходить мощность входного сигнала, и именно в этом смысле надо понимать, что активные радиоэлементы усиливают подводимый к ним электрический сигнал.

Начиная наше знакомство с активными радиоэлементами, укажем, что сегодня все они в свою очередь делятся на две большие группы, существенно различающиеся между собой по сущности происходящих внутри этих приборов физических процессов.

**Первая** из этих групп — электровакуумные и газоразрядные приборы, типичными представителями которых являются все так называемые радиолампы, электронно-лучевые приборы (осциллографические трубки и телевизионные кинескопы), световые индикаторы настройки, газовые стабилизаторы напряжения, тиратроны и ряд других, с которыми мы будем знакомиться по ходу дела.

**Вторая** группа объединяет в себе все виды полупроводниковых приборов: транзисторы, микросхемы, тиристоры и т. д.

Поскольку физика происходящих в этих приборах процессов существенно различна, невозможно объяснить принцип их действия одной общей теорией, поэтому возникает проблема приоритета, обнаруживающая свои трудности.

С одной стороны, сегодня абсолютное большинство аппаратуры строится с использованием исключительно полупроводниковых приборов, поэтому было бы логично начать именно с них, а с другой — нельзя отрицать и того, что по крайней мере 99% всех выпускаемых сегодня телевизоров невозможно представить себе без главной детали — кинескопа, который никакого отношения к полупроводникам не имеет, а представляет собой самую обычную радиолампу — тетрод.

Основой основ и главным компонентом любой суперсовременной радиолокационной системы являются сегодня отнюдь не транзисторы, а специальные электровакуумные приборы — радиолампы особой конструкции: клистроны и магнетроны. Эти радиолампы являются неотъемлемой частью систем самонаведения всех современных зенитных управляемых ракет, они же исправно служат в системах сверхдальней и космической радиосвязи, без них невозможно представить систему ретрансляции теле- и радиопередач многоканальной телефонии.

Известно, что ряд зарубежных фирм наиболее высококачественные и самые дорогие усилители звуковой частоты до сих пор выпускают полностью на радиолампах, предпочитая их транзисторам. Все это говорит о том, что и сегодня современные радиолампы остаются востребованными в самых передовых технологических и технических системах, заменить которые полупроводниковыми приборами пока что не представляется возможным.

А поскольку исторически первыми *усилительными* элементами были именно электровакуумные приборы, а также учитывая, что физика их работы для непосвященного читателя более понятна, чем достаточно абстрактная «электронно-дырочная теория» работы транзистора, мы в нашей книге начнем с электровакуумных приборов.

В конце концов, с чего-то надо начинать!

Внеся ясность в терминологию и разобравшись с разными группами *активных радиокомпонентов*, можно перейти к непосредственным темам первого теоретического занятия, состоящего из двух самостоятельных, не связанных между собой уроков.

# Урок 1. ПРИНЦИП РАБОТЫ ПРОСТЕЙШЕЙ РАДИОЛАМПЫ — ДИОДА

Работа радиоламп основана на трех китах. Двое из этих китов обязательны для любой радиолампы, третий характеризует работу только многоэлектродных (более двух электродов) ламп — усилительных и генераторных.

Об этом третьем ките мы поговорим подробно в следующем разделе, посвященном анализу работы трехэлектродной лампы — триода. А сейчас остановимся на двух первых китах, представляющих основу работы любого электровакуумного прибора.

Кит первый — это наличие внутри лампы массива так называемых свободных электронов, т. е. отдельных, обособленных электронов, не входящих в данный момент в состав какого-либо атома. Такие свободные электроны, в частности, всегда присутствуют в теле любого металла. Примем это за аксиому.

Оказавшись на поверхности металла, эти свободные электроны за счет внутренней энергии могут покидать поверхность и какое-то время парить в окружающем пространстве, скажем в воздухе.

Но поскольку воздух целиком состоит из молекул газа, свободные электроны очень скоро неизбежно сталкиваются с ними и поглощаются, т. е. перестают существовать как свободные.

Если же наш теоретический кусок металла поместить в идеальный вакуум, вылетевшие с его поверхности свободные электроны, не встречая никаких помех в окружающем пространстве, могут достаточно долго находиться в свободном состоянии. Впрочем, подчиняясь закону всемирного тяготения, электроны, имеющие ничтожную массу, чаще всего возвращаются на поверхность массивного куска металла, если этому не противодействуют другие силы. Вот это самое если для нас окажется самым главным, существенным для понимания принципа работы радиолампы.

Другая аксиома состоит в том, что число свободных электронов, покидающих поверхность металла, резко увеличивается с повышением температуры металла. Свойство металла излучать с поверхности свободные электроны называют *эмиссионной способностью* металла. Для разных металлов она различна, и порой весьма существенно.

Чтобы сравнить между собой *эмиссионные способности* разных металлов и получить достаточно наглядную картину, можно представить себе все вылетевшие свободные электроны не в виде «неорганизованной толпы», а в виде *направленного электронного потока*, представляющего, как известно, обычный электрический ток, который можно измерять, скажем, в миллиамперах (мА). А степень нагрева металлического источника свободных электронов оценивать не только по его температуре, но и по количеству затрачиваемой на нагрев металла электроэнергии, скажем, в ваттах (Вт).

Тогда эти данные нетрудно представить в виде таблицы, характеризующей не просто соотношение между температурой металла и количеством эмитируемых свободных электронов, но и один из важнейших практических показателей реальной лампы — удельную эмиссию катода, иными словами — эффективность (КПД) его работы.

В табл. 1 приведены данные только для тех металлов, которые на практике наиболее часто используются для изготовления катодов ламп. При этом следует

иметь в виду, что чаще всего используются катоды комбинированные, в которых источником тепла является фольфрамовая нить, обладающая высокой прочностью и долговечностью, но низкой эмиссионной способностью. Источником же свободных электронов служит не сама эта нить, а нанесенный на ее поверхность слой другого металла или его окисла, эффективно излучающий электроны, но обладающий низкой механической прочностью.

Таблица 1

ПАРАМЕТРЫ «ЧИСТЫХ» ПРЯМОНАКАЛЬНЫХ И АКТИВИРОВАННЫХ КАТОДОВ

Тип катода	Рабочая температура, °C	Удельная эмиссия, мА/Вт	Примерный срок службы, ч
Чистый вольфрам	2100...2300	2...6	200...1000
Торированный	1450...1600	30...50	800...1000
Карбонированный	1650...1750	40...70	500...700
Оксидированный	630...830	50...100	1000...1500
Бариевый	430...630	70...120	1400...1700
Цезиевый	380...430	250...300	—

Итак, с первым китом мы уже почти разобрались, т. е. поняли, что для работы любой радиолампы внутри ее вакуумированного баллона должен обязательно находиться источник свободных электронов: чаще всего это подогреваемая электрическим током металлическая нить (в чистом виде или активированная), которую мы в дальнейшем будем называть катодом.

Чтобы быть совсем уж точными, оговоримся, что в ряде случаев катод может быть и не горячим, а холодным. В этих особых случаях свободные электроны с поверхности катода могут вылетать не под действием высокой температуры, а под воздействием светового луча. Но об этом мы поговорим позже.

Второй кит называется односторонней проводимостью и представляет собой незыблемое правило:



Электроны внутри лампы могут перемещаться только в одном направлении: от катода к аноду, а от анода к катоду не могут.

На вполне законный вопрос: «А почему?» — существует очень простой ответ. Из школьного курса физики известны две истины:

1. Электрон является электрически отрицательно заряженной частицей;
2. Разноименные заряды притягиваются, одноименные — отталкиваются.

Теперь посмотрим на рис. 1, представляющий в довольно условной форме устройство простейшей двухэлектродной радиолампы — диода.

Здесь источником свободных электронов (катодом) служит активированная вольфрамовая нить, а вторым электродом (анодом) является цельнометаллическая пластина, находящаяся на расстоянии  $L$  от катода. Это расстояние  $L$  окажется очень существенным, когда мы будем рассматривать электрические характеристики диода. Не будем забывать также, что вся эта конструкция находится внутри запаянного стеклянного баллона, из которого полностью удален воздух.



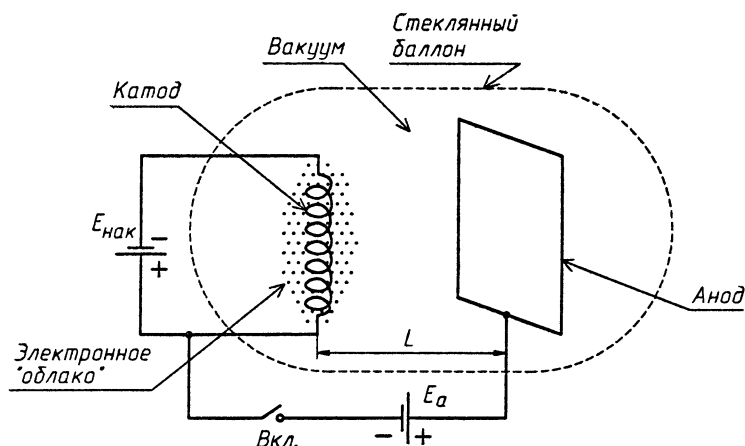


Рис. 1. Схематическое устройство вакуумного диода

При нагревании катода с его поверхности будут вылетать свободные электроны. Поскольку размеры электрона ничтожны и абсолютно несоизмеримы с расстоянием  $L$  и отсутствуют *внешние причины*, побуждающие электроны двигаться именно в сторону анода, они будут скапливаться в некоторой области *вокруг* катода, образуя так называемое *электронное облако*, изображенное на рис. 1 в виде точек.

Плотность этого облака пропорциональна *эмиссионной эффективности* данного вида катода и его температуре и будет оставаться достаточно постоянной, поскольку бесконечному притоку новых свободных электронов будет препятствовать закон, по которому новые отрицательно заряженные электроны будут отталкиваться также отрицательно заряженным электронным облаком.

Установившееся равновесие изменится только при изменении температуры катода или под воздействием другой внешней силы. И именно такой внешней силой является *электрический потенциал* внешнего источника электрической энергии (например, батарейки от карманного фонаря). На рисунке такая батарейка обозначена символом  $\text{---}|$  и представляет собой источник постоянного тока, характеризующийся двумя основными параметрами: электродвижущей силой (ЭДС)  $E$  и внутренним сопротивлением  $r$ .

Что произойдет, если мы подсоединим нашу батарейку плюсовым полюсом к аноду, а минусовым к катоду? Тогда окажется, что оба электрода лампы становятся электрически заряженными: анод — положительно, катод — отрицательно. И теперь электронное облако окажется под воздействием *внешней силы*. Кроме того, с подключением батарейки у нас образуется *замкнутая электрическая цепь*.

Положительно заряженный анод начнет притягивать к себе отрицательно заряженные электроны из околоскатодного облака, в результате чего часть из них, наиболее удаленная от катода, устремится в сторону анода.

Поток этих электронов будет представлять собой не что иное, как внутривлампный постоянный электрический ток, направленный от катода к аноду. Величина этого тока, как нетрудно догадаться, будет тем больше, чем больше электрический потенциал анода.

А что будет происходить, если мы подключим нашу батарейку обратной полярностью, т. е. плюсом к катоду и минусом к аноду? Тогда окажется, что тело катода будет находиться под положительным потенциалом и все свободные отрицательно заряженные электроны начнут притягиваться катодом и не смогут покинуть его поверхность.

Холодный, не нагретый анод не излучает с поверхности свободные электроны, и таким образом внутри лампы исчезнет обязательный первый кит — облако свободных электронов, необходимых для создания анодного тока. Вот почему постоянный электрический ток внутри любой лампы может иметь только одно направление: от катода к аноду.

А что будет происходить, если при положительной полярности включения (плюс на аноде и минус на катоде) начать увеличивать напряжение анодной батарейки? Будет ли ток в лампе увеличиваться беспрестанно? Сначала вспомним, что такое эмиссионная способность катода. Это способность катода *при данной температуре* излучать с поверхности определенное количество свободных электронов *в единицу времени* (например, в секунду).

А величина электрического тока (например, в амперах) есть не что иное, как количество электронов, протекающих по проводнику (или в жидкости, или в вакууме — не имеет значения) также в секунду.

Казалось бы, почти одно и то же. На самом же деле ток через лампу при увеличении анодного напряжения будет возрастать только до тех пор, пока с поверхности катода излучается достаточное количество электронов.

Но вот наступает такой момент, когда число электронов, улетающих из облачка к аноду каждую секунду, становится равным числу электронов, излучаемых катодом (также в секунду).

Теперь вокруг катода нет облака свободных электронов: каждый новый эмитированный электрон немедленно притягивается анодом. И сколько бы мы после этого ни увеличивали анодное напряжение, увеличение тока происходить не будет, поскольку число свободных электронов, излучаемых катодом в секунду, *при данной температуре достигло предела*.

Чтобы изобразить этот процесс графически, возьмем две взаимно перпендикулярные оси координат с общей нулевой точкой. По горизонтальной оси будем откладывать в линейном масштабе величину анодного напряжения (а если точнее — величину разности потенциалов между анодом и катодом), а по вертикальной — величину анодного тока, тогда получим на графике зависимость тока анода диода от величины анодного напряжения.

Эта зависимость называется анодной характеристикой лампы и является одной из важнейших характеристик любой лампы, совершенно необходимой при электрических расчетах лампового каскада.

Процесс, описанный выше, изображен на рис. 2 кривой А. До некоторой точки 1 на вертикальной оси рост анодного тока в зависимости от роста анодного напряжения является процессом линейным, т. е. прямо пропорциональным. Начиная с точки 1 и до точки 2 такая прямая пропорциональность

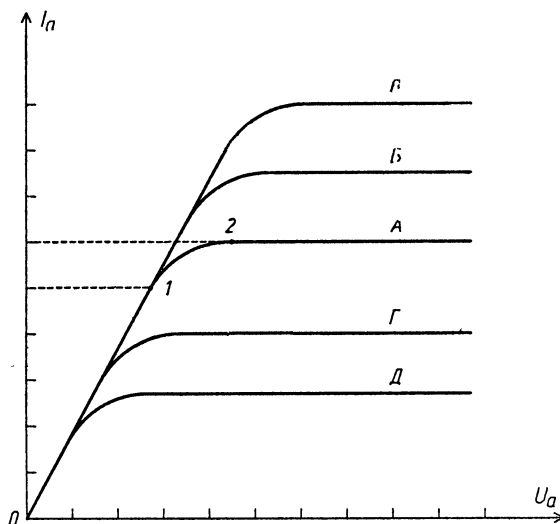


Рис. 2. Кривые зависимости анодного тока диода от анодного напряжения для разных значений температуры катода

нарушается, рост тока замедляется, а после точки 2 полностью прекращается. Участок кривой между токами 0 и 1 принято называть прямолинейным участком характеристики, между точками 1 и 2 — верхним загибом, а участок правее точки 2 — характеристикой режима насыщения.

Выше было сказано, что максимально эмитируемое катодом число электронов в секунду прямо пропорционально температуре катода. Отсюда понятно, что чем выше температура катода, тем выше и предельное значение анодного тока лампы до режима насыщения и наоборот. Именно это и отображают на графике остальные кривые. Две из них (Б и В) соответствуют более горячему катоду, другие (Г и Д) — более холодному.

Совмещенные на одном графике несколько кривых одного смысла, но соответствующие разным условиям измерения, называются семейством характеристик и являются важнейшим инструментом при осуществлении электрических расчетов ламповых схем.

Ранее мы обратили внимание на то, что величина анодного тока диода также напрямую связана с расстоянием  $L$  между анодом и катодом. Такая связь действительно существует и количественно выражается формулой Лэнгмюра, учитывающей взаимозависимость анодного тока диода, анодного напряжения, рабочей поверхности катода и анода и расстояния между анодом и катодом.

Для наиболее распространенной *цилиндрической* конструкции диода (катод в форме прямолинейного цилиндра, расположенного по оси также цилиндрического анода) эта формула Лэнгмюра имеет вид

$$I_a = 0,015 \frac{h}{L} E_a^{3/2},$$

где  $I_a$  — анодный ток, мА;  $h$  — длина рабочей поверхности катода (и равная ей высота цилиндра анода), см;  $L$  — расстояние между катодом и анодом (или, иначе говоря, радиус цилиндрического анода), см;  $E_a$  — разность потенциалов между катодом и анодом, В.

Анодная характеристика (и даже семейство таких характеристик) хотя и дает достаточно наглядное представление о характере зависимости анодного тока от приложенного напряжения, но при этом не отвечает на целый ряд других важных вопросов. Например, какова предельно допустимая величина анодного тока, или мощности, рассеиваемой анодом, или каковы нижний и верхний пределы напряжения нити подогревателя, при которых, с одной стороны, обеспечивается достаточная эмиссия катода, а с другой — не возникает опасности перегорания этой нити.

Кроме того, для диодов с малым расстоянием между анодом и катодом (а оно у современных ВЧ и СВЧ диодов может измеряться единицами и даже долями миллиметров) очень существенна величина предельно допустимого напряжения обратной полярности (плюсом к катоду и минусом к аноду), ибо в этом случае ток через диод не протекает, его внутреннее сопротивление теоретически бесконечно и промежуток анод—катод может быть пробит высоким напряжением (так называемый искровой пробой), в результате которого лампа необратимо выходит из строя.

Все эти параметры составляют обязательный набор паспортных данных, характеризующих лампу со всех точек зрения и позволяющих осуществлять выбор того или иного типа, оптимального именно для данной конкретной схемы.

Основное и едва ли не единственное назначение диодов — выпрямление переменного напряжения любой формы как немодулированного, так и модулированного. В соответствии с этими двумя различиями диоды разделяют на выпрями-

тельные и детекторные. И хотя принципиальной разницы между этими двумя функциями нет, к диодам этих двух групп предъявляют существенно различные требования.

Вот, пожалуй, и все, что нужно знать о принципе работы и устройстве простейшей двухэлектродной лампы — диода. Можно лишь добавить, что в основе работы любых других, более сложных радиоламп лежат те же самые основополагающие принципы и закономерности.

А теперь после небольшого перерыва можно перейти ко второму уроку, который возвращает нас к теме резонансных контуров.

## Урок 2. СВЯЗАННЫЕ РЕЗОНАНСНЫЕ СИСТЕМЫ

В теоретической части «Азбуки» мы достаточно подробно познакомились с одиночным резонансным контуром, его характеристиками, основными параметрами, назначением, а также с его предельными возможностями как устройства, обеспечивающего избирательность входного устройства приемника.

Эта последняя характеристика привела нас к неутешительному выводу: любой одиночный резонансный контур ни теоретически, ни тем более практически не в состоянии обеспечить достаточно эффективную избирательность по соседнему каналу при одновременном сохранении в разумных пределах неравномерности амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) внутри рабочей полосы пропускания.

При этом мы установили, что контуры с невысоким значением добротности (порядка 10...30) при относительно приемлемой величине неравномерности АЧХ в пределах рабочей полосы обладают недопустимо плохой избирательностью на граничных частотах этой полосы, а контуры с высокой добротностью (более 100) — напротив, при удовлетворительном ослаблении граничных частот имеют совершенно недопустимую неравномерность АЧХ внутри рабочей полосы.

Здесь нам придется прервать беседу, и вот почему. Все эти слова — «удовлетворительная», «неудовлетворительная», «хорошая», «недопустимая» и т. п. являются субъективной оценкой таких параметров, которые на самом деле должны оцениваться (и оцениваются) количественно, определенными цифровыми показателями.

В радиотехнике для оценки таких показателей, как степень усиления или ослабления сигнала, неравномерности АЧХ и ряда других, используют особую единицу измерения — *децибелл* (дБ), с которой тебе в дальнейшем придется сталкиваться постоянно. Поэтому сейчас самое время поближе познакомиться с этой единицей.

Само ее название состоит из двух частей — основной единицы *белл* (по имени изобретателя телефонного аппарата А. Г. Белла) и приставки *деци*, обозначающей *десятую часть*. Появление *децибелла* в качестве самостоятельной единицы объясняется тем, что в практической радиотехнике и электроакустике почти исключительно применяется именно децибелл, поэтому вместо того, чтобы каждый раз говорить и писать 0,1 белла, договорились в качестве основной *практической* единицы использовать децибелл, присвоив этой единице самостоятельное обозначение — дБ.

По своему физическому смыслу и математическому содержанию децибелл представляет собой безразмерную величину, характеризующую отношение двух каких-либо электрических (или акустических) величин. Чаще всего такими величинами



нами бывают напряжения, токи или мощности. Однако отношение это принято выражать не в натуральных единицах, т. е. «в раз», например в 10 раз или в 50 раз, а в логарифмических единицах. Это приводит к существенно различным количественным оценкам сравниваемых параметров, поскольку, скажем, увеличение сигнала в 2 раза соответствует его увеличению на +6 дБ, увеличение в 10 раз — на +20 дБ, в 100 раз — на +40 дБ, а *ослабление* в 1000 раз — на минус (!) 60 дБ (пишется: -60 дБ).

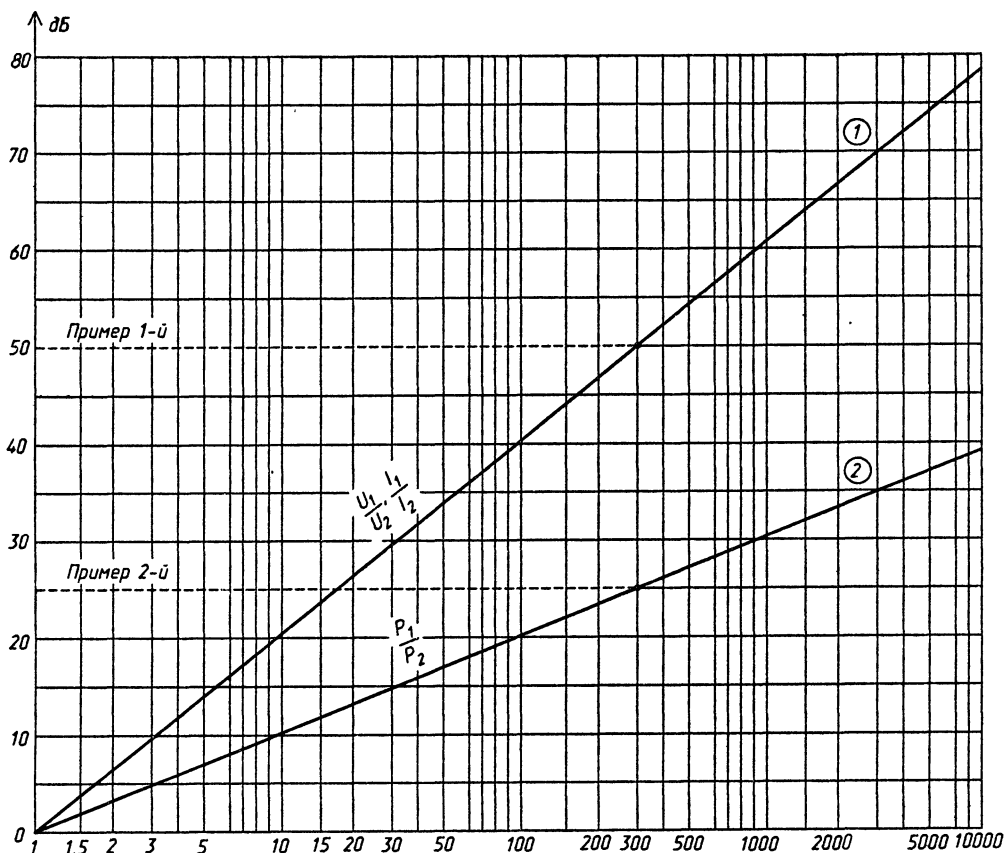


Рис. 3. График перевода отношений двух электрических величин в децибеллы

Вообще говоря, для перевода «разов» в децибеллы и обратно можно пользоваться определенной формулой или справочными таблицами, занимающими, как правило, 5–6 страниц текста. Однако на этой стадии обучения и с учетом предстоящих реальных потребностей предлагается более простой, легкий и быстрый способ, показанный на графике (рис. 3), где по горизонтальной оси отложены в логарифмическом масштабе отношения двух величин «в раз», а по вертикальной — те же отношения в децибеллах. Две наклонные прямые на этом графике отражают соответственно отношения напряжений и токов (прямая 1) или мощностей (прямая 2).

Пользоваться графиком элементарно просто, однако на всякий случай упростим знакомство с этой методикой рассмотрением двух примеров.

### Пример 1

Напряжение сигнала на входе усилителя составляет 10 мВ, а на его выходе — 3 В. Определить усиление в дБ.

Отношение выходного напряжения ( $U_2 = 3$  В) к входному ( $U_1 = 0,01$  В) составляет

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{3}{0,01} = 300 \text{ раз.}$$

На горизонтальной оси графика находим значение 300 и из этой точки восстанавливаем перпендикуляр до пересечения с прямой 1, поскольку в данном случае речь идет о сравнении величин *напряжений*.

Этой точке на вертикальной оси соответствует значение 50 дБ. Вернее, поскольку речь идет об *усилении*, более точной будет запись не 50 дБ, а +50 дБ.

### Пример 2

В этом же самом усилителе *мощность сигнала*, расходуемая во входной цепи, составляет 10 мВт, а полезная мощность сигнала на выходе усилителя равна 3 Вт. Определить *усиление по мощности*.

Поскольку и в этом случае отношение  $P_2$  к  $P_1$  составляет 300 раз, мы из той же точки на горизонтальной оси восстанавливаем перпендикуляр, но уже до пересечения не с прямой 1, а с прямой 2, поскольку речь идет о мощности. Этой новой точке пересечения на вертикальной шкале соответствует значение +25 дБ (по мощности!).

Так что если в инструкции к приемнику, написано что он обеспечивает избирательность по соседнему каналу на диапазонах ДВ и СВ не хуже 60 дБ, это значит, что сигнал помехи от соседней станции будет ослаблен по амплитуде (!) относительно сигнала принимаемой станции (см. график!). Совершенно верно: в 1000 раз.

Вот теперь, когда мы вооружились новым инструментом для оценки избирательных свойств резонансных систем, можно привести следующие обязательные цифры, установленные ГОСТом для избирательности по соседнему каналу применительно к радиовещательным приемникам разных классов (табл. 2).

На первый взгляд может показаться странным выбор таких некруглых значений. Однако только на первый взгляд, потому что цифры избирательности как раз очень «круглые», если децибеллы перевести в «разы». Можно убедиться, воспользовавшись графиком, что 60 дБ — это 1000, 46 дБ — 200, 34 дБ — 50, а 26 дБ — 20 раз.

Но главное для нас сейчас не в этом. Главное состоит в том, что *никакой* одиночный колебательный контур с *любой* добротностью в принципе не может обеспечить подобную селективность при установленной тем же ГОСТом обязательной полосе пропускания в 9 кГц. Просто не может. А потому для обеспечения требуемых норм приходится искать другие решения. Одно из таких простых решений состоит в использовании вместо одиночных колебательных контуров *полосовых фильтров*.

Полосовой фильтр представляет собой обычный высокочастотный трансформатор, обе обмотки которого (и первичная, и вторичная) могут настраиваться независимо друг от друга на *разные* резонансные частоты.

Таблица 2

ИЗБИРАТЕЛЬНОСТЬ ПРИЕМНИКОВ  
РАЗЛИЧНЫХ КЛАССОВ

Класс приемника	Избирательность по соседнему каналу, дБ
Высший	60
I	46
II	34
III	26

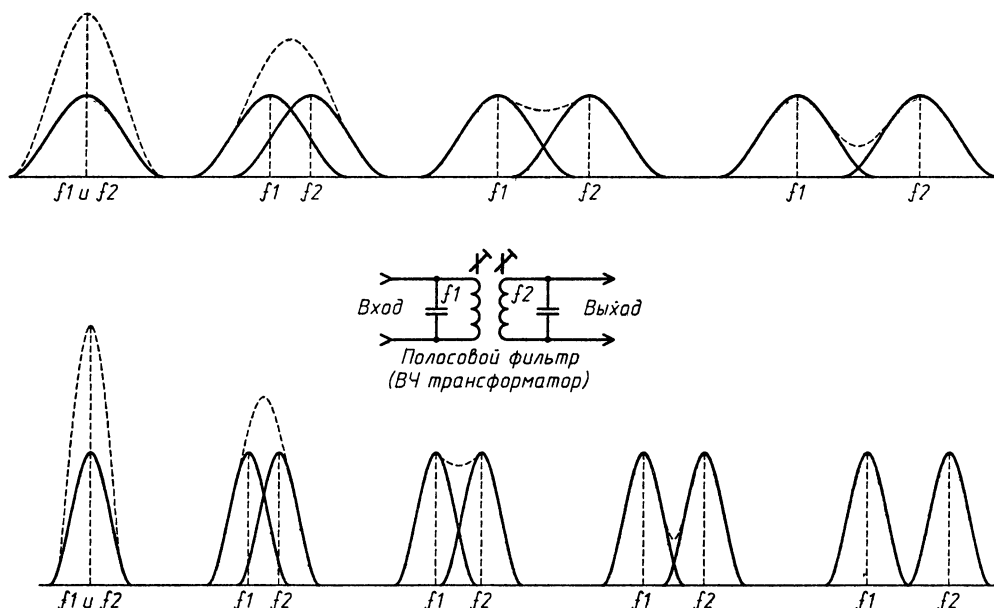


Рис. 4. Формирование результирующей кривой АЧХ полосового фильтра при разных частотах настройки входящих в него контуров

Слово «независимо» в этом определении нельзя понимать слишком буквально, поскольку взаимное влияние настроек обеих обмоток друг на друга на практике неизбежно, причем степень такого взаимного влияния напрямую зависит от *степени связи* обмоток. Чем меньше взаимная связь катушек (больше расстояние между ними), тем меньше степень взаимного влияния настроек и наоборот. Но сейчас, при рассмотрении *принципа работы* полосового фильтра, мы для простоты не будем учитывать это взаимное влияние настроек катушек друг на друга.

Принципиальная схема стандартного полосового фильтра приведена на рис. 4 (в центре). Там же показано формирование общей (суммарной) частотной характеристики фильтра в целом при разной степени относительной расстройки обеих обмоток для контуров с двумя различными значениями добротности — невысокой (верхний ряд семейства кривых) и относительно высокой (нижний ряд).

На самых первых (левых) графиках обоих рядов обе обмотки полосового фильтра настраиваются на одну и ту же резонансную частоту (разность расстроек равна нулю). При этом суммарная результирующая кривая практически полностью повторяет форму резонансной кривой каждого из двух контуров, увеличиваясь при этом вдвое по высоте. В этом смысле правомерно говорить о том, что полосовой фильтр, обе обмотки которого настроены на одну и ту же частоту, *как бы* обладает вдвое большей добротностью, чем каждый из контуров в отдельности.

Последующие (вправо от первого графика) рисунки показывают, как меняется величина и форма результирующей кривой при постепенном увеличении расстояния по шкале частот между частотами настройки входной и выходной обмоток полосового фильтра.

Нетрудно видеть, что по мере увеличения разности  $f_2 - f_1$  суммарная кривая довольно быстро убывает по амплитуде, одновременно «расширяясь» на уровне вершин обеих кривых. При некотором значении разности настроек  $f_2 - f_1$  (третьи по счету кривые) промежуток между двумя горбами становится практически плоским, что

приближает форму результирующей кривой полосового фильтра к идеальной теоретической П-образной форме.

По мере увеличения разности частот настроек плоская вершина суммарной кривой приобретает провал (четвертые слева кривые), а при достаточно большой разности частот суммарная кривая практически перестает существовать, заменяясь двумя отдельными независимыми кривыми одиночных резонансных контуров (пятый рисунок в нижнем ряду).

Сравнение двух рядов кривых показывает, что, используя в полосовом фильтре два контура с достаточно высокой добротностью (при оптимальном значении разности настроек  $f_2 - f_1$ ), можно получить суммарную резонансную кривую, обеспечивающую удовлетворительную избирательность относительно соседних каналов при неравномерности АЧХ в пределах рабочей полосы порядка 2...3 дБ.

Поскольку невозможно угадать заранее, какая именно величина добротности контуров окажется оптимальной, на практике всегда берут катушки с заведомо избыточной добротностью, а в процессе настройки контуров снижают добротность до необходимой простым шунтированием катушки (подключением параллельно катушке обычного резистора).

И в заключение темы о полосовых фильтрах укажем, что помимо прямого (полного) включения катушек фильтра в реальных схемах очень часто используют неполное, частичное подключение катушек как со стороны входа, так и со стороны выхода, используя для этого отвод от некоторой части витков катушки. Частичное включение позволяет существенно уменьшить «паразитное» влияние самой схемы усилителя (приемника) на собственные параметры полосового фильтра. Наиболее часто частичное подключение катушек применяется в полупроводниковой аппаратуре — в приемниках на транзисторах и микросхемах, где влияние схемы на параметры фильтра особенно ощутимо.

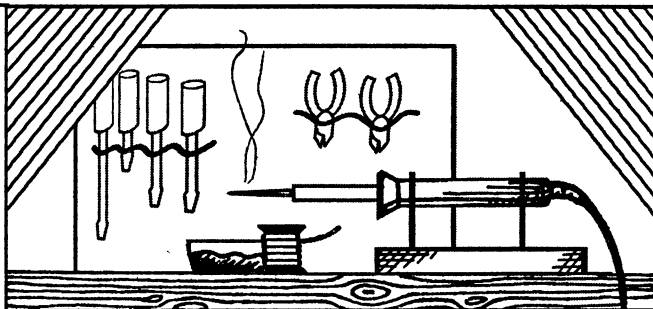


## Контрольные вопросы

1. Какие обязательные признаки характеризуют активный радиоэлемент?
2. Как следует понимать термин усиление применительно к ламповым или транзисторным усилителям?
3. Для чего внутри радиолампы необходимо создание вакуумной среды?
4. С какой целью нить прямонакального катода покрывают специальным «активным» слоем?
5. Почему вакуумный диод является односторонне проводящим?
6. Что называют «верхним загибом» характеристики диода и как надо понимать термин «ток насыщения»?
7. Что за единица измерения «децибелл», какова его размерность и как он соотносится с единицами измерения напряжений, токов и мощностей?
8. Что представляет из себя полосовой фильтр? Нарисуйте принципиальную схему полосового фильтра с частичным подключением со стороны входа и выхода.
9. Каким способом можно подбирать (регулировать) добротность катушек полосового фильтра в реальной схеме?



# Рабочее место



На одном из последних занятий предыдущего курса (в книге «Азбука радиолюбителя») мы изготовили очень полезное и нужное приспособление — магазин сопротивлений.

Сегодня тебе предлагается для самостоятельного изготовления похожее приспособление — магазин постоянных емкостей с диапазоном величин от 100 пФ до 100 мкФ с дискретным шагом в 100 пФ. Иными словами, магазин обеспечит тебе получение *любых значений* емкости в указанном диапазоне с точностью до 100 пФ, номиналы которых не предусмотрены ГОСТом и промышленностью не выпускаются. Например, 11700 пФ, 372400 пФ, 162,85 мкФ.

Обычно в конденсаторах с такими значениями емкости потребности не возникает, и для практического применения, как правило, оказывается достаточно конденсаторов со стандартным значением емкости, предусмотренных ГОСТом, например 220 пФ, 470 пФ, 3000 пФ, 6,3 мкФ, 68 мкФ и т. д.

Однако когда мы созреем до самостоятельного изготовления и главное — регулировки таких приборов, как многоканальные низкочастотные эквалайзеры, различные низкочастотные и высокочастотные фильтры, генераторы звуковых частот, электромузыкальные инструменты и т. п., магазин емкостей может оказаться совершенно незаменимым инструментом, экономящим уйму времени на подборе и подгонке емкостей многочисленных конденсаторов.

Магазин емкостей может оказаться полезным и в тех случаях, когда надо определить емкость конденсатора, на корпусе которого отсутствует маркировка. Для этого используют простейшую схему сравнения, включая *последовательно* испытуемый конденсатор и магазин емкостей в цепь любого источника переменного напряжения и, изменяя номиналы емкостей магазина, добиваются *одинакового падения напряжения* на обоих конденсаторах. Это возможно только в случае равенства емкостей обоих конденсаторов.

Магазин состоит из нескольких совершенно одинаковых *декадных линеек*, суммарная емкость в каждой из которых складывается из емкости десяти *одинаковых конденсаторов* с шагом, равным емкости одного конденсатора.

Например, линейка, состоящая из десяти конденсаторов по 100 пФ, позволяет *набрать* с помощью клавишного переключателя любую емкость в пределах от 100 до 1000 пФ с шагом в 100 пФ, а линейка с десятью конденсаторами по 1 нФ — любую емкость в пределах от 1 до 10 нФ. А поскольку все декады магазина включены параллельно, оказывается возможным *набирать* любое значение емкости с дискретностью, определяемой емкостью одного конденсатора низшей декады.

Поскольку все декады абсолютно идентичны и по схеме, и по конструкции, читателю самому предстоит решить, каким количеством декад следует ограничиться. Из собственного опыта могу сказать, что оптимальным следует считать магазин из пяти декад

В этом случае «цена» каждой декады будет следующая:

- 1 декада: от 100 до 1000 пФ
- 2 декада: от 1000 до 10000 пФ (или от 1 до 10 нФ)
- 3 декада: от 10 до 100 нФ
- 4 декада: от 100 до 1000 нФ (или от 0,1 до 1,0 мкФ)
- 5 декада: от 1 до 10 мкФ

Вообще говоря, ничуть не повредит наличие шестой декады с диапазоном от 10 до 100 мкФ, однако на практике подбирать величины электролитических конденсаторов с определенной точностью приходится лишь в исключительных, крайне редких случаях, поэтому без шестой декады вполне можно обойтись.

Принципиальная электрическая схема одной декады приведена на рис. 5. Основу декады составляет десятикнопочный переключатель типа П2К с зависимыми группами. Это значит, что при нажатии любой кнопки все остальные кнопки автоматически возвращаются в исходное, ненажатое положение.

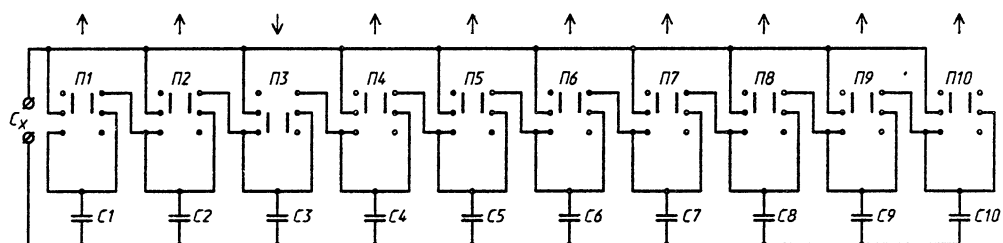


Рис. 5. Принципиальная схема одной декады магазина емкостей

Помимо переключателя в схему линейки входят 10 одинаковых конденсаторов с емкостью, соответствующей *шагу* данной декады, т. е. для первой декады емкость каждого конденсатора равна 100 пФ, для второй — 1000 пФ (или 1 нФ), для третьей — 10 нФ, для четвертой — 100 нФ (или 0,1 мкФ) и для пятой — 1 мкФ.

И переключатель, и конденсаторы размещены на печатной плате единого размера и рисунка для всех пяти декад. Чертеж печатной платы с указанием ее размеров приведен на рис. 6.

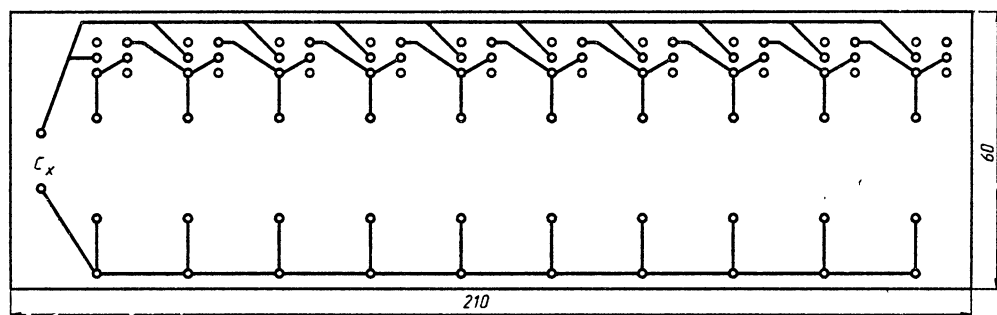


Рис. 6. Печатная плата одной декады магазина емкостей

Если внимательно присмотреться к нему, то можно заметить, что самая нижняя на рисунке общая для всех конденсаторов дорожка имеет по два отстоящих друг от друга отверстия. Это сделано потому, что в разных декадах длина конденсаторов различна: для одних типов она составляет 10...15 мм, для других — 25...30 мм.

А поскольку мы решили платы для всех декад делать одинаковыми, в рисунке платы предусмотрены два отстоящих друг от друга «земляных» пятка с отверстиями под вывод конденсатора.

Теперь относительно выбора типов и подбора экземпляров конденсаторов. Поскольку наш магазин является хоть и самодельным, но все же измерительным прибором, нужно, чтобы он отвечал определенным требованиям и, как принято говорить у метрологов, относился к какому-либо классу точности. Это надо понимать так, что если на шкале магазина *набрано* любое числовое значение емкости, то фактическая емкость на выходных клеммах магазина не должна отличаться от этого числового набора более чем на 2, 5, 10 или 20%. Вот это число процентов и определяет класс точности магазина в целом.

Ясно, что класс точности «2» лучше, чем «20», однако в радиолюбительской практике высокая точность магазина емкостей не требуется, а приобрести или подобрать десять одинаковых конденсаторов с разбросом емкостей в 2% или даже 5% — дело довольно хлопотное, а главное — никому не нужное.

Почему не нужное? Представим, что все до единого конденсатора у нас имеют допуск не хуже  $\pm 5\%$ , и на всех пяти декадах установлена цифра 5. Это должно соответствовать емкости 5555500 пФ.

В каких пределах при этом имеет право оказаться реальная емкость на выходе магазина? Посчитаем. Начнем с того, что допуск в  $\pm 5\%$  может быть как положительным, так и отрицательным, т. е. фактическая емкость каждого конденсатора может быть на 5% как больше, так и меньше обозначенной на его корпусе. Возьмем два крайних случая и посмотрим, что это будет означать на практике. Поскольку допуск у всех без исключения конденсаторов составляет  $\pm 5\%$ , то и общий допуск всей группы будет таким же, а значит и отклонение суммарной емкости магазина составит  $\pm 5\%$  от величины 5555500 пФ. А это составляет  $\pm 277775$  пФ.

Иными словами фактическая емкость на выходных клеммах магазина вполне может оказаться где-то между 5277725 и 5833275 пФ, что на самом деле и соответствует разбросу в 555550 пФ или, что то же самое, допуску в  $\pm 5\%$  от набранного на декадах значения. Разница в целых полмикрочадады! Поэтому на самом деле не имеет никакого значения, какие цифры набраны на первой, второй и третьей декадах — их общая сумма все равно будет меньше «самопроизвольного» отклонения фактической емкости от набранного значения. И уж тем более эта фактическая емкость никак не будет зависеть от того, какой величины допуск окажется у конденсаторов первых трех групп.

Из этого примера следует извлечь урок, который надо не только запомнить, но и хорошенько уяснить, поскольку в дальнейшем, когда придется оценивать результаты измерений различных электрических величин, надо будет всегда ясно представлять себе, что ты измерил и что это может означать на самом деле. А означать это может только одно:



При использовании любых измерительных приборов фактическое значение измеряемого параметра не может быть измерено или установлено по шкале прибора с точностью, превышающей класс точности прибора.

А для нашего примера это означает, что при классе магазина, обеспечивающем точность измерения не более  $\pm 5\%$  (иначе говоря в 10%) при величине суммарной установленной емкости в 5,5 мкФ бессмысленно устанавливать любые значения емкости на линейках, суммарная емкость которых будет меньше 0,55 мкФ.

И еще одна чисто практическая деталь. В начале темы было сказано, что во всех линейках все десять конденсаторов должны иметь по возможности абсолютно одинаковые величины емкости. Это утверждение остается в силе, но оно не распространяется на самый первый конденсатор в первой линейке. Его емкость должна быть не 100 пФ, а меньше на величину собственной емкости магазина при «нулевом» значении набора (когда все кнопки всех регистров отжаты). Определить величину этой собственной емкости магазина при отсутствии измерителя емкости достаточно сложно, но тем не менее возможно. Для этого надо воспользоваться методом, о котором уже упоминалось: подключить к источнику любого переменного напряжения последовательно выходные клеммы магазина и некоторого вспомогательного конденсатора небольшой емкости (до 100 пФ). Подключая попеременно конденсаторы разной емкости и сравнивая величины переменного напряжения на мосте и вспомогательном конденсаторе, надо добиться равенства этих двух напряжений. Это возможно только в том случае, если окажутся равны обе емкости.

Допустим, такое положение соответствует емкости вспомогательного конденсатора 39 пФ. В этом случае емкость первого конденсатора первой линейки магазина надо взять не 100 пФ, а  $100 - 39 = 61$  пФ или ближайшее «стандартное» значение, в нашем случае — 62 пФ.

И последнее: рабочие напряжения всех без исключения конденсаторов надо взять максимально возможными и желательно одинаковыми, чтобы магазином можно было пользоваться при работе со схемами, где рабочие напряжения могут быть достаточно высокими (например, в ламповых схемах). При любых обстоятельствах недопустимо подключать магазин к цепям, реальное напряжение в которых выше рабочего напряжения конденсаторов магазина.

Ну вот на этом и закончим наше первое занятие. Так как первое занятие было весьма насыщенным и объемным, в качестве практической работы предоставляется возможность приступить к созданию магазина емкостей — на это уйдет не один полный рабочий день. А практические работы с усовершенствованием нашего первого приемника, разумеется, обязательно появятся в ближайшем будущем, когда мы хотя бы чуть-чуть познакомимся с работой транзисторов и радиоламп.

До следующей встречи!

# ЗАНЯТИЕ ВТОРОЕ

## Теория



## Урок 1. ПРИНЦИП РАБОТЫ ЛАМПОВОГО ТРИОДА

Трехэлектродная лампа (триод) является краеугольным камнем всей ламповой техники, а происходящие в ней процессы лежат в основе всех процессов, протекающих в любых (или почти в любых) более сложных лампах, поэтому рассмотрению принципа работы триода и физики происходящих в нем процессов мы уделим самое пристальное внимание. И начнем с того, что чуть раньше называли третьим к и т о м ламповой техники.

Вернемся к рис. 1 (с. 12), иллюстрирующему работу лампового диода, и дополним его еще одним элементом: поместим где-то недалеко от катода обыкновенную мелкоячеистую металлическую сетку и выведем от нее наружу баллона провод. И пусть этот дополнительный электрод так и называется — сетка (рис. 7).

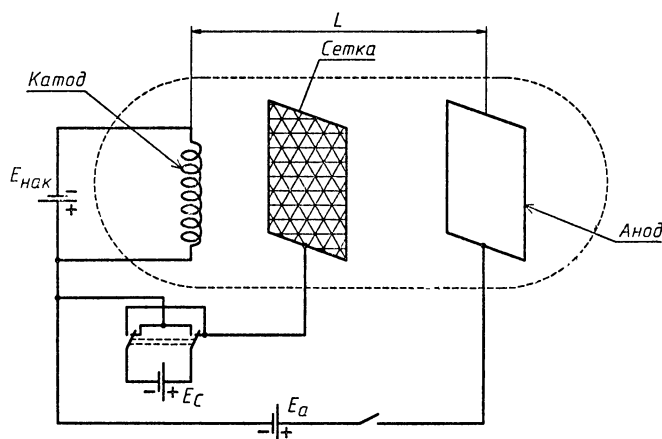


Рис. 7. Схематическое устройство лампового триода

Что изменилось в принципе работы диода и его электрических характеристиках от введения этого дополнительного электрода? А ничего не изменилось. Дело в том, что какими бы мелкими ни были ячейки нашей сетки, их размеры несопоставимы с размерами одного отдельного электрона, поэтому электроны будут по-прежнему свободно пролетать сквозь сетку, как если бы этой сетки и не было.

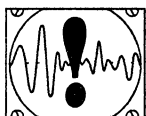
А что изменится, если мы соединим вывод сетки с выводом катода? И опять ничего не изменится, потому что на сетке окажется такой же потенциал, что и на катоде, а значит, разность потенциалов между катодом и сеткой будет равна нулю и никакого *дополнительного* электрического поля для воздействия на поток свободных электронов не появится.

А что произойдет, если мы соединим вывод сетки с выводом анода? Вот теперь картина резко изменится. На первом уроке первого занятия была приведена формула Лэнгмюра, из которой следовало, что величина анодного тока пропорциональна (в степени  $3/2$ ) напряжению на аноде и обратно пропорциональна расстоянию между анодом и катодом. Иными словами, если бы мы в 10 раз сократили это расстояние, то для получения той же величины анодного тока можно было в 10 раз уменьшить напряжение на аноде.

Запомним это, потому что очень скоро мы к этому вернемся. А теперь на какое-то время отключим источник анодного напряжения (или попросту вынем из нашей теоретической лампы анод) и будем рассматривать оставшуюся часть лампы как диод, в котором роль анода выполняет наш новый электрод — сетка.

На самом деле эта новая лампа абсолютно ничем не отличается от обычного диода и полностью подчиняется всем законам работы нормального диода. Правда, придвинув новый сетчатый анод к катоду и уменьшив таким образом в 10 раз расстояние анод–катод, мы тем самым увеличили в те же 10 раз эффективность воздействия анодного напряжения на величину анодного тока. Но поскольку мы не ставили своей целью увеличение анодного тока, а хотим сохранить его значение прежним, мы можем в 10 раз понизить величину анодного напряжения, т. е. взять  $E_{c+} = 0,1E_a$ .

Понятно также, что переключив тумблер на схеме рис. 7 из правого положения в левое, мы поменяем полярность анодного напряжения с положительной на отрицательную, в результате чего диод окажется запертым и анодный ток полностью прекратится. Отсюда мы сделаем важнейший для наших последующих рассуждений вывод:



*Воздействие потенциала сетки на величину анодного тока лампы носит такой же характер, что и воздействие потенциала анода, но отличается от него эффективностью, которая настолько больше, насколько сетка расположена ближе к катоду, чем анод.*

До сих пор мы рассматривали отдельно влияние на анодный ток напряжения на аноде и напряжения на сетке. А теперь посмотрим, как влияет на величину анодного тока одновременное воздействие обоих напряжений.

Включим вначале одно только анодное напряжение  $E_a$ , которое создаст между анодом и катодом положительное электрическое поле. Это поле заставит электроны двигаться в сторону анода, что создаст постоянный анодный ток  $I_a$ . Через ячейки сетки электроны пролетают совершенно свободно, не задерживаясь на ней, поэтому во внешнюю цепь сетки они не ответвляются, т. е. не создают никакого сеточного тока.

Будем считать, что напряжение анодной батареи равно 100 В (это упростит наши дальнейшие выкладки), а анодный ток установился на величине  $I_a = 10$  мА.

Теперь подключим вывод сетки к дополнительному (сеточному) источнику постоянного тока — батарее  $E_{c+}$  с напряжением 10 В. Если бы в этот момент анодное напряжение отсутствовало, то ток через лампу не изменился бы, поскольку сетка расположена к катоду в 10 раз ближе, а напряжение на ней в 10 раз меньше. Изменился бы только путь тока: теперь он протекал бы не от катода к аноду, а от катода к сетке, образуя во внешней цепи сеточный ток величиной 10 мА.

А теперь снова подключим анодную батарею и посмотрим, как поведут себя электроны в этом случае. Преодолев под действием электрического поля  $E1$  (рис. 7) расстояние катод–сетка, они окажутся у стартовой линии нового электрического поля  $E2$ , напряженность которого определяется разностью потенциалов  $E_a - E_{c+} = 100 - 10 = 90$  В.

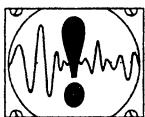
Иначе говоря, для электронов, достигших сетки, оставшаяся часть лампы (на участке сетка–анод) представляет собой обычный диод, в котором роль источника электронов играет не «катодное облако», а та масса электронов, которая к этому моменту достигла стартовой линии, т. е. сетки.

Но в отличие от электронов, входивших в «электронное облако» вокруг катода и находившихся в состоянии хаотического, неупорядоченного броуновского движения, электроны на стартовой линии уже приобрели некоторый запас кинетической энергии, соответствующий величине тока 10 мА. Этот факт имеет два важных следствия.

Во-первых, основная масса разогнанных до определенной скорости электронов проскакивает через ячейки сетки, не ответвляясь в ее внешнюю цепь и не создавая заметного сеточного тока, а во-вторых, эта энергия, складываясь с энергией от поля  $E2$ , приводит почти к двукратному увеличению начального анодного тока.

А теперь сделаем самое важное: подключим к сетке вместо батарейки  $E_{c+}$  батарейку  $E_{c-}$  также с напряжением 10 В, но уже отрицательной полярности. Теперь электроны «катодного облака» окажутся под одновременным воздействием двух электрических полей: положительного поля анодной батареи, которое будет притягивать электроны к аноду с некоторой силой  $+P$ , и отрицательного поля сетки ( $-E1$ ), которое будет отталкивать электроны обратно к катоду с точно такой же по величине, но противоположно направленной силой  $-P$ .

Сумма этих двух сил будет, разумеется, равна нулю, в результате ток через лампу прекратится в силу отсутствия причины. Само собой разумеется, что и в этом случае никакого «сеточного» тока во внешней цепи сетки не будет. В результате мы пришли к самому главному, самому важному заключению — к нашему третьему киту:



Введя в ламповый диод дополнительный электрод — управляющую сетку — мы получили возможность изменять в широких пределах величину тока через лампу путем изменения в небольших пределах напряжения на ее сетке. При этом на внешней нагрузке лампы можно выделять значительную электрическую мощность, пределы которой ограничиваются мощностью анодной батареи и никак не связаны с мощностью подводимого к сетке сигнала.

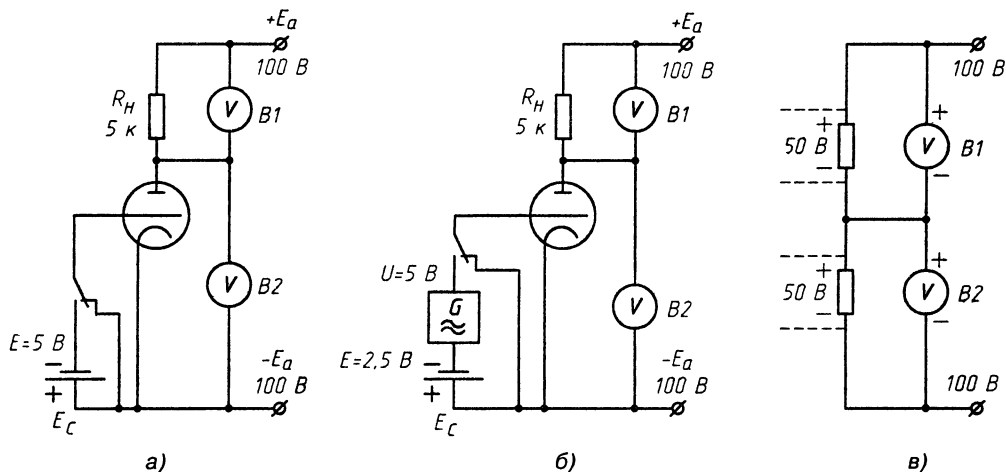


Рис. 8. К анализу работы лампового каскада на триоде

Для того, чтобы эта истина стала совсем уж очевидной, приведем некоторый сильно упрощенный расчет простейшего лампового каскада на триоде, изображенного на рис. 8. Здесь уже знакомый нам триод с напряжением анодной батареи  $E_a = 100$  В, анодным током (без влияния сетки!)  $I_a = 10$  мА и резистором нагрузки  $R_H = 5$  кОм, включенным последовательно в цепь анода. Параллельно резистору мы включим вольтметр  $B1$ , который будет фиксировать падение напряжения на резисторе нагрузки, а между анодом и катодом — вольтметр  $B2$ , который будет показывать фактическое напряжение на самой лампе.

Соединим сетку с катодом (тумблер на схеме вправо), превратив триод в обычный диод. Установившийся анодный ток 10 мА, протекая через резистор нагрузки, создаст на нем падение напряжения 50 В, которое зафиксирует вольтметр. При этом на самой лампе (между анодом и катодом) останется  $U_a = 100 - 50 = 50$  В.

Теперь переключим тумблер влево и подадим на сетку отрицательное напряжение. Чтобы полностью компенсировать влияние анода, это напряжение в нашем случае должно составлять  $1/10$  величины анодного напряжения, т. е.  $U_c = -(50 : 10) = -5$  В. При этом анодный ток в лампе прекратится, а падение напряжения на резисторе составит 0 В, что зафиксирует вольтметр.

Следует сразу же оговориться, что такое сильно упрощенное толкование явно некорректно, поскольку при постепенном увеличении отрицательного напряжения на сетке также постепенно будет уменьшаться анодный ток и соответственно падение напряжения на нагрузке. И к тому моменту, когда лампа окажется запертой, напряжение анод–катод будет уже не 50, а 100 В, так что для полного запираения триода к концу этого процесса на сетку понадобится подавать не  $-5$  В, а  $-10$  В.

Это расхождение не меняет принципиальной картины происходящих процессов, влияя лишь на его количественную оценку, что находит отражение в существовании двух видов характеристик любой лампы — статических и динамических.

Но поскольку мы этих тонкостей пока не знаем, временно закроем глаза на эти различия, поскольку для нас сейчас важнее теоретическая сторона дела.

Итак, будем считать, что, меняя напряжение на сетке от  $-5$  В до 0, мы тем самым меняем ток через лампу от 0 до 10 мА, что приводит к изменению падения напряжения на резисторе нагрузки от нуля до 50 В.

Теперь слегка изменим цепь управляющей сетки, включив последовательно с сеточной батарейкой источник переменного напряжения с амплитудой 5 В, и одновременно уменьшим напряжение батарейки до 2,5 В (рис. 8,б). Во время поло-



жительного полупериода переменного напряжения (+2,5 В) суммарное напряжение на сетке будет равно  $U_c = (+2,5) + (-2,5) = 0$ , а во время отрицательного полупериода составит  $U_c = (-2,5) + (-2,5) = -5$  В.

Иными словами, в новой схеме напряжение на сетке будет меняться в тех же пределах (от 0 до -5 В), но с частотой переменного напряжения. Естественно, что с такой же частотой на резисторе нагрузки будет меняться падение напряжения от 0 до 50 В, т. е. появится переменное напряжение той же частоты и формы, что и напряжение на сетке, но в 10 раз большее по амплитуде.

Исходя из этого можно сказать, что лампа как бы усилила подведенное к сетке напряжение в 10 раз (на самом деле лампа ничего не усиливает, а всего лишь управляет электронным потоком анодной батареи).

Но это отнюдь не самое главное. Главное состоит в том, что при падении напряжения 50 В на резисторе 5 кОм выделяется электрическая мощность, равная, Вт,

$$P_{\text{нагр}} = \frac{U^2}{R} = \frac{50^2}{5000} = 0,5.$$

При этом в цепи сетки энергия источника переменного напряжения вообще не расходуется, поскольку в любой момент времени напряжение на сетке остается отрицательным относительно катода, а следовательно, не возникает никакого сеточного тока.

Итак, мы подошли к самому главному, к нашему третьему киту ламповой техники. И состоит это главное в следующем:



Применение лампы с управляющей сеткой дает возможность получить на выходе устройства электрический сигнал достаточной мощности, не расходуя при этом мощность управляющего сигнала.

Уяснив принцип работы триода, мы можем теперь перейти к более детальному анализу и количественным оценкам его электрических параметров, зависимости этих параметров от питающих напряжений, характера нагрузки и друг от друга. Эти сведения помогут нам точно оценить достоинства и недостатки триода и тем самым очертить круг задач, которые можно решать с помощью триода, а следовательно, и область его применения.

Основным инструментом для оценки качества и потенциальных возможностей любой лампы служат семейства ее статических и динамических характеристик, отражающих поведение лампы при разных питающих напряжениях и нагрузках.

Чуть раньше мы уже столкнулись с тем, что наличие резистора нагрузки в анодной цепи лампы существенно меняет картину влияния управляющей сетки на величину анодного тока, а также изменяет величину «запирающего» напряжения на самой сетке. Вернемся к этому еще раз.

Из предыдущего числового примера мы помним, что при полностью запертой лампе на резисторе нагрузки нет падения напряжения ( $U_{\text{нагр}} = 0$ ), а все напряжение анодной батареи приложено к лампе ( $U_{\text{лампы}} = 100$  В). А при токе в 10 мА напряжение батареи поделится поровну между резистором нагрузки и лампой ( $U_{\text{нагр}} = U_{\text{лампы}} = 50$  В).

А теперь посмотрим на рис. 8,в, где вместо лампы включено обычное активное сопротивление, которое мы называли  $R_i$ . И если величина этого сопротивления будет такой же, что и  $R_a$  ( $R_i = R_a = 5$  кОм), то показания вольтметров на обоих рисунках совпадут, т. е. будут равны 50 В. Это позволяет нам сделать следующее заключение:



При данных величинах питающих напряжений и в установившемся режиме мы можем рассматривать участок анод–катод лампы как некое эквивалентное активное сопротивление.

Это понятие является одним из важнейших при любых расчетах ламповых схем. Называется оно внутренним сопротивлением лампы и обозначается  $R_i$ . Как и любое активное сопротивление,  $R_i$  выражается в единицах сопротивления (Ом, кОм, МОм).

Внутреннее сопротивление лампы — один из основных ее параметров, приводимых в справочниках, и в то же время внутреннего сопротивления лампы как такового не существует. Внутреннее сопротивление радиолампы — классический пример виртуальной реальности. Оно возникает в момент включения схемы, существует, пока радиолампа работает, и исчезает при выключении источника питания. Можно распилить радиолампу пополам, но никакого внутреннего сопротивления в ней не обнаружить, потому что внутреннее сопротивление радиолампы — это одна из характеристик конфигурации и плотности электронного потока, существующего внутри ее конструкции только в процессе работы и постоянно изменяющаяся свое значение в зависимости от рабочего режима на ее электродах, отсутствия, наличия и величины полезного сигнала и ряда других факторов.

А называется этот параметр сопротивлением потому, что в электрических расчетах, которые вполне правомерно проводить по формулам классической электротехники, промежуток катод–анод внутри работающей лампы можно рассматривать как обычное активное сопротивление.

Другим важнейшим параметром лампы является ее коэффициент усиления, обозначаемый греческой буквой  $\mu$  и не имеющий никакой размерности. Хотя практически все, кто работает с радиолампами, предпочитают выражать величину  $\mu$  «в раз», имея при этом в виду, что лампа усиливает подводимый сигнал во столько-то раз. В частности, теоретический триод в нашем числовом примере имел величину  $\mu = 10$ .

Впрочем, следует снова оговориться. Приведенная цифра 10 характеризует не коэффициент усиления самого отдельно взятого триода, а лампового каскада, включающего кроме собственно триода еще и резистор нагрузки, источник переменного напряжения в цепи сетки, сеточную и анодную батареи, параметры которых могут меняться в широких пределах, что приводит к изменению коэффициента усиления каскада. Тогда как параметр  $\mu$ , приводимый в справочниках, характеризует именно усилительные способности самой лампы и не зависит от режима ее использования.

Так что же это за параметр и что конкретно он характеризует? Коэффициент усиления лампы  $\mu$  показывает, во сколько раз изменение напряжения на сетке действует на анодный ток сильнее, чем изменение напряжения на аноде:

$$\mu = \frac{\Delta U_a}{\Delta U_g} \quad (\text{при } I_a = \text{const}).$$

Практически измерение этого параметра производится следующим образом: при неизменном (среднем для данной лампы) значении анодного тока изменяют на возможно меньшую величину анодное напряжение, а затем возникшее изменение тока компенсируют изменением постоянного напряжения на сетке. Отношение изменения анодного напряжения к соответствующему изменению напряжения на сетке и есть коэффициент усиления лампы.

В ряде литературных источников можно столкнуться вместо параметра  $\mu$  с параметром  $D$ , который называется проницаемостью лампы.

Следует знать, что эти два параметра являются взаимно обратными величинами, т. е.

$$\mu = \frac{1}{D}, \text{ а } D = \frac{1}{\mu}.$$

Поскольку коэффициент усиления всегда больше единицы, проницаемость обязательно является числом дробным, а потому её часто выражают в процентах. Например, коэффициенту усиления 50 соответствует проницаемость  $1/50$  или 2%.

И, наконец, третьим важнейшим параметром лампы является крутизна ее анодной характеристики. Чтобы стал понятным и наглядным смысл этого словосочетания, рассмотрим отдельно каждое из этих слов.

Со словом «характеристика» мы уже столкнулись при анализе работы диода. Вернемся к рис. 2 и посмотрим внимательно. На рисунке изображена не одна, а пять отдельных характеристик зависимости анодного тока от анодного напряжения для пяти разных значений температуры катода.

Такой график, совмещающий в себе несколько характеристик при одном изменяющемся, но неизменных остальных параметрах, называется *семейством характеристик*. В данном случае изменялась температура катода, а все остальные параметры оставались неизменными, в том числе (и это для нас сейчас будет самым главным!) расстояние между анодом и катодом.

Но теперь мы уже знаем, что это расстояние однозначно определяет степень зависимости анодного тока от анодного напряжения. И если бы мы это расстояние уменьшили, то при возрастании анодного напряжения на ту же величину ток через лампу вырос бы значительно больше.

И как такое изменение отразилось бы на характеристике диода? Это наглядно видно из рис. 9, на котором кривой *A* соответствует относительно большое расстояние между анодом и катодом, кривой *B* — маленькое расстояние, а кривой *Б* — некоторое промежуточное расстояние.

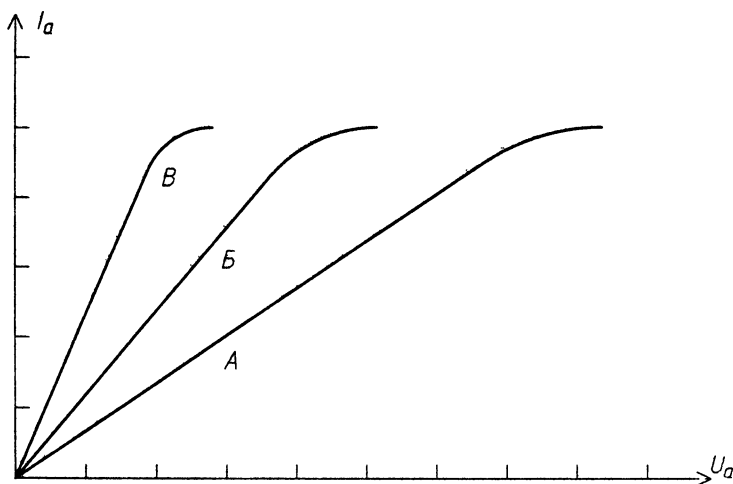


Рис. 9. Семейство анодных характеристик для трех диодов с разной крутизной характеристики

Из сравнения этих трех характеристик видно, что единственное их различие состоит в степени наклона или иначе в крутизне характеристик. Отсюда становится понятным, почему третий определяющий параметр называли крутизной характеристики и что именно он отражает.

Из нашего примера ясно видно, что параметр «крутизна» зависит прежде всего от конструкции лампы, а не от режима ее использования, и потому характеризует именно саму лампу, а не ламповый каскад в целом. Что же касается точного математического определения понятия крутизны (обозначаемого заглавной латинской буквой  $S$ ), то оно звучит так:



*Крутизна характеристики лампы показывает, на сколько меняется анодный ток лампы при изменении напряжения на сетке на один вольт.*

Математически это выражается формулой:  $S = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_g}$  (при  $U_a = \text{const}$ ).

Итак, теперь мы знаем, что такое внутреннее сопротивление лампы, коэффициент усиления и крутизна ее характеристики. Каждая из этих величин характеризует лампу с какой-то одной стороны, но оказывается, что все они жестко связаны между собой одной замечательной зависимостью, которая называется основным уравнением лампы (или иначе формулой Баркгаузена). И выглядит эта зависимость так:

$$\frac{\mu}{SR_i} = 1.$$

Если же вместо коэффициента усиления использовать обратный по величине параметр *проницаемость* ( $D$ ), то основное уравнение примет еще более привлекательный вид:

$$SR_i D = 1.$$

Зная любые два из основных паспортных параметров, можно без труда определить третий:

$$\mu = SR_i, \quad R_i = \frac{\mu}{S}, \quad S = \frac{\mu}{R_i}.$$

Поэтому нередко в справочниках и паспортах на лампу приводят не все три, а только два из этих параметров.

Во всех приведенных формулах оперируют основными электрическими единицами (Ом, А, В), однако на практике (по крайней мере для абсолютного большинства приемно-усилительных ламп) гораздо удобнее выражать напряжение в вольтах, ток — в миллиамперах, а сопротивление — в килоомах. Кстати, во всех справочниках и паспортах на лампы внутреннее сопротивление выражают в кОм, а крутизну характеристики — в мА/В.

Важно уяснить, что применение электровакуумных приборов дает в наши руки мощный инструмент, позволяющий с помощью минимальных затрат энергии управлять весьма значительными энергетическими потоками. Это принято формулировать как *усилительные способности* радиоламп и транзисторов, хотя мы теперь знаем, что ни о каком усилении входного сигнала на самом деле речи быть не может, а имеет место процесс управления энергетическим потоком источника питания.

## Урок 2. ФОРМИРОВАНИЕ АЧХ СВЯЗАННЫХ СИСТЕМ

На предыдущем занятии мы однозначно установили, что одиночный колебательный контур любой добротности в принципе не в состоянии обеспечить мало-мальски удовлетворительную избирательность в отношении двух соседних станций (выше и ниже принимаемой) при требуемой для радиовещания полосе пропускания в 9 кГц и неравномерности АЧХ в пределах этой полосы хотя бы порядка 2...3 дБ.

Одновременно мы убедились, что в значительной мере с этой задачей может справиться двухконтурный полосовой фильтр с независимыми (или точнее — слабозависимыми) одиночными контурами, настраиваемыми на две близкие, но разные частоты. Получающаяся в этом случае суммарная АЧХ в отличие от одnogорбой кривой одиночного контура становится двугорбой, а при правильном выборе добротности каждой из катушек, оптимальной связи между ними и определенном «разносе» частот их настройки двугорбая кривая может превратиться в «плоскогорье», т. е. в некоторой полосе частот (называемой полосой пропускания или полосой прозрачности фильтра) между двумя горбами окажется совсем или почти совсем плоский участок, что соответствует весьма незначительной неравномерности АЧХ внутри полосы пропускания.

Впрочем, один полосовой фильтр, даже очень грамотно сконструированный, может обеспечить избирательность от соседних станций, далеко не отвечающую современным требованиям ГОСТ на радиовещательные приемники.

Но даже не это самое главное. Главное состоит в том, что при использовании полосового фильтра в качестве входного устройства возникает необходимость одновременной перестройки обоих его контуров во всем диапазоне принимаемых частот. А это в свою очередь требует применения в качестве органа настройки не одиночного, а сдвоенного конденсатора переменной емкости.

Мало того, даже и в этом случае оказывается, что идеальная настройка полосового фильтра, обеспечивающая симметрию АЧХ внутри полосы пропускания, возможна только в некоторой одной точке шкалы, поскольку обе катушки фильтра изначально настроены на разные частоты и при перестройке переменным конденсатором, обе секции которого имеют одинаковую емкость, эта симметрия неизбежно будет нарушаться, сводя на нет главные достоинства полосового фильтра.

Именно поэтому — из-за невозможности обеспечить хорошую избирательность приемника по соседним каналам простые приемники прямого усиления не получили развития дальше схемы 2-V-2.

Решение этой задачи оказалось возможным после изобретения супергетеродина метода приема, с которым мы познакомимся позже. А пока что займемся анализом работы различных резонансных систем, не увязывая их с реальными условиями, имеющимися в тех или иных приемниках.

Этот анализ неизбежно наводит на довольно простую мысль: если два связанных контура по избирательности и неравномерности АЧХ лучше, чем один, то, может быть, три связанных контура окажутся лучше, чем два, а четыре еще лучше, чем три? Почему бы и нет?

Оказывается, что эта простая мысль вовсе не лишена основания. Более того, она легла в основу создания многозвенных резонансных систем, получивших общее название фильтры сосредоточенной селекции (сокращенно — ФСС), а еще позже — к появлению твердотельных пьезокерамических, кварцевых и ряда других фильтров, в которых наперед заданная форма АЧХ на самые различные частоты

(от сотен кГц до десятков МГц) и полоса пропускания обеспечивались без использования катушек индуктивности и, как следствие, без необходимости их настройки.

Рассмотрим внимательно рис. 10. На нем изображены трехзвенный (слева) и четырехзвенный (справа) фильтры сосредоточенной селекции на одиночных резонансных контурах относительно высокой добротности. Каждый из них настраивается на свою собственную частоту, лежащую в пределах полосы прозрачности всего фильтра. Связь между отдельными контурами — емкостная, достаточно слабая, чтобы исключить сильное взаимное влияние настроек одного контура на другой. Там же приведены суммарные частотные характеристики обоих ФСС.

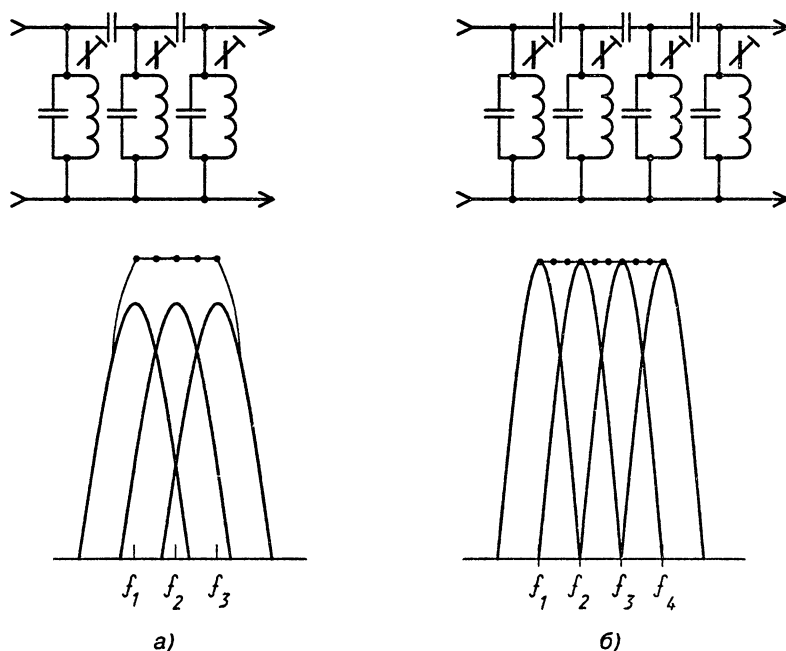


Рис. 10. Принципиальные схемы трех- и четырехзвенного ФСС и их АЧХ

Сравнивая эти две схемы и их АЧХ с АЧХ обычного полосового фильтра на рис. 4 (с. 18), легко заметить, что у полосового фильтра на контурах с низкой добротностью при заданной полосе пропускания ( $f_2 - f_1$ ) из-за пологих склонов нигде не годится избирательность от соседних станций, а при контурах с высокой добротностью при удовлетворительной избирательности недопустимо сужается полоса пропускания.

В трехконтурном ФСС при применении высокодобротных контуров уже оказывается возможным совместить хорошую избирательность с заданной полосой пропускания при весьма малом значении неравномерности внутри полосы пропускания. А четырехконтурный ФСС по этим показателям вообще приближается к идеальной П-образной АЧХ.

Для обеспечения хорошей «прямоугольности» АЧХ добротность каждого отдельного резонансного контура должна быть весьма высокой. На практике в радиовещательных приемниках она достигает величины  $Q = 200$ , а для обеспечения наилучшего согласования ФСС с предыдущим и последующим участками схемы и снижения потерь два крайние контура отличаются от остальных вдвое большей индуктивностью и соответственно вдвое меньшей емкостью. Кроме того, в транзис-

торных приемниках для уменьшения шунтирующего влияния схемы используют частичное (автотрансформаторное) подключение входного и выходного контуров ФСС.

Подводя итог сказанному, можно утверждать, что задача обеспечения высокой избирательности по соседним каналам при практически любой наперед заданной полосе пропускания и удовлетворительной неравномерности АЧХ в пределах этой полосы сравнительно легко решается путем применения полосовых фильтров и многозвенных ФСС.

Но вот беда: решив эту задачу, мы нисколько не приблизились к цели, которую изначально перед собой поставили. А цель у нас была очень ясная: из огромного количества радиостанций, «принятых» антенной, выделить и пропустить в приемник одну-единственную «нашу» станцию и отсеять все остальные, причем в первую очередь именно две соседние, самые близкие.

И при этом обеспечить эту функцию не на одной какой-то фиксированной частоте, а на всех частотах, принимаемых приемником, да к тому же еще и не на одном, а на нескольких диапазонах. А для этого резонансная система должна быть перестраиваемой на любую частоту в пределах диапазона принимаемых волн.

Однако мы уже видели, что даже в случае использования самого простого полосового фильтра для этого нужен как минимум сдвоенный конденсатор переменной емкости. Для трехзвенного ФСС такой конденсатор должен быть уже трехсекционным, а для четырехзвенного — четырехсекционным. Но даже и в этом случае идеальное согласование настроек контуров, входящих в ФСС, будет обеспечиваться только в одном положении роторов блока переменных конденсаторов, а любые другие его положения будут приводить к рассогласованию, которое в двух крайних положениях конденсатора достигнет совершенно недопустимых значений.

Нам остается только признать, что в приемниках прямого усиления наша цель остается неосуществимой. Иными словами, никакая практическая резонансная система, будучи установленной на входе приемника прямого усиления, не может обеспечить хорошую избирательность по соседнему каналу.

Более того, даже в супергетеродинных приемниках это оказывается невозможно. И поэтому задачу формирования АЧХ всего радиотракта вплоть до детектора «отобрали» у входных цепей и передали специальному, новому функциональному узлу, которого в приемниках прямого усиления не было.

Этот функциональный узел называется трактом промежуточной частоты и включает в себя, как правило, несколько каскадов усиления промежуточной частоты (УПЧ) на радиолампах, транзисторах или микросхемах, обеспечивающих усиление принятого сигнала до уровня, требуемого для эффективной работы детектора, набор резонансных контуров или твердотельных фильтров, обеспечивающих формирование наперед заданной формы АЧХ в соответствии с требованиями ГОСТ, а также ряд автоматических регулировок, обеспечивающих сохранение стабильности основных «потребительских» показателей при перестройке приемника с одной станции на другую.

Обо всем этом мы будем подробно говорить на одном из следующих занятий, посвященных знакомству с супергетеродинным методом приема радиосигналов. Что же касается входной цепи приемника, то в ней как и прежде остался так называемый входной перестраиваемый контур, настраивающийся при вращении оси переменного конденсатора в резонанс на частоту принимаемой станции, однако теперь от него перестали требовать высокую избирательность, равномерность АЧХ, «ограничив» его задачей предварительной селекции, т. е. «вылавливанием» сигнала принимаемой станции из смеси сигналов, принятых антенной.

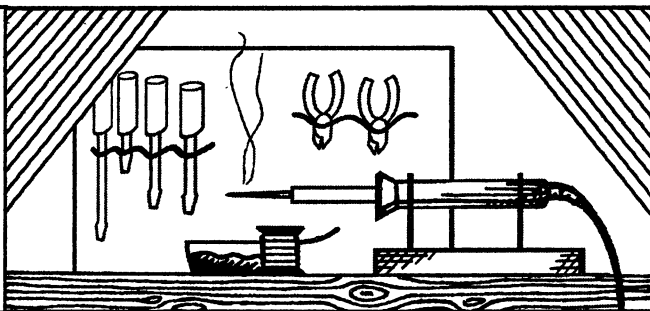
Вот на этом мы, пожалуй, сегодня и остановимся.



## Контрольные вопросы

1. Какие новые возможности лампы открываются при введении в ее конструкцию дополнительного электрода — управляющей сетки?
2. Ближе к какому из электродов — аноду или катоду располагается управляющая сетка и почему?
3. Как количественно связаны между собой степень влияния на анодный ток сетки и анода и их расстояния от катода?
4. Что такое проницаемость радиолампы, в каких единицах она выражается и как этот параметр связан с понятием коэффициента усиления лампы?
5. Каков физический смысл такого параметра, как крутизна характеристики, зависит ли он от электрического режима схемы и в каких практических единицах приводится в справочной литературе?
6. Напишите основное уравнение лампового триода — формулу Баркгаузена.
7. Крутизна характеристики некоего триода — 5 мА/В, статический коэффициент усиления — 50. Определите величину его внутреннего сопротивления.
8. Что такое внутреннее сопротивление лампы и как оно выглядит?

## Рабочее место



В предыдущей, первой книге, в этом разделе мы постепенно, шаг за шагом строили наше рабочее место, оборудуя его разными самодельными приспособлениями: емкостями для хранения различных деталей и стандартного крепежа, подставками для паяльников, намоточным станком, магазином сопротивлений и т. п. При этом попутно нам приходилось осваивать ряд специальных технологических процессов: сверление и резку металлов и пластмасс, травление фольгированных материалов и нанесение рисунков печатного монтажа, пайку проводов и выводов деталей, намотку катушек и др.

Практические навыки при выполнении всех этих технологических операций так же жизненно необходимы любому радиолюбителю, как знание теории радиотехники. Без квалифицированного умения сверлить, паять, резать, наматывать радиолюбителем стать просто нельзя, поэтому и в этой, второй книге, мы обязательно будем знакомить читателей с другими, не менее важными операциями: склеиванием, сваркой, гравировкой, работой со стеклом и деревом и т. п.



Большинство из этих работ окажется так или иначе связано с оборудованием рабочего места, поэтому их описание будет приводиться в разделе «Рабочее место», а раздел «Практика» мы оставим для работы с конструкциями, изготовленными самостоятельно, собственными руками, — приемниками, усилителями и т. п. Такое построение окажется наиболее рациональным и удобным по мере усложнения осваиваемого материала.

Сегодняшнее занятие мы посвятим одной из наиболее часто встречающихся в радиолюбительской практике работ — склеиванию.

Радиолюбителю чаще всего приходится склеивать пластмассы с пластмассами, пластмассы с металлами, пластмассы со стеклом, металлы со стеклом, оргстекло (плексиглас) с плексигласом, плексиглас с металлом, металл с металлом, дерево с деревом, картоном, кожей, тканями, кожу с металлами, резину с металлами и пластмассами. И в каждом из этих случаев требуются свои особые клеи и разные технологии склеивания.

Сегодня существуют сотни самых разнообразных клеев, клеящих паст и мастик, пригодных на все случаи жизни. Ограничимся рассмотрением нескольких наиболее распространенных в любительской практике видов. Но вначале о некоторых правилах, общих и обязательных при работе с любыми клеями.

Самое первое правило гласит: **качество и надежность клеевого соединения на 90% зависят от тщательности предварительной обработки и подготовки склеиваемых поверхностей.**

Это правило надо запомнить и неукоснительно выполнять во всех без исключения случаях, если не хочешь, чтобы склеенные детали через некоторое время развалились. Правила эти не слишком сложные и трудоемкие и состоят в следующем:

1. Вся поверхность обеих деталей в месте склеивания должна быть самым тщательнейшим образом очищена от любых следов краски, лака, ржавчины, жира, окисной пленки, после чего не менее тщательно промыта раствором стирального порошка, очищена от следов порошка в проточной воде и высушена до полного удаления следов влаги. Для обезжиривания склеиваемых поверхностей лучше всего пользоваться чистым авиационным бензином марки «Б70» или «Галоша». Следы ржавчины, окисная пленка или оксидное покрытие удаляются механически, путем соскабливания острым ножом, шабером или мелкозернистой наждачной бумагой. Масляная краска и лаки удаляются бензином, а нитрокраски — чистым ацетоном.

2. Для повышения прочности клеевого соединения идеально гладких поверхностей (полированный металл, оргстекло), а также дерева и картона склеиваемые места надо предварительно «зашероховатить», обработав их рашпилем, надфилем, абразивной шкуркой — в зависимости от материала. Склеиваемые поверхности из полистирола за 10–15 минут до склеивания желательно подготовить, смочив их при помощи кисточки чистым ацетоном.

3. Склеиваемые поверхности до нанесения клея должны быть по возможности максимально «пригнаны» друг к другу, чтобы между ними было как можно меньше бугорков и впадин, уменьшающих полезную площадь соприкосновения.

4. При любых видах склеивания клей должен наноситься предельно тонким и равномерным слоем. Нужно запомнить раз и навсегда, что бытующее мнение «чем больше клея, тем лучше», ошибочно.

5. Никогда нельзя спешить проверять прочность клеевого соединения — склеенные поверхности лучше всего «оставить в покое» по крайней мере на сутки, даже если клей называется «Момент».

6. Необходимо строго и неукоснительно соблюдать все рекомендации по технологии применения того или иного клея, которые, как правило, приводятся в инструкциях к ним.

А теперь о самих клеях, которые делятся на две группы: стандартные клеи промышленного изготовления и клеи самостоятельного, «домашнего» приготовления. Сначала о стандартных клеях, которые можно приобрести в торговой сети и на рынках стройматериалов.

**Клей «ПВА»** (поливинилацетатный). Отлично склеивает дерево, картон, стекло, кожу, ткань в любом сочетании. На обезжиренные поверхности клей наносят ровным тонким слоем, сразу же соединяют их и плотно сжимают струбциной, в тисках или под достаточно тяжелым грузом. И хотя считается, что клей «схватывает» уже через 20–30 минут, лучше оставить деталь в тисках до полного высыхания клея (на сутки).

**Клеи «БФ-2» и «БФ-4».** Оба клея предназначены для склеивания металлов, пластмасс, дерева, стекла, керамики, кожи и различаются в основном условиями эксплуатации клеевых соединений. «БФ-2» применяют, когда требуется высокая влаго- и теплостойкость клеевого шва, «БФ-4» обеспечивает некоторую эластичность и высокую морозостойкость соединения.

При использовании обоих клеев особую значимость приобретает тщательность подгонки деталей друг к другу. Максимальный зазор между ними по всей поверхности не должен превышать 0,05 мм.

Технология склеивания состоит в следующем: на тщательно подготовленные и обезжиренные поверхности кисточкой наносят тонкий предварительный «грунтовочный» слой клея, который сушат примерно час на воздухе или 15–20 минут при температуре 85...95 °С. После остывания деталей до комнатной температуры на склеиваемые поверхности наносят второй тонкий — «рабочий» — слой клея, дают ему слегка подсохнуть, после чего детали прижимают друг к другу, не допуская их сдвига, зажимают в струбцину и помещают в термостат или духовку при температуре 120...150 °С на 2 часа.

Если склеиваемые детали не допускают нагрева до таких температур, сушка должна продолжаться не менее двух суток, однако в этом случае прочность соединения будет существенно ниже, чем при нагревании.

Помимо этих двух клеев существует еще клей **«БФ-6»**, предназначенный в основном для склеивания тканей. В радиолюбительской практике он используется, как правило, для приклеивания радиоткани к передней доске акустических систем. Пользоваться им следует в соответствии с рекомендацией на самом тюбике.

**Клей «Уникум»** прекрасно соединяет детали из дерева, металла, резины, керамики, пластмассы в различных сочетаниях. С его помощью можно надежно приклеивать различные радиодетали к шасси аппарата или друг к другу. На предварительно обезжиренные ацетоном или бензином поверхности наносят тонкий слой клея, через две-три минуты поверх первого слоя — второй слой и плотно прижимают место склейки на 5–6 часов, однако прилагать к месту соединения механические усилия не рекомендуется до истечения суток.

**Универсальный клей «Момент-1»** отлично склеивает самые разные материалы в любых сочетаниях, однако в отличие от «Уникума» он огнеопасен и в какой-то мере токсичен. поэтому пользоваться им следует в проветриваемом помещении и вдали от открытого огня.

Клей поступает в продажу исключительно в тюбиках, на которых подробно описана рекомендуемая технология склеивания.

**Клей «88-Н».** Отличный клей для приклеивания резины, кожи и дерева к металлу. По виду и консистенции он напоминает стандартный «сапожный» резиновый клей, отличаясь от последнего светлым желто-коричневым цветом. Так же, как и резиновый клей, он «тянется» длинными тонкими нитями вслед за палочкой или кисточкой, что надо учитывать при пользовании им. В продаже клей «88-Н» встречается в тюбиках или стеклянных банках с плотно пригнанной пробкой.

При отсутствии доступа воздуха может сохраняться годами, хотя существует официальный гарантийный срок его хранения. При загустевании клей можно разбавлять бензолом до консистенции жидкой сметаны.

При склеивании резину или другой приклеиваемый материал после тщательного обезжиривания с помощью кисточки намазывают тонким слоем клея и дают ему высохнуть в течение 5 минут. Затем наносят таким же образом второй слой на приклеиваемую деталь и первый слой на металл. Оба слоя сушат 5–6 минут до полного «отлипания» сухого чистого пальца, после чего детали сразу и окончательно (!), без сдвига, прикладывают друг к другу и плотно прижимают. Если приклеивается листовая резина, ее лучше всего «прикатать» к металлу с помощью обычной скалки или резинового фоторолика. Недостатком клея «88-Н» является то, что он «не любит» воду.

К другим распространенным клеям промышленного производства следовало бы отнести и обычные **столярный** и **казеиновый** клеи, которыми радиолюбителю возможно придется пользоваться на практике при изготовлении деревянных футляров.

Помимо перечисленных клеев промышленного производства в мастерской любого радиолюбителя непременно присутствуют несколько клеев, которые проще изготовить самому, чем искать их в продаже.

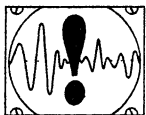
Такие клеи в основном предназначаются для склеивания деталей из ударопрочного полистирола и оргстекла при изготовлении корпусов приборов, нестандартных конструкционных деталей верньерно-шкальных механизмов, каркасов контурных катушек и других моточных узлов, ручек управления, декоративных обрамлений и т. п.

Существует несколько рецептов подобных клеев, различающихся в основном рецептурными пропорциями. В основе же всех этих клеев лежит, как правило, сметанообразный раствор самих этих материалов (полистирольная или плексигласовая стружка) в том или ином быстrolетучем растворителе (ацетоне, дихлорэтane и др.). Приведем несколько наиболее распространенных рецептов.

Клеи для склеивания между собой деталей из плексигласа.

1. Одну чайную или столовую ложку плексигласовых опилок (в зависимости от потребности) растворяют полностью, без осадка, в дихлорэтane при комнатной температуре до получения абсолютно прозрачного «сиропа».

Желательно готовить клей в количестве, необходимом для одноразового применения. В противном случае оставшийся клей хранить в стеклянной посуде с плотно притертой пробкой.



*Предупреждение! Чистый дихлорэтан токсичен, по этому следует избегать вдыхания его паров и попадания капель на кожу рук.*

2. Такое же количество плексигласовых опилок растворяют в смеси из 60% ацетона и 40% уксусной эссенции. Уксусную эссенцию можно заменить таким же количеством этилацетата.

В последнем случае желательно предварительно нагреть склеиваемые детали до 40 °С.

3. Наиболее предпочтительным следует считать 5% раствор плексигласовых опилок в ледяной уксусной или муравьиной кислоте. В таком растворителе опилки полностью растворяются за несколько минут, а полноценное склеивание под давлением происходит за 10–15 минут.

Для склеивания деталей из полистирола полистирольные стружки или опилки (приблизительно 10%) растворяют полностью до получения кашицеобразной массы в бензоле, толуоле или дихлорэтане. Склеиваемые детали тщательно обезжиривают и делают шероховатыми, после чего намазывают (обе!) клеем и дают постоять 3–5 минут. Затем детали плотно прижимают друг к другу, и в таком прижатом неподвижном состоянии оставляют на 6–10 часов.

Механические усилия к клеенному соединению можно прилагать не ранее чем через сутки.

И в заключение можно привести рецепты клеев, которым пользуются все любители магнитной звукозаписи для склеивания порвавшейся магнитной ленты, при монтаже записей и для приклеивания ракордов к лентам для «катушечных» магнитофонов.

1. Раствор 1% измельченного целлулоида в смеси из 50% метилглюколяцетата и 49% ацетона.

2. Смесь равных количеств (по 25%) метилового спирта, ледяной уксусной кислоты, метилацетата и метилглюколяцетата.

3. В случае невозможности приобретения указанных реактивов магнитную ленту можно с удовлетворительным качеством склеивать одной только уксусной эссенцией, однако в этом случае следует предварительно потренироваться на небольших обрезках ленты, поскольку при малом количестве эссенции склеивание получается ненадежным, а при большом количестве эссенции лента быстро размягчается и частично растворяется, делая место соединения либо бесформенным, либо сильно утонченным.

# ЗАНЯТИЕ ТРЕТЬЕ

## Теория



## Урок 1. МНОГОЭЛЕКТРОДНЫЕ И КОМБИНИРОВАННЫЕ ЛАМПЫ

Очевидные достоинства триода — возможность многократно «усиливать» слабые электрические сигналы в процессе эксплуатации очень скоро выявили и его очевидный недостаток: большую «проходную» емкость анод—сетка, измеряемую единицами пФ и препятствующую получению устойчивого усиления на высоких радиочастотах (коротких волнах), а также относительно низкий коэффициент усиления, не превышающий нескольких десятков, что заставило конструкторов искать пути к преодолению этих недостатков.

Первоначально была попытка поместить между сеткой и анодом некий заземленный экран. Физика действия такого экрана состояла в том, что в этом случае емкость между анодом и сеткой как бы разбивалась на две отдельные, соединенные последовательно емкости: емкость анод—экран и емкость экран—сетка. А как известно, общая емкость двух последовательно соединенных конденсаторов всегда меньше наименьшей из них.

Разумеется, конструкция экрана должна быть такой, чтобы она не препятствовала свободному пролету электронов от катода к аноду. Наиболее простым и естественным было решение поместить между анодом и управляющей сеткой вторую такую же сетку. Ее так и называли: экранная (или экранирующая) сетка. Разместили ее где-то посередине между управляющей сеткой и анодом и снабдили самостоятельным выводом.

Вначале эту сетку пытались заземлить или соединить с катодом, но выяснилось, что ее отрицательный потенциал только тормозит электронный поток, снижая и без того небольшой коэффициент усиления лампы.

Вот тогда и пришла идея подать на дополнительную сетку вместо отрицательного небольшой положительный потенциал, чтобы электронный поток не только не тормозился, но и получал дополнительный «разгон», увеличивая анодный ток. А чтобы вторая сетка продолжала выполнять свою основную функцию электростатического экрана, ее «заземлили» с помощью конденсатора достаточно большой емкости.

Результат превзошел все ожидания. Один из самых первых тетродов (а именно так называли новую четырехэлектродную экранированную лампу) отечественного производства СБ-154 (или 2Э1 по новой классификации) имел фантастические по тем временам параметры. Проходная емкость уменьшилась с 5 пФ до 0,005 (!) пФ, внутреннее сопротивление возросло с 30 кОм до 1,3 МОм, а коэффициент усиления превысил 1000! Это стало революцией, прорывом в создании радиоаппаратуры следующего поколения.

Экранированная лампа сразу же и бесповоротно вытеснила триоды из радиочастотного тракта и сделала возможным массовое производство радиоприемников прямого усиления с диапазонами длинных и средних волн (ЭКЛ, ЭЧС-2, ЭЧС-3, СИ-235), ставшие массовыми в середине 30-х годов. Характерный штрих: буква «Э» в названиях этих приемников обозначала именно слово «экранированный», а полностью название расшифровывалось так: «экранированный, четырехламповый, сетевой».

Свое название «экранированная лампа» новые тетроды оправдывали еще и тем, что для уменьшения влияния внешних полей внутренняя часть их баллона покрывалась распыляемой пленкой металла или тонкой металлической сеткой, соединенной внутри баллона с катодом.

Эта традиция сохранилась и в дальнейшем, и самые последние современные отечественные тетроды (6Э5П, 6Э6П, 6Э15П) имеют помимо экранной сетки еще и внутренний статический экран, соединенный внутри лампы с катодом или даже имеющий отдельный самостоятельный вывод (6Э6П).

Другим новшеством в процессе совершенствования тетродов стало использование так называемого лучевого принципа формирования потока электронов, состоявшего в том, что управляющая и экранная сетки тетрода выполнялись абсолютно идентичными, т. е. из одинаковой проволоки, с одинаковым шагом и числом витков, различаясь только диаметрами эллипса. При этом сетки располагались на крепящих траверсах таким образом, что витки экранной сетки располагались точно против витков управляющей сетки и как бы «прятались» за ее витками.

В результате электроны по пути к аноду «огибали» витки экранной сетки, не оседая на ней и не создавая экранного постоянного тока. Одновременно «сжатые» в узкие лучи электроны увеличивали плотность электронного потока настолько, что в промежутке между экранной сеткой и анодом образовывалась фиктивная, виртуальная область, имеющая потенциал ниже анодного и препятствующая возникновению «динатронного» встречного потока электронов.

В ламповой радиоаппаратуре последних лет, предшествовавших массовому внедрению полупроводниковой элементной базы, тетроды выполняли следующие функции: усилители напряжения и мощности высокой частоты в приемниках и передатчиках, усилители мощности в УЗЧ, генераторы и оконечные усилители в схемах строчной и кадровой разверток телевизоров и мониторов, оконечные широкополосные усилители напряжения (в видеосистемах и телевизорах). Специальные тетроды использовались в качестве регулирующих ламп в схемах высоковольтных стабилизаторов напряжения (6Э15П).

Электрические характеристики тетродов последних выпусков лежат в пределах:  $\mu = 240 \dots 2350$ ,  $S = 1,6 \dots 30,5$  мА/В,  $R_i = 2,5 \dots 150$  кОм, полезная выходная мощность  $P_{\text{вых}}$  — от единиц до 35 Вт (у тетрода 6П42С).

Казалось бы, всем хорош тетрод: и усиление у него огромное, и емкость проходная маленькая, и работает он на радиочастотах устойчиво, но и у него вскоре обнаружились недостатки, которых не было даже у триодов. А появились эти недостатки вследствие двух причин.

Мы уже упоминали, что постоянное напряжение на экранирующей сетке у тетрода обычно выбирается где-то между 2/3 и полным напряжением анодного источ-

ника и в дальнейшем остается неизменным во всех режимах работы тетрода. А напряжение на аноде, напротив, меняется в динамическом режиме (при наличии сигнала «раскачки» на управляющей сетке) в довольно широких пределах.

В результате во время отрицательного полупериода входного сигнала ток через лампу минимальный, падения напряжения на анодной нагрузке почти нет, и напряжение на аноде становится близким к полному напряжению источника питания (т. е. больше напряжения на экранной сетке).

А во время положительного полупериода анодный ток максимален, падение напряжения на нагрузке большое, в результате напряжение на аноде падает, к примеру, до половины напряжения анодного источника, т. е. становится меньше напряжения на экранной сетке, что в корне меняет характер анодного тока.

Ведь для летящих электронов совершенно безразлично, как называется электрод: анод или экранная сетка. Они летят туда, где больший положительный потенциал, т. е. уже не к аноду, а к экранной сетке, в результате чего анодный ток уменьшается на величину, на которую возрастает ток экранной сетки.

Это приводит к тому, что на анодной характеристике тетрода появляется характерный провал в области низких анодных напряжений, хорошо видный на семействе анодных характеристик любого тетрода.

Но существует и другая причина, из-за которой анодный ток уменьшается не только при низких анодных напряжениях, но как раз при наибольших. Эта причина состоит в том, что при напряжениях на экранной сетке, близких к напряжению источника, и максимальном анодном напряжении электроны разгоняются до таких скоростей, что их кинетической энергии оказывается достаточно для того, чтобы «выбить» с поверхности анода так называемые вторичные свободные электроны, поскольку при больших значениях анодного тока металлический анод значительно разогревается, а известно, что чем выше температура металла, тем слабее связь с ним электронов на его поверхности.

В результате непрерывной бомбардировки поверхности анода первичными электронами с этой поверхности начинает вылетать значительное число вторичных электронов, имеющих определенный запас кинетической энергии и вектор ускорения, направленный **от анода**.

Будучи отрицательно заряженными, эти электроны попадают в ускоряющее поле положительно заряженной экранной сетки и создают в ее цепи постоянный ток, направленный навстречу основному анодному току. Этот «вторичный» ток как бы вычитается из общего анодного тока, что приводит к появлению второго «провала» на анодной характеристике, но уже при больших напряжениях на аноде.

Это явление называется **динатронным эффектом**, и борьба с этим эффектом привела к созданию пятиэлектродной лампы — пентода.

Пентод отличается от тетрода только наличием дополнительной, третьей сетки, расположенной между экранной сеткой и анодом и обычно соединяемой с катодом. Иногда такое соединение осуществляется прямо внутри баллона лампы (например, в пентодах 6Ж1П, 6Ж32Б, 6Ж33А, 6Ж38П и др.), но чаще третья сетка имеет отдельный, самостоятельный вывод, что позволяет существенно расширить область использования пентодов.

Имея потенциал катода, т. е. будучи как и вылетевшие из катода электроны отрицательно заряженной, третья сетка «отталкивает» одноименно заряженные вторичные электроны обратно, в сторону положительного анода, тем самым препятствуя возникновению встречного электронного потока. В связи с назначением и основной функцией третьей сетки ее часто называют **антидинатронной** или **противодинатронной** сеткой.

Электрические характеристики пентодов близки к характеристикам тетродов. Величина проходной емкости пентодов обычно лежит в пределах 0,05...0,005 пФ, снижаясь иногда до значений 0,003...0,0035 пФ (пентоды 6Ж2П и 6Ж4П). Крутизна

характеристики колеблется от 4...5 до 25...30 мА/В, достигая у отдельных типов значения 55 мА/В (пентод 6Ж52П).

Большинство «стандартных» пентодов, обозначаемых в классификации буквой Ж, по виду анодных и особенно сеточных характеристик мало отличается от тетродов. У пентодов этой группы есть одна общая закономерность: с увеличением отрицательного напряжения на сетке анодный ток уменьшается довольно быстро и при минусе на сетке 4...6 В анодный ток становится равным нулю, т. е. лампа «запирается».

Пентоды такого вида принято называть **пентодами с короткой характеристикой**. Они во всех случаях полностью заменяют тетроды при использовании в качестве усилителей звуковых и радиочастот, генераторов, а наличие третьей сетки с независимым выводом позволяет помимо этого использовать пентоды в качестве смесителей или ламп с двойным управлением, например для изменения усиления каскада с помощью регулируемого отрицательного напряжения на третьей сетке. В передающих устройствах такие пентоды часто используют в качестве модуляторных ламп.

И хотя пентоды вскоре после их появления почти полностью вытеснили тетроды из высокочастотных трактов приемной и передающей аппаратуры, но и у них выявился один существенный недостаток, обусловленный именно короткой сеточной характеристикой. Но чтобы понять и уяснить смысл этого недостатка, нам придется на время переключиться на более общую тему.

На первых порах радиоприемники строились по схеме прямого усиления, т. е. все его каскады до детектора (а их число иногда достигало трех-четырех) усиливали непосредственно сигнал принимаемой частоты и имели **неизменный** коэффициент усиления, определявшийся параметрами применяемых ламп и режимом их использования.

Что же касается величины принимаемого сигнала, то она зависела от удаленности точки приема от передатчика, его мощности, вида приемной антенны и местных условий приема, а потому колебалась от мкВ/м до мВ/м, т. е. в тысячи раз. А поскольку усиление приемника оставалось неизменным, то и сигнал на выходе детектора изменялся, грубо говоря, во столько же раз (на самом деле работа диодного детектора ограничена снизу так называемым порогом чувствительности, а сверху — верхним загибом его анодной характеристики).

Это приводило к тому, что сигналы удаленных маломощных станций были едва слышны на фоне собственных шумов приемника, а мощные местные станции принимались с недопустимыми нелинейными искажениями.

Конечно, можно было бы регулировать общий коэффициент усиления радиотракта, введя ручную регулировку отрицательного напряжения, подводимого к антидинатронной или даже управляющей сетке (вместо батарейки начального смещения), но такую регулировку пришлось бы заново осуществлять для каждой новой принимаемой станции.

Естественным было желание, чтобы такую регулировку приемник осуществлял самостоятельно, без вмешательства слушателей. Но для этого надо было оснастить приемник некоей системой **автоматической регулировки усиления (APY)**.

Теоретически это представлялось несложным, и вот почему: при работе любого детектора на его выходе помимо полезного модулирующего сигнала обязательно выделялся «побочный» продукт — постоянное напряжение, величина которого была прямо пропорциональна величине подводимого ВЧ сигнала, а полярность зависела исключительно от полярности подключения диода, что на сам процесс детектирования никак не влияло. Таким образом, постоянное напряжение на выходе детектора оказывалось именно тем сигналом, который был необходим для автоматического регулирования усиления. Но, увы, это было возможно только теоретически.



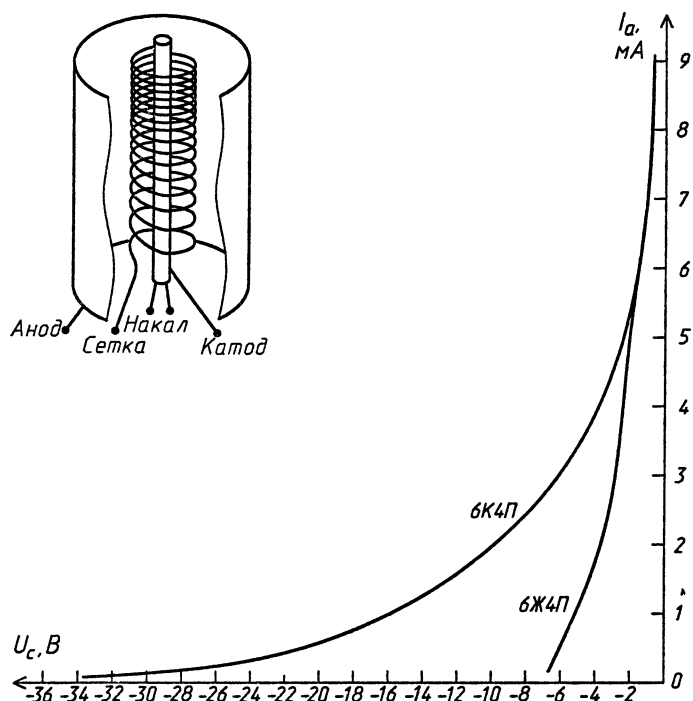


Рис. 11. Конструкция управляющей сетки с переменным шагом для пентодов «варимю» и сеточные характеристики пентодов 6Ж4П и 6К4П

Дело в том, что принимаемые сигналы различались по величине в тысячи раз, тогда как «раствор» сеточной характеристики лампы (т. е. рабочие напряжения на сетке) колебался в пределах  $\pm(1...2)$  В, а при больших отрицательных напряжениях ( $-4...-8$  В) лампа просто запиралась.

Реализовать теорию на практике было бы возможно, если бы сеточная характеристика лампы была не такой короткой, а более удлиненной, т. е. чтобы полное запираание лампы происходило не при  $-6...-8$  В, а при  $-20...-30$  В. В принципе создать такую лампу ничего не стоило: для этого управляющую сетку надо было сделать настолько редкой, что ее влияние на электронный поток было бы минимальным. Но от этого в десятки, если не в сотни раз упали бы крутизна характеристики и коэффициент усиления.

Выход был найден оригинальный: управляющую сетку сделали не густой и не редкой, а переменной густоты, как это показано на рис. 11. Из этого рисунка понятно, что при нулевом потенциале на сетке электроны одинаково свободно пролетают как через густую, так и через редкую ее части. При небольшом отрицательном напряжении электроны испытывают наибольшее торможение в области густых витков и по-прежнему свободно пролетают сквозь редкие витки.

По мере увеличения «минуса» на сетке густая ее часть все больше противодействует пролету электронов, уменьшая анодный ток, тогда как редкие витки не в состоянии существенно уменьшить число свободно пролетающих электронов.

При напряжении в  $-6...-8$  В густая часть сетки практически преграждает путь анодному току и лишь незначительная часть электронов продолжает просачиваться сквозь редкие витки. И только при напряжении  $-20...-30$  В отрицательный заряд сетки оказывается достаточным, чтобы прекратить анодный ток полностью и «запереть» лампу.

Лампы такого типа в отличие от обычных пентодов стали называть лампами с удлиненной сеточной характеристикой или иногда лампами типа «варимю», что в переводе означает лампы с переменным коэффициентом усиления. Этой группе пентодов в отличие от обычных ламп группы «Ж» была присвоена в наименовании буква «К». Сравнительные характеристики пентодов с короткой и удлиненной сеточными характеристиками приведены на том же рис. 11.

Используя особенности сеточных характеристик ламп типа «варимю», их стали широко применять в приемниках, оснащенных системой АРУ. И если один каскад, охваченный АРУ, обеспечивал глубину регулировки в 10 раз, то трехкаскадный усилитель давал глубину регулировки в  $10 \times 10 \times 10 = 1000$  раз или на 60 дБ, что позволяло принимать с относительно одинаковой громкостью как наиболее удаленные маломощные станции, так и мощные местные.

С самого начала серийного производства радиоламп одной из важнейших проблем конструкторов как самих ламп, так и ламповой аппаратуры была проблема экономичности. При этом на равных стоял вопрос как об экономии потребляемой лампами электроэнергии, так и о себестоимости аппаратуры в связи с количеством применяемых ламп.

Чтобы представить цену этой проблемы, достаточно сравнить потребление энергии близкими или даже одинаковыми по потребительским характеристикам радиоаппаратами на лампах и на транзисторах. Так, пятидиапазонный ламповый радиоприемник 1-го класса «Рига-10» потреблял от сети 85 Вт, а его транзисторный собрат с точно такими же параметрами — «Рига-101» — всего 35 Вт.

Среднее энергопотребление ламповых телевизоров колебалось вокруг цифры 200 Вт, тогда как сегодняшний суперсовременный цветной телевизор с 70-сантиметровым экраном и многочисленными техническими «накрутками» потребляет 60...80 Вт. Эта разница в 50 Вт для приемников и в 120...140 Вт для телевизоров, не давая никаких полезных результатов, в основном тратилась на принудительный нагрев воздуха в помещении.

В то же время до начала широкого использования транзисторов и полупроводниковых диодов существовал некий нижний предел, ниже которого уменьшать число ламп в приемнике или телевизоре было невозможно. Например, в самом простом супергетеродинном приемнике один баллон требовался для преобразователя частоты, как минимум один баллон для УПЧ, еще один — для детекторного диода и не менее двух баллонов для УЗЧ (предварительный каскад и мощный оконечный усилитель). Итого — пять баллонов, а при питании от сети переменного тока еще и шестой баллон для выпрямителя.

Один из первых и наиболее распространенных отечественных ламповых телевизоров — КВН-49, собранный по простейшей схеме прямого усиления 4-V-2, имел 17 (!) ламп, и их количество уже было невозможно уменьшить даже на единицу.

Поэтому поиск пути решения проблемы привел к логическому выводу: если нельзя уменьшить число *ламп* в приемниках и телевизорах, то вполне реально уменьшить число *баллонов*, объединив в одном баллоне две или даже большее число отдельных ламп.

Первым, наиболее простым шагом на этом пути оказалось создание двойного диода с общим катодом, для чего не пришлось ничего изобретать, а оказалось достаточным «распилить» анод обычного диода пополам и от каждой половинки сделать отдельный, самостоятельный вывод. Так появились на свет первые двуханодные кенотроны для схем двухполупериодных выпрямителей. Среди отечественных ламп это были четырехвольтовые прямонакальные кенотроны типов ВО-116, ВО-125, ВО-188, ВО-202, 4ВХ1.

Все дальнейшее было уже в прямом смысле «делом техники». Естественное, что и в области создания комбинированных ламп (а именно так стали называть электровакуумные приборы, содержащие в одном баллоне более одной «одиночной» лампы) прогресс определялся, с одной стороны, схемными потребностями, а с другой — технической доступностью такого объединения.

Вслед за двойными диодами-кенотронами появились двойные диоды-детекторы, использовавшиеся в схеме основного детектора и детектора схемы АРУ. В этом качестве повсеместно и довольно долго применялась лампа 8-штырьковой металлической октальной серии типа 6Х6 и ее стеклянный аналог 6Х6С.

Однако со временем возникла идея перенести оба диода в какую-нибудь другую «обязательную» лампу. Так появились двойной диод-триод типа 6Г7 и двойной диод-пентод типа 6Б8.

Следующими «двойниками» стали многочисленные двойные триоды, заключающиеся в одном баллоне два совершенно идентичных отдельных триода (6Н7, 6Н8С, 6Н9С), которые сменились уже многочисленным отрядом «пальчиковых» двойных триодов, в том числе с различными характеристиками внутри одного баллона.

И уже позже пришла пора создания комбинированных ламп не по принципу простого удвоения, а с учетом схемно-функциональной целесообразности. Так появились триод-пентоды, специально предназначенные для схем амплитудных селекторов телевизоров и для работы в качестве преобразователей в диапазоне УКВ, триод-пентоды (усилители мощности) для схем УЗЧ и вертикальной развертки в телевизорах, триод-гептоды для преобразования частоты в радиоприемниках и т. д.

Дальнейшее движение в области уплотнения баллонов неожиданно натолкнулось на новое препятствие — нехватку свободных «ножек» на цоколе. Действительно, даже простой двойной триод «съедал» 6 ножек на выводы самих электродов и 2 ножки на выводы подогревателя, т. е. 8 ножек из 9-ти максимально возможных, а экранная сетка триод-пентода занимала последнюю, девятую ножку, вынуждая антидинаatronную сетку соединяться с катодом внутри баллона.

Так что при размещении внутри одного баллона, скажем, двух пентодов пришлось идти на явно нежелательные жертвы: делать у обоих пентодов общую экранную сетку и соединять внутри баллона для вывода на один общий штырек сразу 4 электрода — два катода и две антидинаatronные сетки плюс статический экран между анодами пентодов (для предотвращения их взаимного влияния).

Самым простым и логичным оказалось увеличение числа ножек-выводов в одном баллоне. При этом получалось, что добавление даже одного лишнего штырька позволяло втиснуть в баллон дополнительную лампу (например, диод). Появилось даже выражение «ножкой больше — лампой меньше», подразумевавшее, что увеличение числа штырьков в новых комбинированных лампах на единицу позволяло применять в схеме один баллон вместо двух старых.

В нашей стране десятиштырьковые «пальчиковые» лампы не были освоены, тогда как за рубежом появилась целая серия таких ламп, названных по числу ножек серий «декаль» (в Европе она больше известна под именем «двухсотая» серия).

В качестве примера можно привести три наиболее типичные и распространенные немецкие лампы: триод-пентоды ECF-200(201) и PCF-200, пентод-оконечный пентод типа EFL-200 (PFL-200) и триод-гептод типа ECH-200 (PCH-200).

Одной из новейших разработок многштырьковых ламп (особенно за рубежом) стали так называемые компактроны — цельностеклянные лампы с 12-штырьковым цоколем. Они выпускаются двух диаметров — 30 и 40 мм и высотой от 38 до 95 мм и содержат 2–3 полностью независимые, разобщенные лампы, например два триода и выходной пентод, два ВЧ-пентода для УПЧ телевизоров, выходную лампу строчной развертки и демпферный диод и т. п.

Создание компактронов оказалось очень выгодно экономически. Стоимость одного компактрона была ниже суммарной стоимости заменяемых ламп и ламповых панелек. По некоторым данным, например, 7 компактронов и 1 полупроводниковый диод полностью заменяют в телевизоре 15 обычных ламп и 3 диода или 23 транзистора и 11 диодов, не считая «освобождающихся» при этом других схемных элементов — резисторов, конденсаторов, контурных катушек.

Например, компактрон американского производства типа 9BJ11, состоящий из двух ВЧ-пентодов улучшенной конструкции и с высокой крутизной характеристик обеспечивал в телевизоре усиление по ПЧ более чем в 30000 раз, заменяя три обычных пентода.

Использование новейших конструкционных материалов и современных высоких технологий позволили более чем вдвое повысить надежность компактронов, доведя их долговечность до 5 лет.

У нас в стране компактроны для широкого применения не выпускались.

Подводя итог теме электровакуумных приемно-усилительных ламп следует сказать, что сведения, которые мы изложили в этих трех занятиях, практически полностью исчерпывают тот минимум, который следует знать сегодняшнему юному радиолюбителю, поскольку 90% его будущей практической деятельности будут связаны не с радиолампами, а с полупроводниковыми активными элементами — транзисторами и микросхемами.

И тем не менее эти сведения вовсе не окажутся балластом: на примере радиоламп мы познакомились (и притом достаточно подробно) с **общим принципом** работы любых активных радиоэлементов, обеспечивающих **увеличение мощности** (или, как больше принято говорить, **усиление**) различных электрических сигналов.

И хотя физика работы самих полупроводниковых элементов существенно отличается от физики процессов, происходящих внутри радиолампы, **принцип усиления сигналов** и для транзисторов, и для микросхем ничем не отличается от принципа усиления сигналов радиолампой. Поэтому усвоить принцип работы транзисторного усилителя будет гораздо проще, зная принцип работы вакуумной радиолампы.

Однако прежде чем перейти к рассмотрению полупроводниковой элементной базы, мы на следующих занятиях очень кратко познакомимся с принципом работы другой группы электронных приборов — электронно-лучевыми трубками и газонаполненными лампами.

А теперь после небольшой «переменки» перейдем ко второму уроку сегодняшнего занятия.

## *Урок 2. ОБРАЗОВАНИЕ БИЕНИЙ ПРИ СЛОЖЕНИИ ДВУХ ЧАСТОТ*

На предыдущем занятии мы нашли наконец способ, позволяющий не только выудить из приемной антенны сигнал единственной нужной нам станции, но и надежно избавиться от мешающего действия двух соседних станций, ослабив их сигналы на 40 или даже 60 дБ с помощью полосовых фильтров или фильтров сосредоточенной селекции.

Многозвенные ФСС фактически решали задачу получения любой избирательности при очень хорошей величине **неравномерности АЧХ в пределах полосы**

**пропускания.** Однако при серийном производстве радиоаппаратуры возникали трудности с настройкой контуров таких ФСС, поскольку из-за неизбежного взаимного влияния одних контуров на другие при точной настройке очередного контура происходила незначительная расстройка предыдущего, только что настроенного контура, а его очередная подстройка в свою очередь вызывала расстройку следующего контура.

Это вызывало необходимость многократной подстройки всех контуров ФСС в процессе настройки приемника или телевизора, что резко снижало производительность труда и, главное, препятствовало **автоматизации** процесса производства.

Устранить этот недостаток удалось разработкой так называемых **твердотельных фильтров**. Не вдаваясь в анализ физики работы таких фильтров, укажем, что в основе их работы лежит **разное поведение пьезокерамики на разных частотах**. Это позволяет путем соответствующего подбора состава и конфигурации пьезокристаллов получить радиокомпонент, не содержащий индуктивностей, но обладающий определенной, наперед заданной АЧХ, которая остается неизменной и одинаковой во всех изделиях данного вида.

Промышленностью выпускаются целые серии самых разнообразных пьезофильтров для использования в том или ином виде радиоаппаратуры. Данные некоторых фильтров, выпускаемых отечественной промышленностью, приведены в табл. 3.

Таблица 3

ДАННЫЕ ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКИХ ФИЛЬТРОВ ОТЕЧЕСТВЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА

Тип фильтра	Средняя частота полосы пропускания, кГц	Полоса пропускания на уровне 6 дБ, кГц	Избирательность при расстройке на $\pm 9$ кГц, не менее, дБ
ФП1П-1м	465 $\pm$ 2	7...9,5	40
ФП1П-2	465 $\pm$ 2	8,5...12,5	40
ФП1П-022	465 $\pm$ 2	10,5...14,5	26
ФП1П-023	465 $\pm$ 2	8...11,5	40
ФП1П-024	465 $\pm$ 2	8...11,5	35
ФП1П-025	465 $\pm$ 2	8...11,5	30
ФП1П-026	465 $\pm$ 2	7...10,5	26
ФП1П-027	465 $\pm$ 2	8...11,5	35
ФП1П-041	465 $\pm$ 2	4,6...7	55
ФП1П-042	465 $\pm$ 2	4,6...7	50
ФП1П-043	465 $\pm$ 2	4,6...7	46
ФП1П-049-а	10700 $\pm$ 100	150...200	нет данных
ФП1П-049-б	10700 $\pm$ 100	200...280	нет данных

При использовании пьезофильтров в конкретном радиоаппарате для компенсации искажений, вносимых в сквозную АЧХ самой схемой, на входе и на выходе пьезофильтра обычно включают по одному одиночному резонансному контуру, настройкой которых удастся сформировать необходимую АЧХ данного функционального блока.

Все это очень хорошо, если бы все эти ФСС и пьезофильтры можно было использовать по своему прямому назначению (отстройки от соседних мешающих

станций) в приемниках прямого усиления при перестройке со станции на станцию или при переходе с одного диапазона на другой. Однако мы убедились, что это невозможно, поскольку ФСС на индуктивностях обеспечивает сформированную АЧХ только на одной оптимальной частоте, а твердотельные фильтры вообще нельзя перестроить на другие частоты.

Упомянули мы также и о том, что эту задачу оказалось возможным решить в приемниках с преобразованием частоты, так называемых **супергетеродинах**.

На этом уроке мы попытаемся выяснить, что же из себя представляет супергетеродинный способ радиоприема, но перед этим нам будет совершенно необходимо разобраться с одним физическим явлением, лежащим в основе основ супергетеродинного приема. И сейчас мы этим и займемся.

Внимательно рассмотрим рис. 12. На графиках *а* и *б* изображены два электрических сигнала одинаковой амплитуды с одинаковой начальной фазой, различающиеся **частотой**.

Очевидно, что частота сигнала *а* **выше** частоты сигнала *б*. Теперь возьмем простой карандаш, миллиметровую линейку и попробуем сложить эти два сигнала с учетом их величины и знака для каждой точки графика.

Если проделать эту работу тщательно и аккуратно, получится новый график — *в*, отображающий **алгебраическую сумму** этих двух сигналов. Подав этот сложный сигнал на одиночный резонансный **перестраиваемый** контур, мы можем без труда снова выделить **поочередно** каждый из двух сигналов по отдельности, настраивая резонансный контур на частоту этого сигнала.

И это все. Никаких других сигналов из этого суммарного сигнала мы выделить не сможем, поскольку **в чистом виде** их там просто нет. А теперь подадим этот суммарный сигнал на любой нелинейный элемент, например на самый обыкновенный детектор-выпрямитель, и внимательно рассмотрим график *г*.

Детектор, как и полагается, «отрежет» нам в зависимости от полярности включения либо нижнюю, либо верхнюю половину кривой. На графике *г* оказалась отрезанной нижняя (отрицательная) часть графика *в*, а оставшаяся положительная половинка представляет собой непрерывно изменяющееся по величине **постоянное напряжение положительной полярности**, или иначе — пульсирующее напряжение. А такое напряжение, как мы знаем, содержит две составляющие: чисто постоянное напряжение некоторой средней величины и переменную составляющую напряжения пульсации.

Однако в нашем случае сама постоянная составляющая не остается неизменной, а непрерывно изменяется вокруг некоторой средней величины, и эти изменения носят характер переменного синусоидального напряжения, которое на графике обозначено пунктиром. И если внимательно сравнить эту новую синусоиду с двумя исходными, то можно с удивлением обнаружить, что она не совпадает **по частоте** ни с одной из них.

Даже на глаз видно, что эта новая частота **ниже** частот обоих исходных сигналов. А если быть точным, эта частота равна **разности частот** исходных сигналов. И это правило сохраняется для любых двух частот. Запомним это: **ДЛЯ ЛЮБЫХ ДВУХ ЧАСТОТ**. Потому что именно этот факт и лежит в основе супергетеродинного приема.

И еще запомним, что выделить этот новый, разностный сигнал из смеси двух частот возможно **только на нелинейном элементе!**

А дальше уже значительно проще. Если смешивать между собой два сигнала самых разнообразных частот, отстоящих друг от друга на **одинаковый интервал**, то получающаяся во всех случаях при детектировании **разностная частота** будет одной и той же. Иными словами, смешивая между собой сигналы с частотами

200 и 660 кГц, или 1000 и 1460 кГц, или 1540 и 2000 кГц, мы во всех трех случаях будем получать одну и ту же **разностную частоту** (ее обычно называют **промежуточной**) в 460 кГц.

Теперь вернемся к хорошо изученному нами детекторному приемнику и вспомним, что при перестройке единственного входного контура с одной частоты на другую на детекторе выделяется постоянная составляющая и низкочастотная «огибающая» звукового сигнала. Это в том случае, если приходящий сигнал промодулирован.

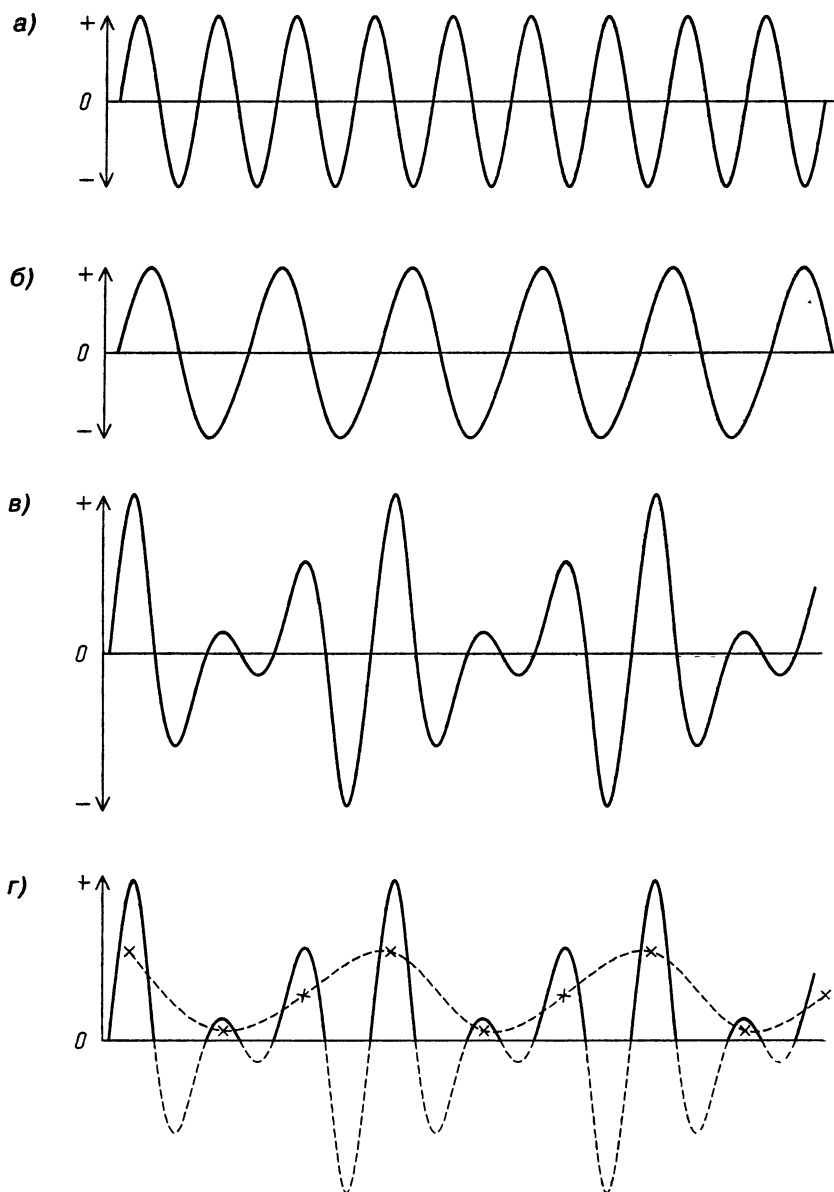


Рис. 12. График, иллюстрирующий возникновение разностной частоты при детектировании смеси двух разных частот

А если в этот момент в радиопередаче наступила пауза и никакого модулирующего сигнала нет? Тогда на детекторе выделится только чистая постоянная составляющая.

Договоримся считать, что пауза эта надолго затянулась, а наш приемник настроен точно на частоту в 1000 кГц. Теперь, ничего не меняя в настройке приемника, подведем к детектору от внешнего, постороннего генератора синусоидальный немодулированный сигнал с частотой, скажем, в 540 кГц. В строгом соответствии с вышерассмотренным процессом на детекторе окажутся явно выраженный сигнал смеси двух частот и неявный, «скрытый» сигнал новой, промежуточной частоты, равной  $1000 - 540 = 460$  кГц. Попробуем выделить этот сигнал, подключив к детектору новый резонансный контур, настроенный точно на промежуточную частоту в 460 кГц.

Совершенно очевидно, что исходные сигналы и их суммарный сигнал окажутся сильно ослабленными или даже практически полностью подавленными, поскольку они далеко отстоят от промежуточной частоты, на которую настроен новый контур, и на выходе нового контура останется лишь сигнал промежуточной частоты. Немодулированный, заметим, сигнал, поскольку оба исходных сигнала, подведенных к детектору, в данный момент (во время затянувшейся паузы) не модулированы. Но вот пауза закончилась, и один из сигналов (входной) оказался промодулирован. А что это означает? А это означает, что **среднее значение** постоянной составляющей на детекторе, которое и является новой промежуточной частотой, начнет изменяться в такт с модулирующим сигналом, т. е. высокочастотный сигнал промежуточной частоты окажется в точности промодулирован, как и принимаемый входной сигнал нашей радиостанции. Только теперь этот сигнал окажется перенесен с частоты 1000 кГц на частоту в 460 кГц.

Что мы от этого выиграли? Пока мы действительно ничего не выиграли, а скорее проиграли, усложнив приемник введением дополнительного контура.

Однако не будем спешить, а проведем наш эксперимент дальше. Перестроим наш приемник с принимаемой частоты на частоту, допустим, в 1350 кГц и одновременно изменим частоту вспомогательного генератора с 540 на 890 кГц. На выходе детектора мы получим промежуточную частоту, равную  $1350 - 890$  кГц, т. е. как и в первом случае — 460 кГц. И эта промежуточная частота будет промодулирована сигналом уже другой принимаемой станции.

А если мы настроим приемник на частоту в 1780 кГц, а дополнительный генератор — на частоту в 2240 кГц, что тогда? И тогда промежуточная частота окажется равной  $2240 - 1780 = 460$  кГц.

С помощью одного дополнительного генератора с перестраиваемой частотой мы добились того, что вместо постоянно изменяющихся по частоте сигналов принимаемых станций мы получили сигнал некоторой новой, промежуточной частоты, остающейся **неизменной** при настройке приемника на **любую станцию** в любом диапазоне, будь то ДВ, СВ или КВ. И этот новый сигнал всегда оказывается промодулирован низкочастотным сигналом очередной принимаемой станции.

То есть по существу мы свели прием множества станций в многодиапазонном приемнике к приему **одной станции на неизменной фиксированной (промежуточной) частоте**.

И теперь мы вправе делать с этой частотой все, что нам вздумается: усиливать ее многокаскадными ламповыми или транзисторными усилителями, формировать частотную характеристику с помощью полосовых фильтров, ФСС или пьезофильтров, нимало не заботясь о необходимости следить за поведением входного контура при переходе с приема одной частоты на другую или с одного диапазона на другой.



Больше того: теоретически можно вообще отказаться от входного контура и подавать на детектор сразу все сигналы, присутствующие в антенне. Все равно в этом случае контур ПЧ выделит сигнал только той станции, частота которой образует с частотой вспомогательного генератора разностный сигнал, равный по частоте той, на которую настроен контур ПЧ. А применив вместо этого контура ПЧ полосовой фильтр или ФСС, мы можем обеспечить почти идеальную избирательность по соседнему каналу, что было теоретически невозможно достигнуть в приемнике прямого усиления.

И что для этого оказалось нужным? Всего-то ничего: один дополнительный простейший генератор, который будет перестраиваться по частоте одновременно со входным контуром. А это для нас — раз плюнуть. Нужно конденсатор, образующий резонансный контур дополнительного генератора, вместо постоянного сделать переменным, и насадить ось этого переменного конденсатора на ось конденсатора настройки входного контура. Причем оба конденсатора сделать одинаковой емкости — и все дела! Крутишь одну общую ручку, а перестраиваются одновременно оба генератора. А разница частот остается неизменной.

Однако ничего хорошего из этой затеи у нас не получилось бы, и работать такой приемник не мог бы в принципе.

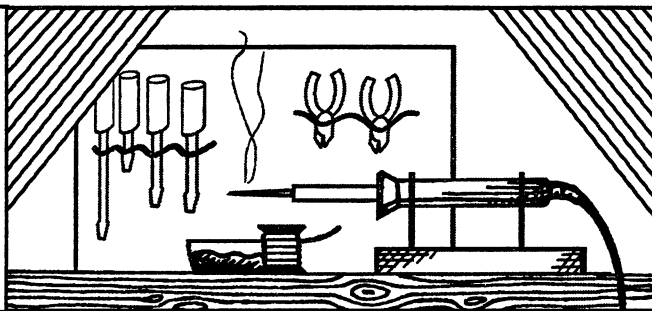
А вот почему, об этом мы поговорим на следующем занятии. Сегодня же продолжим знакомиться с очередными технологиями радиолюбительской деятельности, которые нам пригодятся как при оборудовании рабочего места, так и на очередных практических занятиях.



## Контрольные вопросы

1. Какие недостатки выявились в процессе эксплуатации первых ламповых триодов?
2. Как и в какой мере повлияло на три основных параметра радиолампы введение в ее конструкцию экранирующей сетки?
3. Почему при отсутствии входного сигнала на управляющей сетке анодная характеристика тетрода не имеет провала, а при большом входном сигнале такой провал возникает?
4. Зачем понадобилось вводить в тетрод третью дополнительную сетку и какую роль она выполняет?
5. Что из себя представляет пентод типа «варимю», какова его сеточная характеристика и с какой целью этот тип пентодов создавался?
6. Какая разница между многоэлектродными и комбинированными лампами?
7. Что из себя представляет компактрон?
8. Что из себя представляют твердотельные фильтры, для чего они предназначены и каковы их основные электрические характеристики?
9. Что происходит при алгебраическом сложении двух синусоидальных сигналов разной частоты и для чего возникает необходимость подавать получаемый в результате сложения новый сложный сигнал на нелинейный элемент — детектор?
10. Какие преимущества дает преобразование принимаемого сигнала в сигнал другой, промежуточной частоты?

# Рабочее место



Сегодняшнее занятие мы посвятим описанию наиболее употребительных в радиолюбительской практике конструкционных материалов и технологиям их обработки.

Конструкционными называют материалы, из которых изготавливают несущие шасси и рамы, корпуса и лицевые панели различных приборов и радиоаппаратуры, всевозможные монтажные элементы — планки, стойки, держатели радиодеталей, печатные платы, шкалы и подшкальники радиоприемников, декоративные обрамления и ручки управления и множество других **нестандартных** элементов радиолюбительских конструкций.

В самом начале нашей первой книги нам уже пришлось сталкиваться с некоторыми из конструкционных материалов, когда изготавливали подставку для паяльника или приступали к изготовлению первой в своей жизни печатной платы. Теперь же мы поговорим об этом поподробнее.

К конструкционным материалам принято относить практически все виды металлов и пластмасс в «листовом» виде: алюминий, железо, белую жель, медные листы и фольгу, большинство видов так называемых слоистых пластиков, оргстекло, а также большинство из перечисленных материалов в виде круглых прутков различного диаметра или с сечением в виде правильного шестигранника.

Каждый из этих материалов имеет свои особенные, иногда уникальные свойства, которые определяют наиболее типовой **круг их применения**. Это отнюдь не означает, что ту или иную деталь надо делать только из данного материала или что данный материал предназначен исключительно для изготовления именно этих деталей.

К примеру, шасси радиоприемника можно изготовить и из оцинкованного железа, и из твердого алюминия или дюраля, но совершенно нецелесообразно делать его из листовой красной меди или из фольгированного гетинакса. Точно так же футляр для стационарного магнитофона или приемника разумнее сделать из фанеры, а не из плексигласа, тогда как для футляра «карманного» приемника или плеера как раз лучше всего использовать именно плексиглас или листовой полистирол, а не фанеру.

Иначе говоря, для каждой конструкционной детали существуют свои типовые материалы и именно их и следует использовать. Но для этого надо быть знакомым с этими материалами, хорошо знать их свойства и физические характеристики и ясно представлять себе технологию их обработки.

Этой теме посвящено множество различных книг, брошюр, справочников, где все эти сведения приводятся с исчерпывающими подробностями. Поэтому мы не станем углубляться в эту тему, а ограничимся приведением сведений о самых ходовых конструкционных материалах и способах их обработки, почерпнутыми, кстати говоря, из этих же самых справочников.

Из основных конструкционных металлов в радиолюбительской практике на сегодня наиболее применимыми являются *листовое* или *фасонное* оцинкованное железо толщиной от 0,5 до 1,5 мм, листовой твердый алюминий и дюраль толщиной от 0,2 до 3–5 мм, а также луженая жечь, в качестве которой радиолюбители чаще всего используют консервные банки. Из железа и дюрала изготавливают несущие конструкции — шасси, рамы, лицевые панели различных приборов, а также цельнометаллические корпуса (кожухи) измерительных приборов. Из этих же металлов вырезают всевозможные нестандартные элементы механических креплений: уголки, распорки, укосины, ребра жесткости.

Белая (луженая) жечь, как правило, используется для изготовления всевозможных электростатических экранов для контурных катушек, переключателей рода работ, экранирования друг от друга излучающих участков схемы и участков, наиболее чувствительных к подобным излучениям.

Твердую листовую «гартованную» бронзу толщиной 0,3–0,8 мм используют для изготовления плоских «прижимных» пружин, а из пруткового алюминия или латуни диаметром 3–5 мм можно изготовить сердечники контурных катушек, если требуется **уменьшить** их первоначальную индуктивность. Из тонкой прутковой латуни или стали «серебрянки» диаметром 3–5 мм можно изготовить шпильки любых нестандартных размеров, нарезав на обоих концах отрезка прутка соответствующую резьбу.

Группу листовых пластмасс составляют **текстолит**, **стеклотекстолит**, **гетинакс**, **плексиглас**, **фторопласт**, а также целый ряд различных видов полистирола (термостойкий, ударопрочный и т. п.). Реже используется листовой хлорвинил, в основном в качестве изолирующих прокладок между деталями, не подвергающимися значительному нагреву.

Текстолит, стеклотекстолит и гетинакс могут быть как обычными, так и фольгированными, т. е. покрытыми тонкой медной фольгой либо с одной, либо с обеих сторон. Нефольгированные материалы толщиной листа от долей до нескольких миллиметров используются для изготовления каркасов катушек различных трансформаторов, монтажных планок, изолирующих шайб под корпуса электролитических конденсаторов, опорных точек для крепления крупногабаритных конденсаторов и резисторов, «гребенок» с монтажными лепестками для распайки выводов обмоток трансформаторов и т. п.

Фольгированные материалы применяются почти исключительно для изготовления печатных плат, хотя в ряде случаев возможно изготовление небольших коробочек с внутренним электростатическим заземляемым экраном для защиты от наводок различных коммутационных устройств. Для этого нарезанные прямоугольные «щечки» с фольгой, обращенной внутрь будущей коробочки, соединяют между собой путем пропайки всех швов.

Детали нужных размеров из цельного листа гетинакса, текстолита и стеклотекстолита вырезают с помощью линейного резака, который мы изготовили на одном из практических занятий в первой книге. При выполнении этой работы надо знать, что слоистые материалы весьма склонны к возникновению сколов и отслоений как раз с обратной (противоположной обрабатываемой) стороны, поэтому прорезав лист на глубину порядка 2/3 его толщины, надо перевернуть лист и окончательную прорезку осуществлять с обратной стороны. После этого очерченный участок легко отламывается от основного листа. По этой же причине (из-за появления сколов) даже очень тонкие листы гетинакса и текстолита не рекомендуется резать ножницами.

Что касается технологии изготовления печатных плат из фольгированных текстолита, гетинакса или стеклотекстолита, она была самым подробным образом изложена в первой книге. Если при дальнейшем изложении мы столкнемся с потребностью в особой обработке тех или иных конструкционных материалов, то эти проблемы решим по ходу дела. А пока на этом все.

# ЗАНЯТИЕ ЧЕТВЕРТОЕ

## Теория



## Урок 1. ГАЗОНАПОЛНЕННЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ

Мы уже говорили, что в общем многообразии электронных ламп особое место занимают газонаполненные лампы. Специфика их работы состоит в том, что происходящие внутри лампы процессы основаны не на поведении в электрическом поле в условиях глубокого вакуума свободных электронов, а на взаимодействии с этим полем помимо электронов еще и тяжелых ионов, как отрицательно, так и положительно заряженных и находящихся к тому же не в вакууме, а в среде сильно разреженного газа или паров металла.

Эти обстоятельства в корне меняют сущность физических процессов, происходящих в лампе, и, как следствие, характер поведения лампы в целом и ее отдельных электродов.

Для того, чтобы принцип работы газонаполненных ламп стал понятен, предварительно следует разобраться в процессах, происходящих в газовой среде вне связи с лампами.

Возьмем для начала некий замкнутый объем пространства, заполненный любым инертным газом (скажем, неоном или аргоном). Пусть это будет обыкновенная стеклянная пробирка, запаянная с двух сторон, в торцы которой впаяны два металлических электрода в виде дисков с выводами наружу.

При отсутствии внешней силы (электрического потенциала) внутри пробирки одновременно присутствуют нейтральные атомы и молекулы газа, некоторое количество «свободных» электронов, атомы, по тем или иным причинам потерявшие «свой» электрон из внешней оболочки и превратившиеся вследствие этого в положительный ион, и атомы, «прихватившие» на какое-то время лишний свободный электрон и превратившиеся в отрицательно заряженный ион.

Вся эта «смесь» хаотично движется внутри пробирки (броуновское движение) в разных направлениях, периодически сталкиваясь друг с другом и осуществляя «обмен» лишними и недостающими электронами.

Если бы на внутренний объем газа не осуществлялось никакого внешнего воздействия, процесса самопроизвольной ионизации молекул газа не происходило.

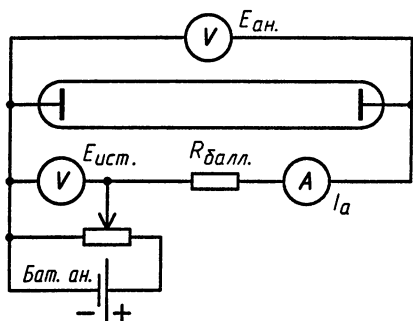


Рис. 13. Схема включения газоразрядной трубки для снятия характеристики зависимости тока через трубку от величины приложенного напряжения

среда в таком состоянии неэлектропроводна или, точнее, обладает очень большим электрическим сопротивлением.

Теперь подключим нашу «пробирку» к источнику постоянного тока через некоторое нагрузочное сопротивление  $R$  и посмотрим, что будет происходить в газовой среде по мере увеличения напряжения (рис. 13). Результаты происходящих изменений будем отражать на графике зависимости тока через пробирку от величины приложенного напряжения (рис. 14).

При начальном постепенном увеличении напряжения от нуля сразу же возникает два противоположно направленных движения частиц: свободные электроны и отрицательные ионы начинают движение в сторону положительного «анода», а положительные ионы — в сторону отрицательного «катода».

Масса ионов в тысячи раз больше массы свободных электронов, а скорость их движения во столько же раз меньше скорости движения электронов, поэтому на начальной стадии основным следует считать электронный поток в сторону анода. При очень малых величинах приложенного напряжения нарастание тока можно считать пропорциональным нарастанию напряжения, однако эта часть характеристики (участок 0—1 на графике) весьма незначительна, и вскоре прирост тока практически прекращается, несмотря на увеличение напряжения до некоторой точки 2 (участок 1—2).

Это явление весьма схоже с процессом, происходящим в обычном вакуумном диоде при достижении режима насыщения, и объясняется тем, что начиная с точки 1 практически все имеющиеся и вновь возникающие свободные электроны сразу же устремляются к аноду. Дополнительных же электронов в газовой среде не возникает, поскольку холодный катод их не эмитирует.

В действительности такие внешние причины, обуславливающие начальную ионизацию газа, всегда существуют: ими могут быть космические лучи, слабое радиоактивное излучение стенок пробирки или впаянных металлических электродов, радиоактивный фон окружающей среды и т. п.

Пока отсутствует внешнее электрическое поле, электрически одноименно заряженные и электрически нейтральные частицы в газовой среде (молекулы, атомы, электроны, ионы), сталкиваясь друг с другом, ведут себя как упругие шарики, не образуя однонаправленного движения в ту или иную сторону. Поэтому газовая

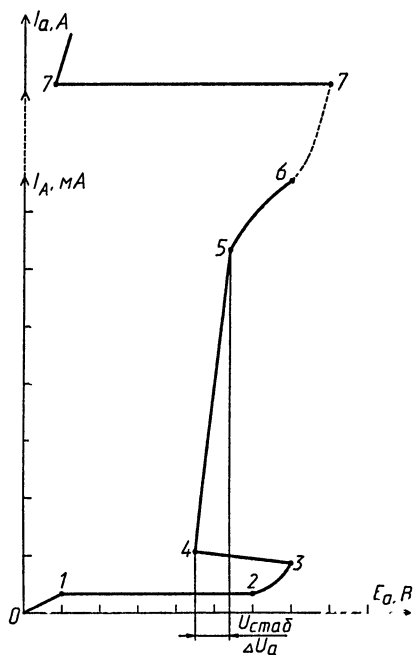


Рис. 14. График зависимости тока через газоразрядную трубку от величины приложенного напряжения

В то же время скорость и кинетическая энергия электронов на участке 1—2 по мере увеличения напряжения возрастают и к моменту достижения точки 2 этой энергии становится достаточно, чтобы при столкновении с нейтральными атомами «отколоть» от них наименее связанные с ядром наружные электроны.

Эти «отколовшиеся» вторичные электроны присоединяются к общему потоку, увеличивая анодный ток. Этому процессу соответствует на графике участок 2—3. Одновременно происходит и другой процесс. Атомы, лишившиеся при столкновении электрона, превращаются в положительно заряженные ионы и под действием отрицательного потенциала катода устремляются к нему. Обладая большой массой и возросшей кинетической энергией, они при ударе о поверхность катода выбивают из него дополнительные, вторичные свободные электроны, которые также включаются в общий электронный поток, еще более интенсифицируя процесс нарастания анодного тока.

Начиная с точки 3 даже малейшее увеличение напряжения приводит к лавинообразному нарастанию анодного тока и так называемому зажиганию газовой смеси. На самом деле никакого зажигания, а тем более горения инертного газа нет и быть не может, а дело обстоит следующим образом.

При соударениях свободных электронов высоких энергий с атомами не обязательно происходит отрыв новых электронов с его поверхности. Часто дело ограничивается тем, что сообщаемая атому дополнительная энергия «переводит» один из электронов атома с внутренней орбиты на более отдаленную. Однако через единицы или десятки наносекунд происходит возвращение этого электрона на прежнюю орбиту, что всегда сопровождается выделением избыточной энергии в виде фотона видимого свечения. Поэтому под «зажиганием» газа в лампе надо понимать появление его видимого свечения, которое вначале наблюдается лишь вблизи катода.

Если бы в цепи источника не было ограничительного резистора, то лавинообразное нарастание тока было бы мгновенным и привело к электрическому пробое и короткому замыканию пробирки. Но наличие резистора в корне меняет картину дальнейших событий. Дело в том, что при очень быстром, почти мгновенном нарастании анодного тока с такой же скоростью возрастает и падение напряжения на ограничительном резисторе, которое «вычитается» из общего напряжения анодного источника, поэтому напряжение между анодом и катодом также мгновенно уменьшается до некоторого значения, соответствующего на графике точке 4.

По принятой установившейся терминологии ток, наблюдающийся внутри лампы на участке 0—3 (до момента зажигания лампы), называется темновым током. Он весьма мал и измеряется единицами микроампер. Процесс, происходящий на этом участке, называют темновым разрядом. Темновой разряд используется на практике в газонаполненных фотоэлементах с внешним фотоэффектом.

В момент зажигания газ (если это неон) начинает светиться слабым красновато-оранжевым светом, напоминая тление зажженной папиросы, поэтому и процесс, происходящий в этот момент в лампе, назвали по аналогии тлеющим разрядом. Сам процесс появления свечения назвали моментом зажигания, а напряжение между электродами в этот момент — потенциалом зажигания.

Поскольку напряжение в точке 4 значительно ниже, чем в точке 3, процесс лавинообразного нарастания тока прекращается, а величина тока через лампу в этом состоянии может сохраняться стабильной сколь угодно долго. Обычно его величина составляет единицы—десятки миллиампер.

Если теперь пытаться увеличивать напряжение источника, ток будет стремиться возрастать очень значительно, но при этом одновременно будет увеличиваться и падение напряжения на резисторе, в результате чего напряжение на самой лампе (между анодом и катодом) будет оставаться практически неизменным, что хорошо

видно на графике (участок 4—5), где по горизонтальной оси отмечен отрезок  $\Delta U_a$ , соответствующий приращению напряжения на самой лампе.

Это состояние газа в лампе называют нормальным тлеющим разрядом, и оно широко используется на практике путем создания специальных газонаполненных ламп, называемых стабилитронами или стабилivolтами.

Сущность их действия состоит в том, что после момента зажигания напряжение между электродами лампы остается практически неизменным при изменении напряжения источника питания в значительных пределах. Такие стабилитроны в зависимости от конструкции, вида заполняющего газа и степени его разреженности выпускаются на определенные номинальные напряжения стабилизации (например, 75, 105, 150, 280 В).

Однако вернемся к нашей «пробирке» и будем повышать напряжение источника дальше. После точки 5 напряжение между анодом и катодом снова начнет возрастать, и когда оно достигнет точки 6, то станет равным напряжению, которое уже было в точке 3, при котором в лампе начинался лавинообразный процесс нарастания анодного тока.

Но к этому моменту ситуация в газовой среде стала совсем иной. Если в точке 4 (момент зажигания) свечение газа наблюдалось только в небольшой области возле катода, то к точке 5 этим свечением охвачено уже все пространство внутри лампы, что является свидетельством интенсивного процесса ионизации газа во всем его объеме.

При увеличении напряжения выше точки 5 растет и напряжение на лампе, что стимулирует увеличение не только анодного тока, но и ионного потока, направленного в сторону катода. И когда напряжение на лампе достигает точки 6, мощность бомбардировки катода ионным потоком приводит к разогреву катода до температуры, при которой начинается интенсивное излучение им вторичных свободных электронов, т. е. термоэлектронная эмиссия.

Принято говорить, что на участке характеристики 5—6 в лампе начинается (и происходит) аномальный тлеющий разряд. Именно это явление используется в работе обычных газосветных (неоновых, аргоновых, криптоновых и др.) трубок для изготовления светящихся реклам и вывесок.

И, наконец, при повышении напряжения источника выше точки 6 снова происходит резкое увеличение анодного тока, обусловленное появлением внутри лампы эмитированного разогретым катодом термоэлектронного потока. Значение тока скачкообразно возрастает до величины в несколько ампер, что сопровождается также резким падением напряжения на лампе до величины 15...17 В. Наступает так называемый дуговой разряд, характеризуемый малым падением напряжения на разрядном участке и очень высокой плотностью тока.

Следует заметить, что при отсутствии ограничительного резистора в цепи анода или при малой его величине возможен пробой и короткое замыкание лампы электрической дугой. Дуговой разряд используется в специальных лампах — газотронах, тиратронах, ртутных выпрямителях, игнитронах, о которых мы поговорим позже.

Группа газонаполненных ламп, внутренние процессы в которых точно соответствуют описанным выше, называются лампами с холодным катодом. В отличие от них существует другая группа, у которых помимо анода и «холодного» катода имеется еще и отдельная изолированная нить подогревателя, о роли и назначении которой мы также поговорим чуть позже.

Область применения газонаполненных ламп, пожалуй, не менее широка, чем у электровакуумных ламп, но она более специфична в силу характера происходящих внутри лампы процессов. Газонаполненные лампы практически непригодны для усиления электрических сигналов синусоидального переменного тока (а тем более

высокой частоты). Зато в отличие от приемно-усилительных вакуумных ламп они незаменимы в качестве вентилях в однофазных и многофазных выпрямителях переменного тока промышленной частоты при напряжениях в десятки и сотни киловольт при токах до нескольких тысяч ампер.

Другая характерная «профессия» газонаполненных ламп — стабилизация величины постоянного напряжения в устройствах электропитания. При этом стабилитроны тлеющего разряда в основном применяются для стабилизации напряжения на нагрузке, в качестве элементов связи и для повышения коэффициента усиления в усилителях постоянного тока, в релаксационных генераторах и генераторах «белого шума», в системах отсчета времени и т. п.

Стабилитроны коронного разряда чаще используются в устройствах стабилизации напряжения при малом потреблении тока, например для питания фотоумножителей, электронно-лучевых осциллографических трубок и т. д.

Газонаполненные лампы другого вида — с угольным или металлическим дисковым анодом, «холодным» металлическим дисковым катодом и дополнительным подогревным катодом (так называемые газотроны), стеклянная колба которых заполнена парами ртути, предназначены в основном для однофазного выпрямления переменного тока величиной до нескольких десятков ампер при напряжении до 10...15 кВ.

Мощные выпрямители без подогревного катода образуют большую группу ртутных ионных ламп, работающих в режиме дугового разряда в парах ртути. Такие лампы работают в основном в трехфазных выпрямителях промышленного назначения при особо больших мощностях потребления (несколько тысяч ампер при десятках киловольт).

Особую разновидность в этой группе составляют игнитроны — лампы, из которых полностью откачан воздух, а катодом является жидкая очищенная ртуть, налитая в специальное углубление колбы.

До сих пор мы говорили о двухэлектродных неуправляемых газонаполненных лампах. Однако существуют еще и управляемые лампы — это довольно большая группа тиратронов, в состав которых помимо катода и анода входит еще и третий, управляющий электрод, роль которого заметно отличается от роли управляющей сетки в вакуумных лампах с термоэлектронной эмиссией. Основная область применения тиратронов — устройства автоматики, телемеханики, счетно-решающая техника, измерительные системы и приборы и т. п.

Наконец, большую группу составляют так называемые знакообразующие газонаполненные лампы тлеющего разряда, электроды которых выполнены в форме цифр, букв и других символов, образующих при работе лампы светящееся изображение того или иного знака. Чаще всего баллоны этих ламп наполнены неоном или аргоном и создают красно-оранжевое или розоватое свечение.

Наиболее простая конструкция у газонаполненных стабилитронов (стабиловольтов). Стабилитрон представляет собой стеклянную колбу, наполненную разреженным инертным газом (аргоном или неоном). В отличие от приемно-усилительных ламп в стабилитронах анод и катод как бы поменялись местами.

Катод стабилитрона обычно выполнен в виде цилиндра из никеля или никелевого сплава и представляет собой внешний электрод. Внутри этого цилиндра точно по его оси укреплен никелевый провод или тонкая трубочка, являющаяся анодом. Других электродов или элементов конструкции внутри стабилитрона нет.

Если вернуться к рис. 14, легко увидеть, что в области нормального тлеющего разряда, являющейся рабочей областью любого стабилитрона, при довольно значительном изменении тока через стабилитрон (от точки 4 до точки 5) напряжение на нем меняется крайне незначительно — на величину  $\Delta U_a$ .



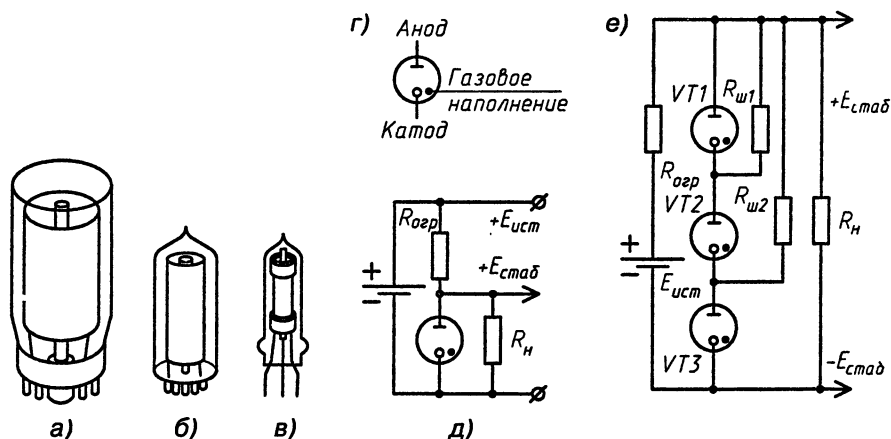


Рис. 15. Внешний вид (а, б, в), условное графическое обозначение (г) и схемы включения стабилитрона (д, е)

Как и у любой другой лампы, у стабилитрона существует оптимальный «режим покоя», т. е. его режим в некоем стабильном состоянии схемы. Поскольку изначально предполагается, что стабилитрон должен поддерживать неизменное напряжение на выходе выпрямителя при изменениях напряжения источника на плюс-минус некоторую величину, то очевидно, что в исходном состоянии рабочей точкой стабилитрона должна быть середина его рабочей части характеристики, т. е. отрезка 4—5.

В справочниках для любого стабилитрона обязательно указываются оба эти параметра: диапазон рабочих токов через лампу и номинальное напряжение стабилизации. В старой системе маркировки стабилитронов эти параметры прямо отражались в обозначении лампы. К примеру, стабилитроны типов 75C5-30, 105C5-30 и 150C5-30 были рассчитаны на номинальное напряжение стабилизации в 75, 105 и 150 В соответственно при изменениях тока через лампу от 5 до 30 мА.

В новой, ныне действующей системе маркировки, этот принцип утрачен и все стабилитроны обозначаются буквами СГ (стабилитрон газовый), порядковым номером разработки (одно-, двух- или трехзначное число) и дополнительной буквой, отражающей конструктивное исполнение лампы: С — обычное стеклянное оформление, П — девятиштырьковое «пальчиковое» и т. п. Например, СГ5-Б, СГ16-П, СГ203-К, СГ312-А.

В работе газовых стабилитронов имеется определенная специфика, которую обязательно следует учитывать. Прежде всего для устойчивого зажигания стабилитрона и установления нормального тлеющего или коронного разряда (в зависимости от типа лампы) необходимо, чтобы напряжение источника в 1,2–1,3 раза превышало номинальное напряжение стабилизации.

Совершенно недопустимо подавать на стабилитрон даже кратковременно напряжение обратной полярности: минус на анод и плюс на катод. Нельзя включать несколько стабилитронов параллельно, поскольку из-за незначительного разброса параметров какой-то один из них «зажжется» чуть раньше, и ток через него может превысить допустимый.

В то же время последовательное соединение нескольких стабилитронов не только допустимо, но и часто встречается на практике (рис. 15), только при этом параллельно каждому стабилитрону необходимо подключить одинаковые по величине «выравнивающие» резисторы, в 10–20 раз большие по величине, чем резисторы нагрузки. Общее напряжение стабилизации в этом случае будет равно

сумме номинальных напряжений отдельных стабилитронов, а суммарный ток стабилизации не изменится и останется равным току через один стабилитрон.

Расчет параметров «балластного» (нагрузочного) резистора в цепи стабилитрона производится по закону Ома. Падение напряжения на этом резисторе ( $U_{PE3}$ ) равно разности напряжения источника и номинального напряжения стабилитрона:

$$U_{PE3} = U_{ИСТ} - U_{СТАБ}.$$

За величину номинального тока ( $I_{НОМ}$ ) принимают среднеарифметическое двух крайних значений тока стабилитрона. Величина балластного резистора в этом случае определяется по формуле:

$$R_{БАЛЛ} = \frac{U_{PE3}}{I_{PE3}} = \frac{E_{ИСТ} - U_{СТАБ}}{(I_{МАКС} - I_{МИН})_{СТАБ}}.$$

Мощность резистора выбирают с полуторным-двойным запасом по отношению к номинальной:

$$P_{PE3} = (1,5...2,0) U_{PE3} I_{PE3}.$$

Например, для стабилитрона типа СГ15П напряжение зажигания составляет 150 В, пределы стабилизации — от 104 до 112 В, минимальный ток стабилизации — 5 мА, максимальный — 30 мА. Исходя из этих данных, определяем, что напряжение источника должно быть в 1,2–1,5 раза выше напряжения зажигания и лежать в пределах 180...195 В (в среднем 188 В). Напряжение стабилизации составляет 112...104 В (среднее около 108 В). Ток через стабилитрон составляет 5...30 мА (средний приблизительно 17 мА). Отсюда

$$U_{PE3} = E_{ИСТ} - U_{СТАБ} = 188 - 108 = 100 \text{ В};$$

$$R_{PE3} = \frac{U_{PE3}}{I_{PE3}} = \frac{100}{17} = 5,9 \text{ кОм}.$$

Выбираем ближайшее по ГОСТ значение  $R_{PE3} = 5,6 \text{ кОм}$  и определяем его мощность:

$$P_{PE3} = (1,5...2,0) U_{PE3} I_{PE3} = (1,5...2,0) \cdot 100 \cdot 0,017 = 2,5...3,0 \text{ Вт}.$$

Особую группу газонаполненных приборов составляют тиратроны. Они относятся к подгруппе управляемых газоразрядных приборов, в которых помимо анода и катода имеется один или два вспомогательных управляющих электрода, с помощью которых осуществляется управление анодным током.

Существуют две разновидности тиратронов, отличающиеся составом газовой среды, — ртутные и наполненные инертным газом (неоном или аргоном).

Область применения ртутных газотронов в основном ограничивается схемами релейного усиления тока (при питании от источника постоянного тока), где они обеспечивают коэффициент усиления по току свыше миллиона, и в качестве выпрямителей, в которых среднюю величину выпрямленного тока можно регулировать изменением фазы напряжения на управляющем электроде.

Другую подгруппу составляют тиратроны тлеющего разряда с наполнением инертными газами, называемые иначе тиратронами с холодным катодом. Они по ныне действующей классификации обозначаются буквами ТХ (тиратрон с холодным катодом), числом, определяющим порядковый номер разработки, и буквой, характеризующей конструктивное выполнение баллона.

Тиратроны тлеющего разряда имеют помимо анода и катода один или два управляющих электрода — в зависимости от способа управления — электростатического или токового. Они могут находиться в двух устойчивых состояниях — непроводящем и проводящем и в двух переходных.

В проводящем состоянии через тиратрон протекает анодный ток. В непроводящем состоянии анодный ток отсутствует, но существует тлеющий разряд между катодом и так называемой сеткой подготовительного разряда. Такой сетки нет только в выпрямительных и электрометрических тиратронах.

Работа тиратронов тлеющего разряда характеризуется некоторыми специфическими параметрами, отличными от параметров, с которыми мы познакомились в разделе «электровакуумные приборы». Поэтому здесь целесообразно перечислить и расшифровать некоторые из этих новых терминов.

**Напряжение возникновения подготовительного разряда** — положительное напряжение на первой сетке относительно катода, необходимое для возникновения в этом промежутке тлеющего разряда.

**Напряжение возникновения основного разряда** — положительное напряжение на аноде относительно катода, необходимое для возникновения на этом промежутке тлеющего разряда.

**Время запаздывания подготовительного «зажигания»** — время между моментом подачи напряжения на первую сетку и возникновением тлеющего разряда между сеткой и катодом.

**Напряжение (импульс) входного сигнала** — минимальная амплитуда импульса на управляющей сетке, приводящая к возникновению самостоятельного тлеющего разряда между анодом и катодом.

**Длительность входного импульса** — минимальное время с момента подачи управляющего импульса, необходимое для возникновения самостоятельного тлеющего разряда между анодом и катодом.

**Время восстановления исходного состояния** — минимальное время после прекращения анодного тока, по истечении которого вновь приложенное анодное напряжение (при отсутствии запускающего импульса) не вызывает возникновения тлеющего разряда между анодом и катодом.

Из приведенных параметров видно, что в отличие от вакуумных ламп тиратронам присуща определенная инерционность, препятствующая их использованию на сверхзвуковых частотах и тем существенно ограничивающая сферу их применения.

По способу управления переходом от непроводящего состояния к проводящему различают тиратроны с электростатическим и токовым управлением. У тиратронов первой группы обязательно наличие двух сеток. Из современных отечественных тиратронов к ним относятся ТХЗБ, ТХ6Г, ТХ8Г, ТХ12Г. В цепи первой, ближайшей к катоду сетки, протекает ток, величина которого определяется величиной последовательно включенного резистора.

Между этой сеткой и катодом возникает так называемый подготовительный тлеющий разряд, облегчающий возникновение основного разряда между анодом и катодом. На вторую сетку подается некоторое положительное напряжение, на 10–15% меньше необходимого для инициирования разряда между анодом и катодом. На эту же сетку в нужный момент подается положительный запускающий импульс, который, складываясь с постоянным напряжением, вызывает возникновение основного тлеющего разряда.

При токовом управлении используют односеточные тиратроны или тиратроны с двумя соединенными вместе сетками (триодное включение) — ТХ4Б, ТХ5Б, ТХ11Г, МТХ-90. В этом случае запускающий импульс подается на ту же сетку, которая создает подготовительный разряд. Импульс приводит к изменению величины сеточного тока и тем самым «открывает» тиратрон.

Эксплуатация тиратронов в любых схемах должна учитывать некоторые специфические особенности их поведения. Так, рекомендуется при включении сначала подать напряжение на управляющую сетку (или сетки), затем на сетку предварительного разряда и только потом на анод. Гашение разряда в тиратроне возможно только путем полного снятия анодного напряжения или уменьшения его ниже порога зажигания.

Во избежание самопроизвольного зажигания нельзя даже кратковременно отключать источник напряжения смещения от управляющей сетки или уменьшать это напряжение ниже оговоренного паспортного значения.

При подаче управляющего импульса через *RC*-цепочку величина емкости должна лежать в определенных пределах. С одной стороны, она должна быть такой большой, чтобы амплитуда и длительность импульса на сетке обеспечили надежное возникновение разряда в тиратроне. С другой стороны, емкость должна быть достаточно малой, чтобы к моменту окончания действия импульса постоянное напряжение на сетке восстановилось до уровня, близкого к напряжению начального смещения.

Поскольку тиратронные схемы обладают высокой чувствительностью к запуску любыми посторонними импульсами, монтаж тиратронов следует вести особо тщательно, ограждая их от возможного воздействия различных наводок и паразитных связей, уменьшать до предела емкость и индуктивность монтажа, а схемные элементы, особенно разделительный конденсатор в цепи управляющей сетки и резистор в цепи сетки подготовительного разряда следует припаивать непосредственно к выводам ламповой панели.

## Урок 2. ПРОБЛЕМА СОПРЯЖЕНИЯ ВХОДНОГО И ГЕТЕРОДИННОГО КОНТУРОВ

На предыдущем занятии мы вроде бы так удачно решили проблему «одноручечной» настройки супергетеродина, как вдруг выяснилось, что при очевидной простоте конструкции и использовании двухсекционного блока переменных конденсаторов с одинаковыми конденсаторами схема работать не будет. Почему не будет?

Начнем с того, что вспомним: для того, чтобы величина промежуточной частоты оставалась неизменной при настройке приемника на любую частоту, *разность* частот настройки входного контура и контура вспомогательного генератора (его принято называть гетеродином) должна оставаться неизменной при перестройке с любой частоты на любую другую.

С этим все ясно, пошли дальше. Изменение частоты входного контура и контура гетеродина возможно двумя способами: изменением емкости конденсатора при неизменной индуктивности катушки либо наоборот. Конструктивно гораздо проще изменять в широких пределах емкость конденсатора, чем изменять индуктивность катушек в таких же пределах, поэтому мы остановились на использовании сдвоенного блока переменных конденсаторов с одинаковым характером изменения емкости от угла поворота ротора. И пусть емкость в крайних положениях ротора составляет 10 и 500 пФ.

Если бы при этом индуктивности обеих катушек были одинаковыми, то и частоты контуров совпадали при любом положении ротора. Однако нам надо, чтобы частоты обоих контуров как раз не были одинаковыми, а отличались друг от друга на величину промежуточной частоты.

С этим тоже нет проблем. Допустим, речь идет о длинноволновом диапазоне с крайними значениями частот в 140 и 420 кГц, а промежуточную частоту мы выбрали равной 460 кГц. Установим ротор переменных конденсаторов в положение максимальной емкости (500 пФ) и подберем для входного контура такую индуктивность, при которой его резонансная частота составит 140 кГц. Дело это пустяковое и никаких проблем не составит.

Чтобы в этом положении ротора промежуточная частота оказалась равной 460 кГц, надо, чтобы частота гетеродина составила

$$140 + 460 = 600 \text{ кГц.}$$

Пожалуйста, 600 так 600. Уменьшаем индуктивность катушки гетеродина до соответствующей величины — и дело в шляпе! Сигнал на входе — 140 кГц, сигнал промежуточной частоты — 460 кГц. И кто сказал, что такой приемник работать не будет? Еще как работает!

Но подождем радоваться. Посмотрим, что у нас получится, если мы захотим принять сигнал с частотой 420 кГц. Повернем ротор переменных конденсаторов в другое крайнее положение с емкостью 10 пФ.

Поскольку индуктивности обеих катушек у нас остались неизменными, а емкости изменились на одинаковую величину и в одинаковое число раз, то и частоты обоих контуров изменятся (увеличатся) в одинаковое число раз. В нашем случае у входного контура — в 3 раза (от 140 до 420 кГц) и у гетеродинного также в 3 раза — от 600 до 1800 кГц. И если на низкочастотном краю диапазона промежуточная (разностная) частота составила

$$600 - 140 = 460 \text{ кГц,}$$

то на высокочастотном краю она оказалась равной

$$1800 - 600 = 1200 \text{ кГц!}$$

Как же так получилось? А иначе и не могло получиться. Если индуктивности катушек в пределах одного диапазона остаются неизменными, хотя и разными, а емкости контуров изменяются в одинаковое число раз, то в такое же число раз изменяются и частоты обоих контуров. А нам надо, чтобы при этом неизменной оставалась разность частот этих контуров.

Иными словами, в «нижнем» конце ДВ диапазона частота гетеродина должна быть равна  $140 + 460 = 600$  кГц, а в верхнем —  $420 + 460 = 880$  кГц, а вовсе не 1800 кГц, т. е. при перестройке ротора из одного крайнего положения частота входного контура должна измениться в 3 раза, а частота гетеродина — во сколько раз? Это легко посчитать:  $880 : 600 = 1,46$ , т. е.  $\approx 1,5$  раза.

Но это невозможно практически! Ведь в нашем сдвоенном конденсаторе обе секции имеют совершенно одинаковые емкости! Значит, надо секцию гетеродина сделать с меньшим перекрытием?

Если бы это и удалось сделать, то и в этом случае мы оказались бы далеки от решения задачи создания многодиапазонного приемника. Почему? Да потому, что на других диапазонах — СВ, КВ или УКВ перекрытие гетеродинной секции переменного конденсатора будет каждый раз другим. Например, на средневолновом диапазоне частота входного контура изменяется от 520 до 1600 кГц, т. е. почти в те же самые 3 раза, а частота гетеродина — от  $520 + 460 = 980$  до  $1600 + 460 = 2060$  кГц, или в 2,1 раза, а на коротковолновом диапазоне частота входного контура меняется в 3,2, а частота гетеродина — в 3,1 раза.

Так что же, для каждого диапазона нужно иметь разные секции гетеродинного конденсатора?

Решение задачи оказалось достаточно простым. Чтобы понять его и оценить красоту и изящество самого решения, сначала вспомним, что происходит, если мы

включим два конденсатора  $C_1$  и  $C_2$  последовательно. Это мы знаем из занятий в первой книге. В этом случае общая емкость цепочки уменьшится и станет меньше емкости наименьшего из двух конденсаторов. А если более точно, то

$$C_{\text{общ}} = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}.$$

Перед нами стоит задача уменьшить перекрытие по емкости у гетеродинной секции переменного конденсатора, причем для каждого диапазона в определенное, разное число раз. Значит, на каждом диапазоне нужно последовательно с гетеродинной секцией конденсатора включить свою дополнительную емкость, чтобы уменьшить максимальную емкость секции до необходимой величины. Вот и вся проблема.

Именно так и поступают в любом реальном супергетеродинном приемнике. Эту дополнительную емкость называют сопрягающей, или на радиолюбительском языке — педдинговой. Для длинноволнового диапазона эта емкость лежит в пределах 150...200 пФ, для средневолнового — 400...500, для коротковолнового — порядка 4000...5000 пФ. Для коммутации этого дополнительного конденсатора обычно используют отдельную секцию переключателя диапазонов либо включают сопрягающий конденсатор последовательно не с секцией переменного конденсатора, а последовательно с катушкой контура, что практически почти равнозначно.

Справедливости ради надо сказать, что такой способ обеспечивает идеальное сопряжение входного и гетеродинного контуров только в двух или трех точках каждого диапазона. И только в этих точках разность частот в точности соответствует значению промежуточной частоты. При любых других положениях ротора переменного конденсатора промежуточная частота оказывается или чуть-чуть выше, или чуть-чуть ниже номинального значения, однако это расхождение весьма незначительно и всегда намного меньше полосы пропускания тракта УПЧ, что не приводит к существенным искажениям при приеме любых станций на всем диапазоне.

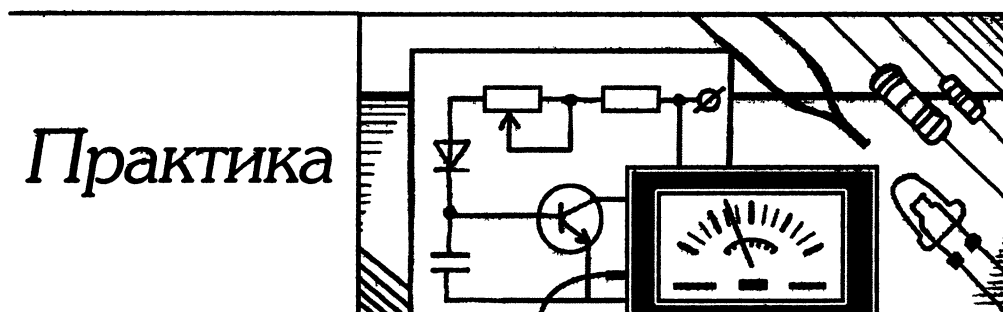
Вот теперь мы познакомились с принципом супергетеродинного радиоприема, поняли и усвоили, как происходит преобразование принимаемой частоты в промежуточную и какими схемными решениями это достигается. На следующем занятии мы попробуем самостоятельно составить принципиальную схему простого супергетеродинного приемника, а на сегодня закончим наше занятие традиционными контрольными вопросами.



## Контрольные вопросы

1. Какой фактор в корне отличает физические процессы, происходящие в газонаполненных приборах, от процессов, происходящих внутри вакуумных радиоламп?
2. Какие газы или пары чаще других применяют в газонаполненных лампах?
3. Чем объясняются скачкообразные изменения формы в некоторых точках вольт-амперных характеристик (ВАХ) газонаполненных приборах и что это за точки?
4. Почему ни один газоразрядный прибор нельзя подключать к источнику питания без ограничительного (балластного) резистора? Какова физика этого ограничения.

5. Перечислите разные процессы, сменяющие друг друга в газовой среде по мере увеличения напряжения источника питания, и покажите на вольт-амперной характеристике (рис. 14) участки, соответствующие этим процессам.
6. Какой из участков ВАХ (рис. 14) является рабочим для стабилитронов и почему?
7. Что из себя представляют тиратроны с холодным катодом? Какова область их применения?
8. В каком режиме работают ртутные ионные лампы и какова область их применения?
9. Почему при одновременной перестройке частот входного контура и контура гетеродина сдвоенным переменным конденсатором с идентичными секциями промежуточная частота не остается постоянной, а меняется в широких пределах?
10. С какой целью в схему гетеродина вводится сопрягающий (педдинговый) конденсатор, и каким образом эта цель достигается?
11. Всегда ли и в какой степени введение педдингового конденсатора обеспечивает постоянство и неизменность значения промежуточной частоты при перестройке приемника по всему диапазону?



Сегодня мы продолжим знакомство с основными «радиолюбительскими» технологиями, среди которых важнейшее место занимает пайка. Дело в том, что уже в самое ближайшее время, как только мы познакомимся с работой полупроводниковых приборов — транзисторов и микросхем, нам предстоит продолжить модернизацию нашего простейшего детекторного приемника, постепенно усложняя его схему введением новых каскадов усиления высокой и низкой частоты, а затем перейдем к созданию супергетеродина.

При этом нам предстоит постоянно пользоваться пайкой самых различных схемных элементов, в первую очередь — транзисторов и микросхем. Между тем пайка этих элементов имеет свою специфику, незнание и несоблюдение которой может необратимо вывести из строя сами эти элементы. Так что грамотная пайка — это не примитивная операция, а целая наука и даже в некоторой степени искусство, поэтому азы этой науки мы сегодня и попытаемся одолеть.

В основе любой пайки лежит процесс одновременного механического и электрического соединения двух или нескольких разобщенных металлических поверхностей самой различной конфигурации в единое целое.

Соединяться между собой могут плоские поверхности, тонкие и толстые (одножильные и многожильные) проводники, выводы радиоэлементов, металлические элементы конструкции самых различных форм и размеров. Соединяться могут как однородные, так и разнородные металлы. И во всех этих случаях применяется своя особая технология пайки и используются разные припои, флюсы, а также разные температурные и временные режимы пайки.

С чего же лучше начать? На наш взгляд, правильнее начать с некоторых общих правил, обязательных для всех случаев пайки. Первое и главное правило состоит в том, что качество любой пайки на 90% зависит от качества предварительной подготовки соединяемых деталей.

Обязательными элементами такой предварительной подготовки являются тщательная механическая зачистка, обезжиривание и залуживание.

Механическая зачистка производится соответствующим инструментом или материалом (обычный нож, напильник, надфиль, шабер либо наждачная бумага определенной зернистости) и преследует цель удаления ржавчины, окисных пленок, лакокрасочных покрытий, препятствующих образованию паяного соединения. После механической зачистки в обязательном порядке производится обезжиривание обеих соединяемых поверхностей, поскольку наличие жировой пленки препятствует контакту флюса с поверхностью металла и качественному залуживанию.

Залуживанием называется процесс предварительного покрытия припоем каждой из подлежащих соединению деталей.

В предыдущей, первой книге мы уже частично затрагивали эту тему (на третьем занятии). Но тогда мы в основном говорили о паяльнике — его выборе, предварительной подготовке и обработке, а также о различных видах припоев и флюсов, используемых в процессе пайки.

Продолжим эту тему, рассматривая вполне конкретные случаи пайки разных деталей из разных металлов. И начнем с операции залуживания, поскольку она имеет свои специфические особенности.

Все металлы можно условно разделить на три группы, по-разному поддающиеся залуживанию. *Первую* составляют медь и ее сплавы, а также серебро, золото, кадмий. Металлы той группы (или детали с покрытием из этих металлов) легко поддаются залуживанию обычными оловянно-свинцовыми припоями с бескислотными флюсами.

*Вторую группу* составляют черные металлы (железо, сталь), залуживание которых сопряжено с трудностями и, как правило, осуществляется с использованием кислотных флюсов (чаще всего так называемой травленной соляной кислоты — хлористого цинка).

И, наконец, к *третьей группе* относятся алюминий и все виды его сплавов (включая дюраль), залуживание которых возможно только несколькими специальными способами, о которых мы сегодня будем говорить особо.

Залуживание любых металлов «медной» группы осуществляется стандартными оловянно-свинцовыми припоями (ПОС) и бескислотными флюсами, подробный перечень которых приводился в первой книге (занятие третье). Эти же данные всегда можно найти в многочисленных изданиях типа «Полезные советы» или соответствующих справочниках.

Сложнее обстоит дело с залуживанием железных и стальных деталей. И здесь возможны два пути. Первый путь — это использование в качестве флюса так называемой паяльной кислоты, образующейся при травлении кусочков (гранул) чистого цинка соляной кислотой. После полного растворения цинка и отстоя кислоты жидкость осторожно сливают в стеклянный пузырек с плотно притертой пробкой. Все работы по получению паяльной кислоты необходимо проводить с особой осторож-



ностью, имея под рукой готовый содовый раствор на случай попадания капель кислоты на кожу рук.

На зачищенный и обезжиренный участок металла наносят стеклянной палочкой или с помощью «глазной» пипетки несколько капель кислоты, кладут сверху кусочек припоя и хорошо прогревают место пайки до полного растечения припоя. Не отрывая паяльника от расплавленной капли, энергичными движениями жала паяльника растирают каплю по всей площади будущего места пайки.

После полного остывания с залуженного места полностью удаляют ватным тампоном остатки кислоты, промывают залуженный участок содовым раствором, затем чистой водой и окончательно повторно обезжиривают ацетоном. Подготовленная таким образом поверхность в дальнейшем легко паяется, как и металлы медной группы. Вместо паяльной кислоты можно с успехом использовать смесь из равных по весу количеств хлористого аммония и глицерина.

Второй — бескислотный способ заключается в использовании вместо флюса небольшого отрезка обычной хлорвиниловой трубки. Он пригоден для залуживания не только железа, но и стали, в том числе и нержавеющей. Место предстоящей пайки тщательно, до блеска, зачищают и обезжиривают ацетоном или чистым бензином, насухо протирают, кладут на него кусочек хлорвинила, на него — каплю или кусочек припоя и очень горячим паяльником растирают место пайки вместе с расплавленными припоем и хлорвинилом до получения равномерного слоя залуды.

При этом способе особенно важно, чтобы залуживаемый участок металла был хорошо прогрет, поэтому мощность паяльника должна быть не менее 90...100 Вт.

Наибольшие трудности представляет пайка алюминия и его сплавов. Между тем такая потребность в радиолюбительской практике возникает довольно часто, когда приходится припаивать заземляющие провода или специальные «лепестки» к алюминиевым экранам контурных катушек или алюминиевому шасси.

Наиболее широко применяются два принципиально разных способа: непосредственная пайка с использованием специальных припоев и флюсов и предварительное омеднение алюминия электрохимическим путем.

При непосредственной пайке следует применять припои с содержанием не менее 50% олова (ПОС-50, ПОС-61, ПОС-90) либо специальные припои П200 и П250. При лужении припоями марки ПОС в качестве флюса используют чистое минеральное масло, щелочное масло для чистки оружия либо так называемое швейное масло. На место, подлежащее залуживанию, наносят слой масла и под слоем масла зачищают поверхность алюминия острым лезвием ножа или шабером, не допуская контакта зачищенного места с воздухом. После тщательной зачистки, гарантирующей полное удаление окисной пленки с поверхности алюминия, осуществляют залуживание припоем с помощью хорошо нагретого паяльника.

При пайке припоями П200 и П250 используют специальный флюс, представляющий собой смесь йодида лития и олеиновой кислоты. Для разового использования рекомендуется на 2–3 г йодида лития 20 г (20 мл) олеиновой кислоты. Смесь помещают в пробирку и подогревают, опустив пробирку в горячую воду и постоянно помешивая (взбалтывая) до полного растворения соли.

Жало паяльника перед пайкой должно быть тщательно залужено и очищено от окислы. После пайки остатки флюса удаляют ватным тампоном с помощью ацетона, спирта или бензина. При попадании на кожу рук флюс легко смывается водой с мылом.

Второй способ предусматривает предварительное омеднение того участка алюминиевой поверхности, которую требуется залудить. Для этого на предварительно зачищенный и обезжиренный участок наносят несколько капель насыщенного раствора медного купороса (сернокислой меди). Затем к алюминию подсоединяют с помощью зажима «крокодил» или привинчивают винтом провод от отрица-

тельного (минусового) вывода источника постоянного тока, в качестве которого можно использовать гальваническую батарейку типа КБС-Л с напряжением 4,5 В, свежую 9-вольтовую батарейку «Крона» или маломощный выпрямитель с напряжением не выше 12 В (либо автомобильный или мотоциклетный аккумулятор).

В плюсовую цепь источника включают специальное несложное приспособление, состоящее из старой зубной щетки и куска голого, обязательно медного, провода диаметром 1–1,5 мм. Конец провода располагают внутри щетины зубной щетки таким образом, чтобы он в процессе работы не касался поверхности алюминия. Все приспособление в сборе показано на рис. 16.

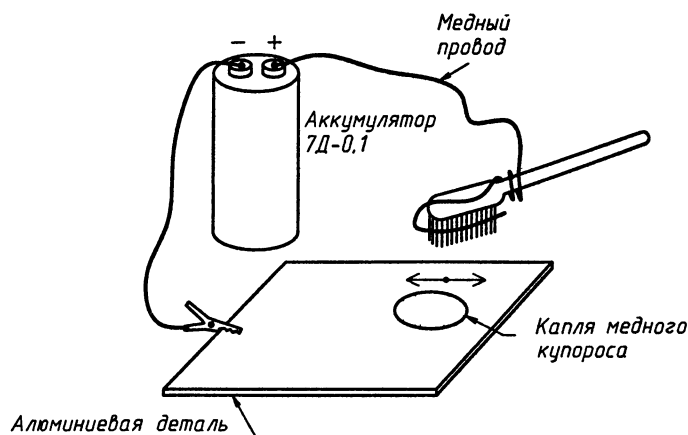


Рис. 16. Приспособление для омеднения алюминиевой поверхности

Смочив щетину раствором медного купороса, щеткой начинают растирать подготовленное место пайки, не допуская замыкания медного провода на алюминиевую деталь и добавляя по мере необходимости раствор.

Омеднение легко видно на глаз, однако не следует слишком торопиться с окончанием процесса, чтобы слой меди оказался достаточным для качественного залуживания. Омедненный участок после удаления остатков купороса, промывки и просушивания залуживают как и обычные металлы медной группы.

И в заключение еще один важный совет. При промышленном производстве выводы всех радиодеталей, предназначенных для паяных соединений (резисторы, конденсаторы, полупроводниковые диоды, транзисторы, лепестки различных разъемов и ламповых панелек и пр.), заранее покрывают слоем металла, допускающего пайку стандартными припоями типа ПОС без дополнительной обработки. Это может быть лужение (как правило, химическое), кадмирование, серебрение или золочение.

Однако с течением времени (особенно при длительном хранении с доступом воздуха) эти поверхности окисляются, что отлично видно на глаз по существенному потемнению и даже почернению изначально блестящих поверхностей. Такие окислившиеся выводы деталей очень плохо паяются и не обеспечивают получения надежного электрического соединения. Во всех подобных случаях окислившиеся выводы деталей необходимо острым ножом зачистить до блеска, даже если с пленкой окисла удаляется и само защитное покрытие, надежно залудить обычным припоем с канифольным флюсом и только после этого использовать в работе.

Для зачистки посеребренных и позолоченных выводов вместо лезвия ножа можно воспользоваться школьным ластиком, что позволит сохранить сами защитные покрытия.

# ЗАНЯТИЕ ПЯТОЕ

## Теория



### Урок 1. РАБОТА ЛАМПОВОГО КАСКАДА

На четырех предыдущих занятиях мы в самых общих чертах познакомились с принципом работы электровакуумных и газоразрядных электронных приборов (радиоламп), их устройством и областью применения.

Слова «в самых общих чертах» сказаны не случайно, поскольку приведенные данные о радиолампах составляют ничтожную часть общих сведений об этих удивительных приборах. Достаточно сказать, что мы ограничились всего лишь упоминанием о том, что к разряду радиоламп относятся такие приборы, как осциллографические трубки и телевизионные кинескопы, многочисленные передающие телевизионные трубки — иконоскопы, видиконы, ортископы, фотоэлементы, фотоумножители, приборы, генерирующие и усиливающие сигналы сверхвысоких частот (сантиметрового и миллиметрового диапазонов) — клистроны и магнетроны, без которых вообще немислимы такие области радиотехники, как телевидение, ооременная медицина, радиолокация, космическая связь и т. п.

Почему же мы оставили за бортом эти темы? Эта книга рассчитана на начинающего радиолюбителя и потому имеет очень ясную и ограниченную задачу: ознакомить читателя с основами радиотехники и дать общие сведения о радиокомпонентах, ее составляющих. К тому же с большинством из указанных выше электровакуумных приборов, как правило, вообще не придется иметь дело в радиолюбительской практике. А на сегодня приведенных данных о радиолампах нам вполне достаточно.

Впрочем, достаточно ли? Ведь не зря же говорят: «Грош цена любому знанию, если им нельзя воспользоваться на практике». Так и в нашем случае: все, сказанное ранее, — это всего лишь «теоретический багаж», необходимый для работы с реальными ламповыми схемами. Необходимый — да, но, увы, недостаточный.

Чтобы на практике использовать этот «багаж», нужно еще уметь грамотно осуществить расчет и монтаж лампового каскада (усилителя или генератора), ясно представлять особенности его работы, специфику налаживания и регулировки и т. п. Вот обо всем этом мы сейчас и поговорим.

Любая радиолампа, просто лежащая на столе, никому не нужна. А чтобы ее использовать, необходимо осуществить ряд действий: подключить ее к некоторой электрической схеме, т. е. подвести к ее электродам питающие постоянные напряжения от источника питания, подать на управляющий электрод входной сигнал, установить необходимый паспортный режим на каждом из ее электродов, обеспечить «съем» полезного сигнала и т. п.

Чтобы все это осуществить, саму лампу тем или иным способом электрически соединяют с целым рядом других схемных элементов — резисторами, конденсаторами, трансформаторами, резонансными контурами. Все эти вспомогательные элементы вместе с лампой образуют так называемый каскад.

Вместо радиолампы усилительным (или генераторным) элементом может служить транзистор или микросхема, но независимо от вида активного элемента любой каскад всегда выполняет какую-либо определенную функцию. Это может быть каскад предварительного усиления звуковой частоты, или мощный оконечный каскад, или усилитель высокой (или промежуточной) частоты, или гетеродин, или смеситель в супергетеродине.

Здесь надо сразу провести четкую грань между функцией каскада и назначением функционального блока в приемнике, телевизоре или магнитофоне. Функциональным блоком называется участок схемы, решающий одну общую задачу, например усиление промежуточной частоты в приемнике. Он может содержать всего лишь один каскад УПЧ на лампе или транзисторе, и в этом случае понятия каскада и функционального блока совпадают. Но это лишь один частный случай, поскольку гораздо чаще функциональный блок УПЧ содержит несколько одинаковых (или неодинаковых) каскадов УПЧ.

Запомним это и учтем, что дальше речь будет идти именно о ламповом каскаде. Внутри лампового каскада каждая отдельная деталь в свою очередь решает какую-либо одну узкую задачу. Например, разделительные емкости, стоящие на входе и на выходе каскада, предназначены для разделения постоянной и переменной составляющих подводимого к каскаду или снимаемого с выхода каскада напряжений. Резистор в цепи катода лампы или эмиттера транзистора может выполнять две функции: устанавливать величину первоначального «смещения» на управляющем электроде и определять коэффициент отрицательной обратной связи. Резистор в анодной (или коллекторной) цепи чаще всего является той самой полезной нагрузкой, с которой «снимается» усиленное лампой переменное напряжение сигнала и т. д.

Каждый из входящих в каскад схемных элементов для данной конкретной схемы должен иметь оптимальную величину или, точнее, некоторый достаточно узкий диапазон допустимых значений. Численные значения этих величин определяются по существующим расчетным формулам или графикам, с некоторыми из которых мы познакомимся уже на этом уроке.

Самым простым усилительным ламповым каскадом является низкочастотный усилитель на триоде по схеме «с общим катодом», с активным резистором в анодной цепи, работающий на нагрузку, роль которой выполняет резистор «утечки сетки» лампы следующего каскада. Полная принципиальная схема такого каскада приведена на рис. 17.

Давай вместе разберемся с назначением каждой входящей в схему каскада детали. Начнем с конденсатора  $C1$ . Он называется входным разделительным конденсатором. Входным — потому что он стоит на входе каскада, а разделительным — потому что его единственное назначение — не допустить попадания постоянного напряжения от внешнего источника сигнала (например, от детектора приемника, на выходе которого, как мы знаем, есть и переменная, и постоянная составляющие)



утечки сетки стараются выбирать как можно большим, но не превышающим максимально допустимого для данной лампы паспортного значения. Это паспортное значение определяется в процессе разработки и первичных лабораторных испытаний лампы и отражается в технической документации наряду с другими предельно-допустимыми параметрами.

Резистор  $R2$  называют анодной нагрузкой лампы. Необходимо разделить два понятия: нагрузка лампы и нагрузка каскада. Чуть дальше мы подробно рассмотрим это различие, а сейчас будем считать, что еще одного резистора, который вынесен за границы каскада и обозначен пунктиром, просто не существует.

Что происходит с резистором  $R2$ , когда каскад подключен к источнику питания? По нему протекает анодный ток, создающий на резисторе некоторое падение напряжения, которое как бы вычитается из общего напряжения источника питания. В результате на аноде лампы относительно минуса источника остается некоторое напряжение  $E_a$ , равное

$$E_a = E_{\text{ист}} - E_{R2}.$$

Это постоянное напряжение на аноде остается неизменным только до тех пор, пока на управляющую сетку лампы не подается полезный сигнал в виде некоторого переменного напряжения. Это состояние лампы называют состоянием покоя, а установившийся при этом режим (т. е. величина анодного напряжения и соответствующая ему величина анодного тока) называют режимом покоя.

На рис. 18 приведен график (анодная характеристика) некоего условного триода, для которого в режиме покоя при начальном напряжении смещения на сетке, равном  $-2$  В, анодный ток покоя составляет  $4,5$  мА, что приблизительно соответствует середине прямолинейного участка характеристики (точка  $B$  на графике).

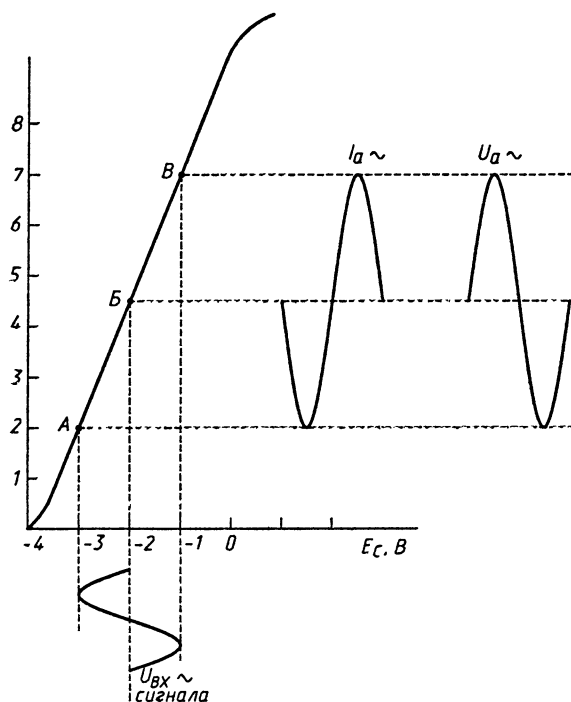


Рис. 18. Анодная характеристика триода, иллюстрирующая изменение величин анодного тока и анодного напряжения лампы в зависимости от амплитуды и фазы входного сигнала

Посмотрим, что будет происходить, если мы подадим на сетку синусоидальное напряжение с размахом  $\pm 1$  В. Во время отрицательной полуволны суммарное напряжение на сетке изменится на 1 В от  $-2$  В до  $-3$  В, что приведет к уменьшению анодного тока до 2 мА (точка *A* на графике). А во время положительной полуволны напряжение на сетке изменится от  $-2$  В до  $-1$  В, что приведет к увеличению анодного тока до 7 мА (точка *B* на графике). Иными словами, синусоидальный сигнал с амплитудой 2 В, поданный на сетку лампы, приводит к изменению анодного тока на 5 мА (от 2 до 7 мА). Запомним эти две величины.

Теперь пойдем дальше и предположим, что напряжение источника у нас равно 200 В, а величина резистора  $R_2$  составляет 10 кОм. В этом случае при токе покоя 4,5 мА на резисторе  $R_2$  падение напряжения составит 45 В, а на аноде лампы останется  $200 - 45 = 155$  В. А при подаче на вход лампы нашего синусоидального сигнала анодный ток будет меняться от 2 до 7 мА, падение напряжения на резисторе нагрузки будет меняться от 20 до 70 В, а анодное напряжение соответственно от  $200 - 20 = 180$  В до  $200 - 70 = 130$  В, т. е. на  $180 - 130 = 50$  В.

Иначе говоря, подав на сетку переменное напряжение величиной 2 В, мы получили на резисторе нагрузки такое же по форме и частоте напряжение величиной 50 В. Налицо очевидное усиление сигнала в 25 раз!

Мы сказали: «такое же по форме и частоте». Однако напряжение на резисторе нагрузки существенно отличается от подведенного к сетке лампы не только по величине, но и по фазе.

Дело в том, что увеличение положительного напряжения на сетке и соответственно увеличение анодного тока приводит к уменьшению напряжения на аноде и наоборот, т. е. напряжение на выходе каскада находится в противофазе с напряжением на его входе. Эта особенность усилительного каскада весьма существенна, и к этому мы будем еще не раз возвращаться.

И, наконец, в нашей схеме остался еще один резистор —  $R_3$  в цепи катода лампы. Разберемся и с ним. Как мы уже говорили, первоначальный режим лампы (режим покоя) выбирают таким, чтобы при подаче на ее управляющую сетку переменного напряжения полезного сигнала «рабочая точка» на анодной характеристике не выходила в область положительных значений при максимальной амплитуде входного сигнала.

Чтобы обеспечить выполнение этого условия, на управляющую сетку заранее задают некоторое постоянное напряжение (напряжение смещения) отрицательной полярности относительно катода, как бы смещая рабочую точку в режиме покоя в сторону минусовых значений. Осуществить это можно разными способами, например с помощью дополнительного источника постоянного напряжения, как это было сделано в схеме на рис. 8,б (с. 27.)

Однако есть и другой, более простой способ, состоящий в том, что в разрыв цепи катода включают дополнительный резистор. Вернемся к рис. 17 и посмотрим, что происходит при подключении схемы к источнику питания. Между плюсом и минусом источника образуется последовательная замкнутая электрическая цепь, состоящая из трех сопротивлений: резистора анодной нагрузки  $R_2$ , внутреннего сопротивления лампы  $R_i$  и резистора в цепи катода  $R_3$ . Поскольку ток через все три резистора протекает в одном направлении, полярность напряжения, падающего на этих сопротивлениях, показанная на рисунке значками «+» и «-», также будет одинаковой.

В частности, на резисторе  $R_3$  на катоде лампы окажется плюс по отношению к общему минусовому выводу источника питания. Величина этого напряжения будет определяться по закону Ома как произведение величины анодного тока на величину сопротивления резистора.

Величина анодного тока не может быть выбрана произвольной в широких пределах, поскольку определяется типом лампы и оптимальным режимом покоя. А величину резистора  $R3$  мы можем выбирать произвольно, меняя тем самым и величину падения напряжения на нем.

Теперь посмотрим внимательно на цепь управляющей сетки. Ее вывод через резистор  $R1$  «утечки» также соединен с общим минусовым выводом источника питания, а следовательно, и с нижним по схеме выводом резистора  $R3$ . А поскольку на резисторе  $R1$  нет никакого падения напряжения, можно утверждать, что на сетке лампы будет такой же потенциал, что и на нижнем конце резистора  $R3$ , т. е. «минус» по отношению к катоду. И величина этого «минуса» будет равна величине падения напряжения на резисторе  $R3$ .

Таким образом, введя в разрыв цепи катода постоянный резистор, мы автоматически создаем первоначальное смещение на управляющей сетке, величину которого можно точно задать, выбирая величину резистора  $R3$ . Кстати говоря, такой способ задания смещения так и называется — автоматическое смещение, а резистор в цепи катода — резистором автоматического смещения. Объясняется это тем, что при изменении величины анодного тока синхронно изменяется и величина падения напряжения на резисторе  $R3$ , т. е. схема как бы сама следит за тем, чтобы при изменениях анодного тока автоматически изменялось бы и положение рабочей точки на характеристике лампы.

А сейчас, пользуясь полученными знаниями, попытаемся самостоятельно произвести практический расчет лампового каскада на вполне реальном ламповом триоде.

Самым простым усилительным ламповым каскадом является усилитель звуковой частоты на триоде по схеме «с общим катодом». Его схема полностью соответствует приведенной на рис. 17.

Расчет любого лампового каскада, строго говоря, состоит из двух составляющих. Первая представляет собой обязательный и по возможности максимально точный расчет, объектами которого являются элементы, определяющие электрический режим самой лампы: резистор в анодной цепи лампы ( $R2$ ), резистор автоматического смещения в катодной цепи ( $R3$ ), а также параметры источника питания (полное напряжение на его выходе, отдаваемый в нагрузку ток, степень допустимой пульсации выпрямленного напряжения).

Вторая составляющая расчета не всегда является обязательной и может носить приблизительный характер. Это касается расчета величин «вспомогательных» элементов каскада — входного и выходного разделительных конденсаторов, блокировочного конденсатора параллельно резистору  $R3$ , а также учету влияния так называемых паразитных емкостей (собственные междуэлектродные емкости самой лампы, емкости ламповой панельки и монтажных проводов и т. п.).

Расчет и учет влияния этих элементов сказывается в основном на неравномерности АЧХ каскада и устойчивости его работы на высоких частотах. Если же величина неравномерности АЧХ в пределах рабочей полосы частот строго не оговаривается, то величины емкости конденсаторов  $C1$ ,  $C2$  и  $C3$  вполне допустимо выбирать «с запасом», по принципу «чем больше, тем лучше». В разумных пределах, разумеется.

А сейчас будем считать, что перед нами стоит задача рассчитать конкретный каскад предварительного усилителя звуковой частоты, работающего от источника сигнала с напряжением  $U_{\text{сигн}} = 150$  мВ в диапазоне частот от 20 Гц до 20 кГц и предназначенного для «раскачки» мощного оконечного усилителя на лампе типа 6П14П. В качестве лампы для нашего каскада заранее выделен один из триодов двойного триода типа 6Н2П.



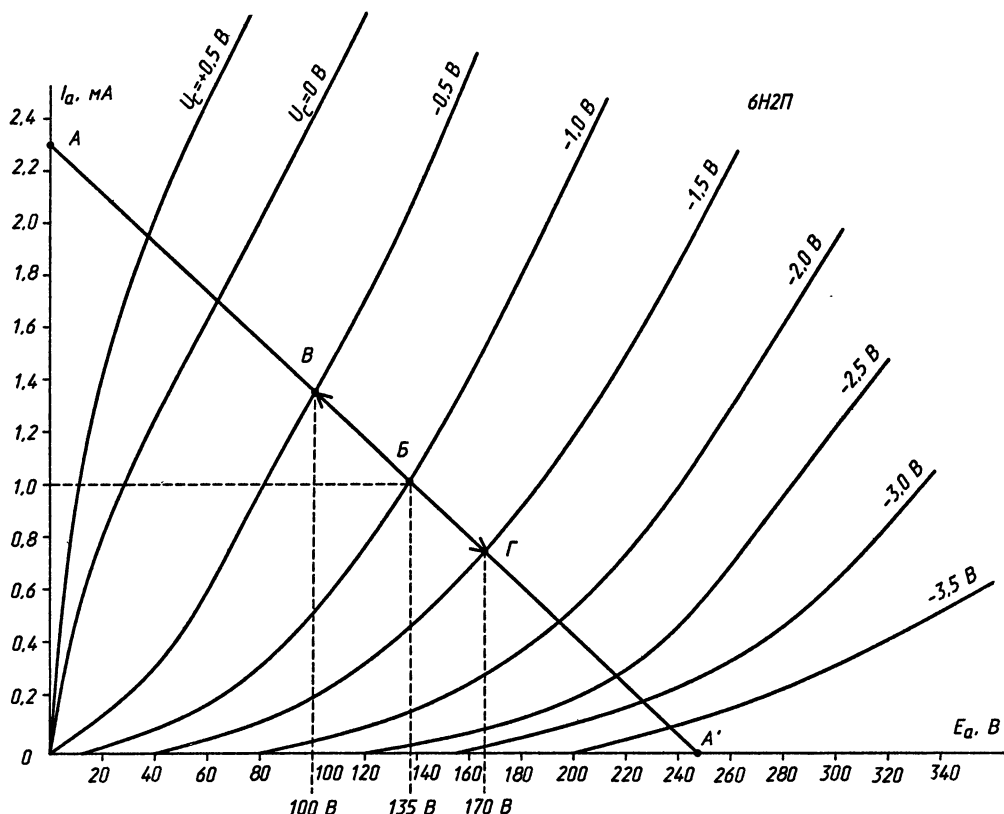


Рис. 19. Методика выбора рабочего режима лампы по семейству ее анодных характеристик

Поскольку типы обеих ламп нам уже заданы, выпишем необходимые для расчета следующие паспортные данные этих ламп:

для лампы 6Н2П:

$$E_A = 250 \text{ В}$$

$$E_C = -1,5 \text{ В}$$

$$I_A = 2,3 \text{ мА}$$

$$S = 2,1 \text{ мА/В}$$

$$\mu = 97,5$$

$$R_i = 46,5 \text{ кОм}$$

$$R_{C \text{ макс}} = 0,5 \text{ МОм}$$

для лампы 6П14П:

$$U_{\text{вх. ном}} = 5,5 \text{ В}$$

$$R_{\text{утеч, с}} = 0,47 \text{ МОм}$$

Начнем с электрического расчета схемных элементов, определяющих рабочий режим самой лампы, для чего воспользуемся уже известной нам методикой (графо-аналитический расчет) с использованием семейства анодных характеристик.

Семейство таких характеристик для одного триода лампы 6Н2П приведено на рис. 19. Прежде всего отметим на вертикальной и горизонтальной осях графика две точки, соответствующие паспортным значениям величин анодного тока и анодного напряжения:

$$I_A = 2,3 \text{ мА},$$

$$U_A = 250 \text{ В}.$$

Проведем ограничительную прямую А–А'. Выше (правее) этой линии использовать лампу нельзя. Кстати, на любой точке этой линии легко определить величину оптимального сопротивления нагрузки лампы при разных напряжениях на сетке. Это сопротивление, кОм, будет равно

$$R_H = \frac{U_A}{I_A},$$

где  $U_A$  — анодное напряжение, В;  $I_A$  — анодный ток, мА.

При выборе начального режима покоя лампы нужно обеспечить выполнение, по крайней мере, двух основных условий:

1. При наибольшей амплитуде входного сигнала суммарное напряжение на сетке должно оставаться отрицательным, желательно хотя бы с двукратным запасом во избежание возникновения сеточного тока с неизбежными в этом случае нелинейными искажениями.

2. Две соседние с выбранной кривые должны быть максимально симметричны, т. е. линейное расстояние между ними и основной кривой, измеренное по ограничительной прямой А–А', должно быть одинаковым (на рис. 19 это отрезки БВ и БГ).

Поскольку входной сигнал в нашем случае составляет всего 150 мВ (или 0,15 В), первое из условий легко удовлетворяется (притом с шестикратным запасом) выбором начального смещения 1 В, при этом оказывается удовлетворенным и второе условие, так что в качестве рабочей точки в режиме покоя (т. е. при отсутствии входного сигнала) выбираем точку Б.

Из графика видно, что этой точке соответствуют анодное напряжение 135 В и анодный ток 1 мА. По этим данным без труда определяем оптимальное сопротивление нагрузки:

$$R_H = \frac{135}{1} = 135 \text{ кОм},$$

а заодно и сопротивление автоматического смещения в катode:

$$R_K = \frac{U_C}{I_A} = \frac{1}{1} = 1 \text{ кОм}.$$

Теперь легко определить реальное значение сопротивления в цепи анода, исходя из предельно допустимого напряжения источника (250 В) и тока покоя лампы. Поскольку напряжение на аноде должно быть 135 В, то падение напряжения на анодном резисторе должно составить  $250 - 135 = 115$  В, что при токе 1 мА соответствует сопротивлению 115 кОм.

Как видим, величина реального сопротивления нагрузки отличается от оптимальной всего на 15%, что не так существенно. На практике в данном конкретном случае, учитывая незначительный размах входного сигнала, можно выбирать величину анодного резистора в пределах 100...150 кОм, что почти не отразится на нормальной работе каскада.

Нетрудно заметить, что если бы мы все же захотели применить оптимальный резистор нагрузки величиной точно 135 кОм, нам пришлось бы взять источник питания с напряжением не 250, а 270 В. Сам по себе этот факт не привел бы к перегрузке лампы, поскольку даже при запирающем напряжении –1,5 В (т. е. при шестикратной перегрузке по входу) анодное напряжение на лампе не превысило бы 170 В (точка Г на графике). Однако в момент включения, когда лампа еще не прогрелась и ее анодный ток равен нулю, на резисторе нагрузки нет никакого падения напряжения и, следовательно, к аноду оказывается приложено полное напряжение выпрямителя (+270 В), что превышает предельно допустимое паспортное значение.

Что касается величины резистора «утечки сетки», то его обычно выбирают равным максимально допустимому. В нашем случае оно равно 0,5 МОм. Но поскольку это значение «нестандартное», остановимся на ближайшем меньшем значении — 470 кОм.

На этом основной расчет «режимных» элементов каскада заканчивается. Можно, правда, проверить, обеспечивается ли при этом необходимое усиление каскада. По условию оно должно быть не меньше

$$K_{у. \text{ расч}} = \frac{U_{\text{вх. 6П14П}}}{U_{\text{вх. сигн.}}} = \frac{5,5}{0,15} = 30,6.$$

Возьмем на графике две соседние кривые: 1 и 0,5 В. Разность напряжений на сетке в этом случае составляет 0,5 В (точки Б и В). Опустив из этих точек перпендикуляры на ось анодных напряжений, найдем, что изменению напряжения на сетке в 0,5 В соответствует изменение напряжения на аноде от 100 до 135 В, или на 35 В. Разделив 35 на 0,5, получим коэффициент усиления 70, что вдвое превышает необходимое.

Однако такое усиление имело бы место только в том случае, если бы в цепи катода не было резистора  $R3$ . Дело в том, что помимо своей основной функции этот резистор одновременно создает цепь так называемой отрицательной обратной связи по току. Не вдаваясь глубоко в физику этого явления, объясним это следующим образом.

Постоянная составляющая анодного тока в режиме покоя создает на резисторе падение постоянного напряжения, являющегося напряжением смещения на управляющей сетке. А при наличии полезного сигнала в составе анодного тока появляется переменная составляющая, выделяющаяся на резисторе нагрузки в виде усиленного полезного сигнала. Мы уже отметили одну важную особенность этого напряжения: оно имеет противоположную фазу относительно входного сигнала.

Но ведь переменная составляющая анодного тока протекает не только через резистор  $R2$ , но и через резистор  $R3$ , на котором также создает переменное напряжение, фаза которого совпадает с фазой входного сигнала. Это значит, что увеличение амплитуды входного сигнала приводит к увеличению падения напряжения на резисторе  $R3$ , что, в свою очередь, смещает рабочую точку лампы в область отрицательных значений, а это равнозначно уменьшению коэффициента усиления лампы. Выходит, что переменная составляющая напряжения на резисторе  $R3$  препятствует увеличению анодного тока при увеличении амплитуды входного сигнала.

Надо сказать, что явление это не всегда вредное. Очень часто отрицательную обратную связь по току специально создают в широкополосных усилителях, поскольку одновременно с уменьшением коэффициента усиления лампы существенно улучшаются другие качественные показатели: уменьшаются нелинейные искажения, снижается неравномерность АЧХ и т. п.

Вот и в нашем случае реальный коэффициент усиления без учета действия обратной связи более чем вдвое превышает необходимый, поэтому использование эффекта отрицательной обратной связи вполне оправданно.

Впрочем, нейтрализовать действие обратной связи очень просто. Для этого достаточно подключить параллельно резистору конденсатор достаточно большой емкости, который «замкнет» переменную составляющую, оставив неизменным постоянное напряжение.

Что значит «...достаточно большой емкости...»? Это определяется строго математически. Допустим, что в нашем случае мы хотим снизить влияние обратной связи до 10%. В этом случае переменная составляющая на резисторе должна быть в 10 раз меньше постоянной составляющей. А поскольку конденсатор включен па-

параллельно резистору, значит его сопротивление переменному току также должно быть в 10 раз меньше, т. е. для нашего примера составлять 100 Ом.

На какой частоте? Разумеется, на самой нижней частоте усиливаемого спектра. В нашем случае такой частотой является частота 20 Гц. Для определения величины емкости воспользуемся формулой, с которой мы познакомились еще в первой книге:

$$C = \frac{160000}{Z_c f} = \frac{160000}{100 \cdot 20} = \frac{160000}{2000} = 80 \text{ мкФ},$$

где  $Z_c$  — сопротивление переменному току, Ом;  $f$  — частота, Гц.

Округляя до ближайшего большего стандартного значения, возьмем 100 мкФ на рабочее напряжение в единицы вольт. Расчет величин емкостей переходных и разделительных конденсаторов на входе и выходе каскада не является специфическим для ламповых схем: он одинаков и для транзисторов, и для микросхем, и вообще для любых *АС*-делителей, поэтому сегодня мы на этом останавливаться не будем.

Ну вот, пожалуй, и все, что на данном этапе следует знать об электровакуумных приборах. В дальнейшем, по мере «обрастания» более глубокими знаниями, мы, возможно, еще будем возвращаться к их изучению. А пока что начиная со следующего занятия мы переключимся на изучение не менее обширной и интересной темы — устройству и принципу работы полупроводниковых приборов.

## Урок 2. ВИДЫ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СХЕМ

Сегодняшний урок мы решили посвятить созданию принципиальной схемы простейшего супергетеродинного приемника.

А что, кроме принципиальной, бывают еще и непринципиальные схемы?

Здесь нам опять придется ненадолго отвлечься и «закрыть» этот вопрос.

Дело в том, что все, что связано с любой техникой — ее разработкой, проектированием, изготовлением, эксплуатацией или ремонтом, — всегда обязательно начинается с технической документации. В зависимости от поставленной цели и предстоящего объема работ в том или ином случае применяются разные виды технической документации. К примеру, любая разработка нового изделия начинается с комплекта проектной документации, который может включать в себя техническое задание, технико-экономическое обоснование и еще десятки других документов.

При сборке радиоаппаратуры на конвейере радиозавода единственным техническим документом для монтажника является специальная монтажная карта, на которой отражены последовательность и содержание операций, которые этот монтажник обязан выполнить.

А для регулировщика собранного приемника или телевизора рабочими документами являются карта режимов, карта сопротивлений и (или) частоты настройки тех или иных резонансных контуров.

Работнику радиоремонтной мастерской для производства качественного ремонта разных аппаратов совершенно необходимы как минимум принципиальные схемы каждого из них.

Поэтому существует довольно большое число разных видов технической документации, среди которых важное место занимают различные схемы.

В радиотехнике наибольшее распространение получили несколько схем, с которыми довольно часто придется сталкиваться в технической литературе и своей практической деятельности, поэтому познакомиться с ними совершенно необходимо.

**Функциональная схема** (или иначе — блок-схема). Это по существу достаточно произвольный по форме исполнения чертеж, задачей которого является отражение функций (или иначе — назначения) каждого из дискретных участков прибора или аппарата (блоков, каскадов, модулей и т. п.), а также путей прохождения тех или иных электрических сигналов.

На функциональной схеме каждый отдельный элемент отображает схемно-заключенный участок прибора или аппарата, выполняющий одну конкретную функцию (например, детектор радиосигнала, сетевой выпрямитель, фильтр сосредоточенной селекции, усилитель промежуточной частоты), при этом этот элемент не раскрывает внутреннего устройства и схемного состава данного участка прибора.

Такой элемент по желанию составителя схемы может изображаться какой-либо геометрической фигурой: кружком, квадратом, прямоугольником, треугольником, ромбом. Как правило (хотя и не обязательно), в пределах одной схемы все функциональные узлы изображаются одинаковыми фигурами.

Внутри каждого кружка или квадрата (иногда под ним или над ним) проставляются порядковые номера блоков. В этом случае на этом же чертеже или в прилагаемом к нему тексте приводится расшифровка этих цифр, поясняющая назначение данного блока.

Впрочем, в литературе, предназначенной для специалистов, внутри геометрических фигур вместо цифр нередко проставляются общепринятые и хорошо известные аббревиатуры, отражающие назначение данного функционального узла. Например, УВЧ — усилитель высокой частоты, УПЧ — усилитель промежуточной частоты, УВ и УЗ — усилители воспроизведения и записи магнитофона соответственно, ФСС — фильтр сосредоточенной селекции и т. п.

Чаще всего (но не обязательно) функциональные схемы пишутся и читаются слева направо, т. е. сигнал к каждому функциональному узлу подводится слева, а снимается справа, поэтому, к примеру, блок-схема обычного вещательного приемника начинается в левом верхнем углу изображением приемной антенны, стрелка от которой идет к квадратику с обозначением «УВЧ», а от этого квадрата другая стрелка идет к квадратику с обозначением «Смес.», что расшифровывается как смеситель. А от смесителя стрелка идет дальше вправо к квадратику с аббревиатурой «ФСС» и т. д. Несколько разных вариантов функциональных схем бытовой радиоаппаратуры приведены на рис. 20.

Какую информацию несет блок-схема, а что из нее почерпнуть нельзя? Блок-схема прежде всего информирует о назначении аппарата, иногда — о принципе его работы (это может «прочесть» только специалист), затем — об относительной сложности (судя по простому количеству отдельных функциональных узлов).

А вот что касается видов и количества отдельных радиокомпонентов (резисторов, конденсаторов, катушек индуктивности и т. п.), входящих в аппарат, электрических режимов их использования, величинах номиналов деталей, питающих напряжений и соединениях этих элементов между собой, на эти вопросы блок-схема ответить не может. Для ответа на эти вопросы существует другой чертеж — принципиальная **электрическая схема**.

В отличие от блок-схемы на принципиальной схеме с помощью общепринятых условных обозначений изображены абсолютно все до одного дискретные радиокомпоненты и электрические соединения этих элементов между собой, т. е. вместо квадрата с буквами «ФСС» на принципиальной схеме изображены все входящие в этот фильтр отдельные катушки индуктивности и постоянные конденсаторы и их соединение между собой (как на рис. 10).

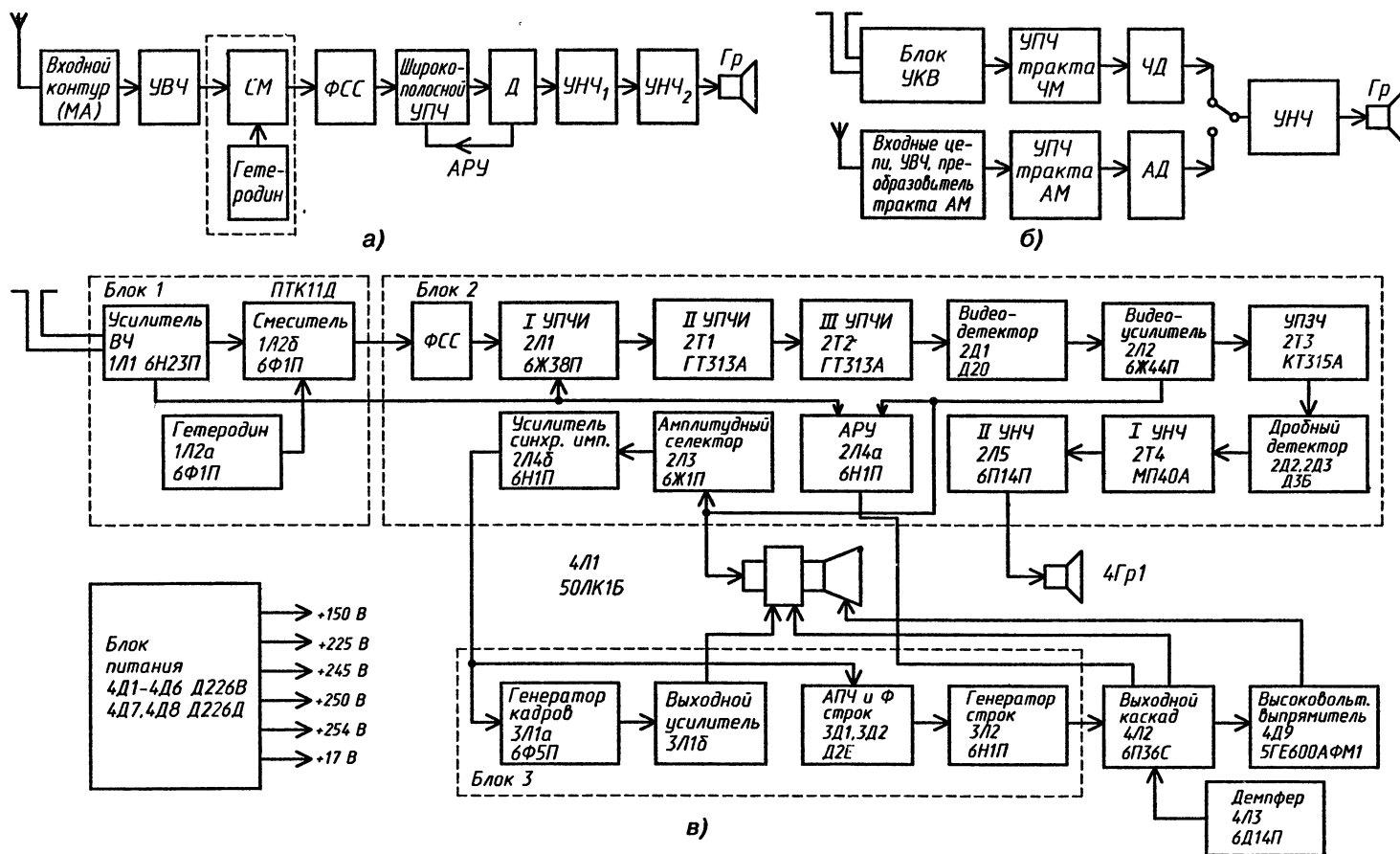


Рис. 20. Несколько вариантов блок-схем БРА:

а — супергетеродин для приема АМ-радиостанций; б — упрощенная блок-схема двухстандартного АМ-ЧМ супергетеродина; в — телевизор УЛПТ-50-III

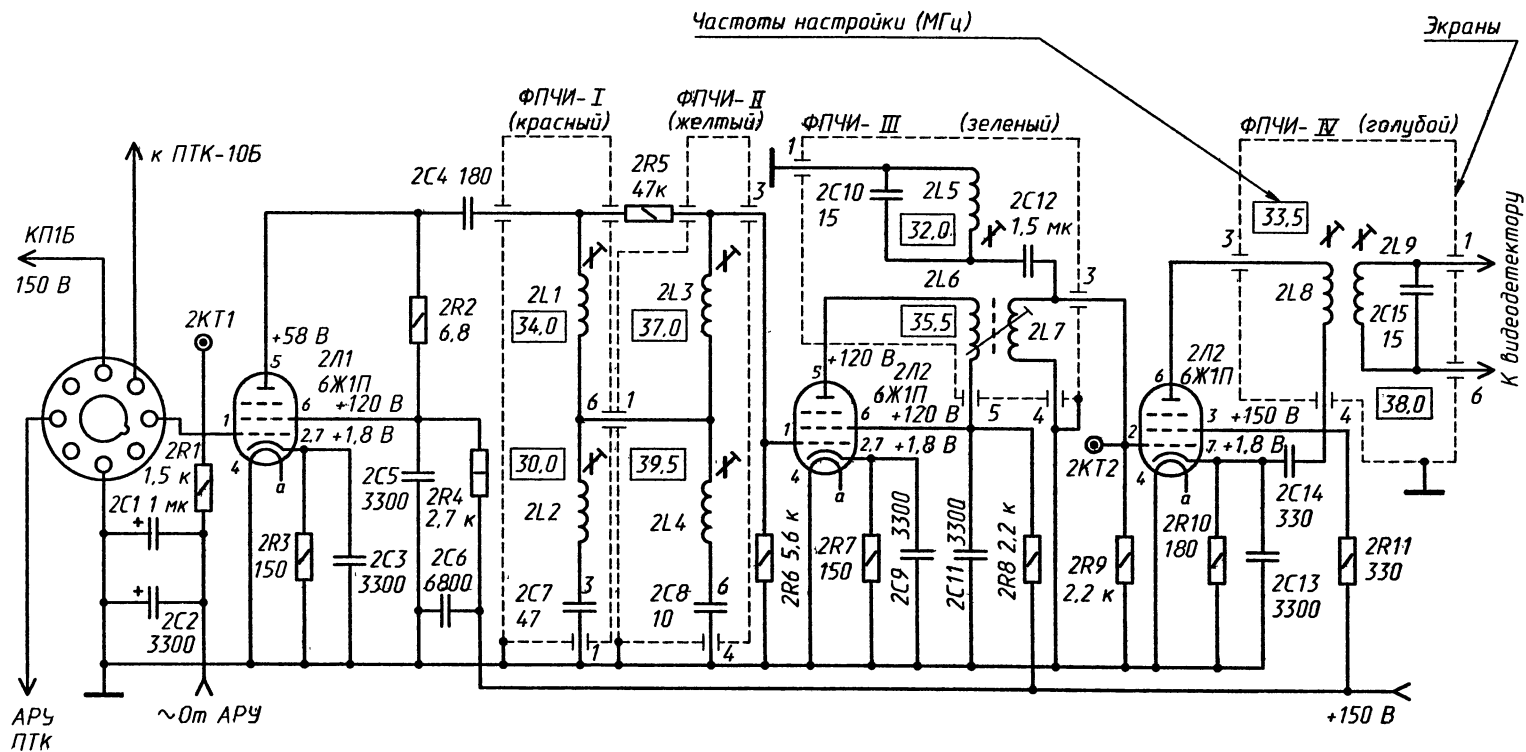


Рис. 21. Принципиальная схема радиоаппарата

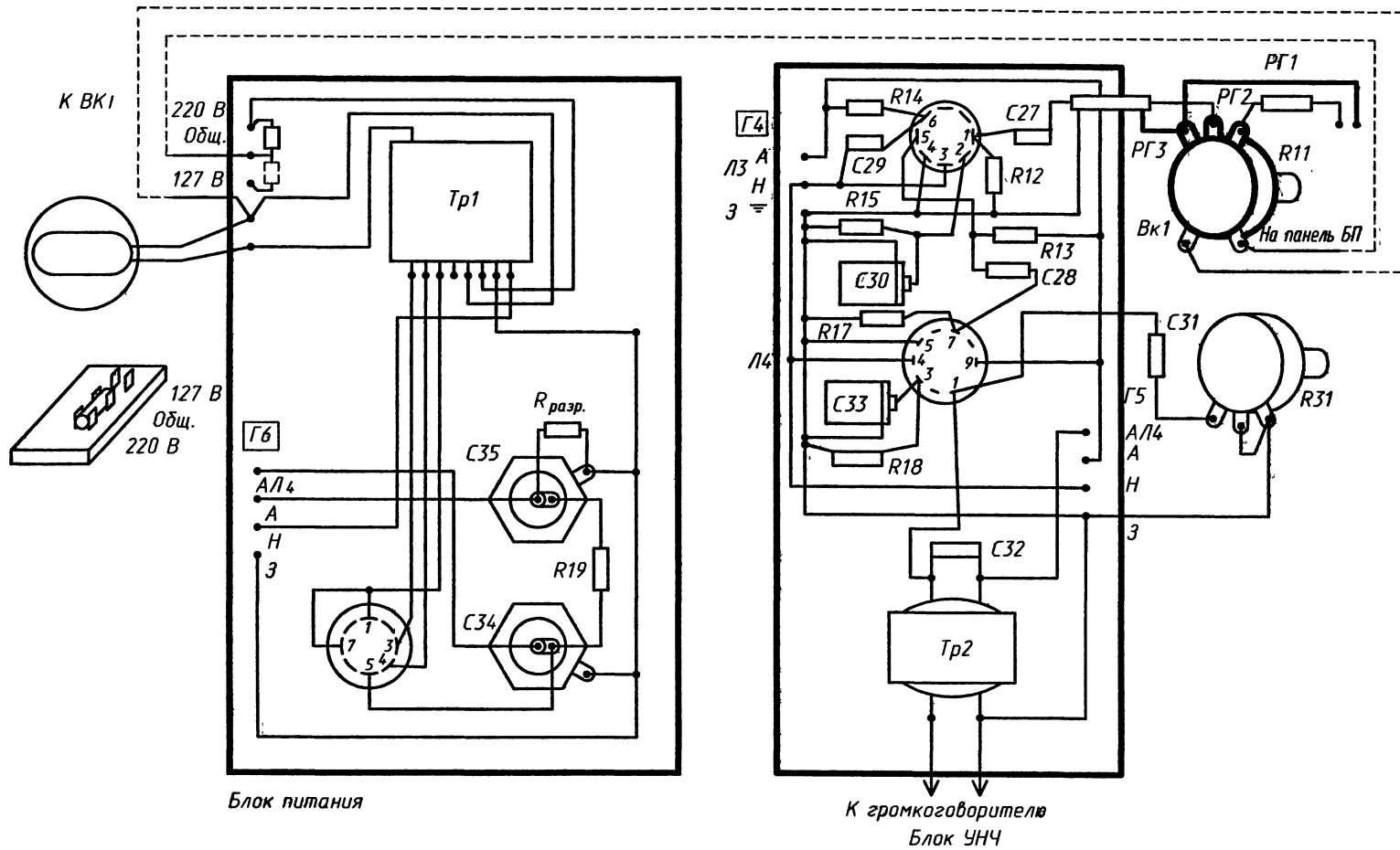


Рис. 22. Электромонтажная схема



В виде исключения в число радиокомпонентов обычно включают чисто механические электростатические экраны, если они являются неотъемлемой частью схемы (например, обязательный экран на контурных катушках и полосовых фильтрах), а также подстроечные сердечники катушек индуктивности. Они изображаются на принципиальной схеме специальными условными обозначениями.

На принципиальной схеме почти всегда указываются (цифрами) величины реальных «рабочих» напряжений постоянного тока для большинства электродов ламп и транзисторов, а также (не всегда) амплитуды и частоты различных сигналов в разных точках их прохождения. Иногда вместо этого к принципиальной схеме прилагается таблица рабочих режимов и величин полезных сигналов.

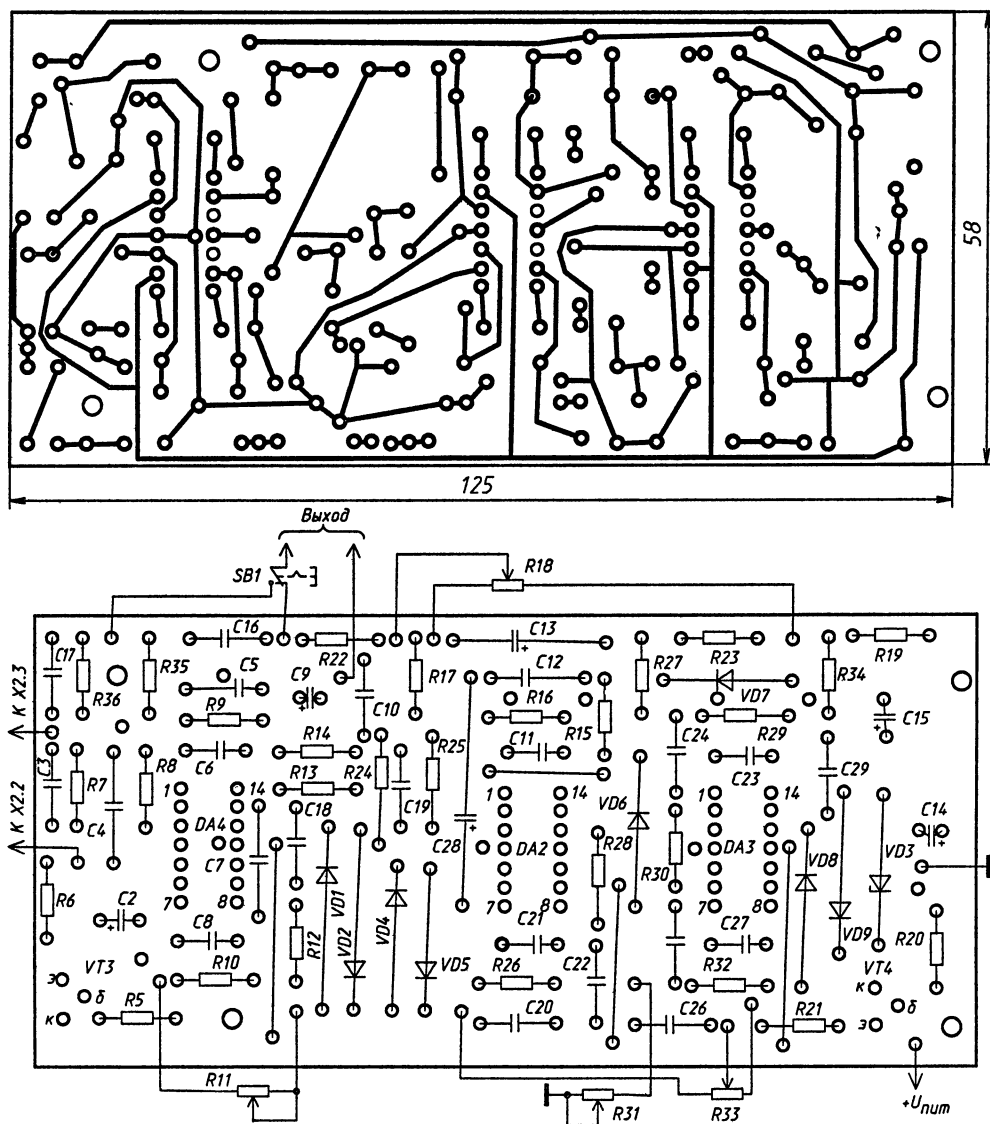


Рис. 23. Печатная плата и расположение на ней радиоэлементов

В радиолюбительской и профессиональной инженерной практике принципиальная электрическая схема является наиболее полным и информативным документом, без которого практически немыслима любая работа с радиоаппаратурой. Впредь и нам предстоит постоянно иметь дело с различными принципиальными схемами.

Для успешного пользования принципиальной схемой совершенно необходимо твердо знать и помнить условные обозначения всех радиокомпонентов, которые могут быть изображены на схеме. Эти обозначения уже приводились в первой книге (рис. 21, 23, 27). Будет очень полезно со временем выучить все их наизусть, как алфавит и таблицу умножения. Типичный образец принципиальной схемы приведен на рис. 21.

Помимо указанных двух видов схем в радиотехнике широко применяются и другие. Среди них стоит упомянуть те, с которыми мы будем сталкиваться (и уже сталкивались в первой книге) в своей практической деятельности. Это электромонтажная схема и чертеж печатной платы.

Электромонтажная схема представляет собой чертеж, на котором либо в натуральную величину, либо в указанном на чертеже масштабе изображено реальное взаимное расположение всех или большинства основных узлов и деталей аппарата, а также всех соединительных проводников, кабелей и кроссов с точным указанием адресов их распылки. Это значит, что у начала и конца каждого проводника с помощью набора букв и цифр (смысл которых обязательно расшифровывается на самой схеме) указывается точное место их присоединения (подпайки) к тому или иному выводу того или иного радиоэлемента (детали, блока, печатной платы).

Образец типичной электромонтажной схемы приведен на рис. 22, а на рис. 23 показан чертеж печатной платы и расположение на ней радиоэлементов.

Вот теперь мы полностью вооружены и готовы к составлению (для начала) наиболее простой функциональной схемы простого супергетеродинного приемника. Настоятельно рекомендую по ходу этой беседы самому построить на листе бумаги блок-схему, изображая на ней по мере продвижения вперед соответствующие условные обозначения. В конце концов, необходимо научиться делать это самостоятельно. А когда работа будет закончена, сравнить полученный результат с рис. 24 и сделать соответствующие выводы.

С чего начинается составление блок-схемы любого радиоприемника? Очевидно, с того же, с чего начинается и сам приемник. А с чего начинается любой приемник? Это мы знаем: он всегда начинается с приемной антенны. Поэтому в левом верхнем углу листа бумаги нарисуем условное обозначение антенны.

Куда в приемнике поступает сигнал, принятый антенной? Он поступает на входной избирательный контур. Следует сказать, что те или иные функциональные узлы в пределах одной схемы не обязательно изображать одинаковыми геометрическими фигурами. Более того, гораздо чаще имеет место обратное. Например, все активные элементы (лампы, транзисторы) на схеме изображают, скажем, кружочками, а все резонансные системы (одиночные контуры, полосовые фильтры) — другими знаками, например квадратами или прямоугольниками.

По уже установившейся традиции для некоторых функциональных узлов (микросхем, операционных усилителей, логических элементов и др.) закрепились вполне определенные, общепринятые обозначения, но мы пока этого касаться не будем.

На нашей первой блок-схеме договоримся активные функциональные узлы (усилители, генераторы, а заодно и детекторы) изображать, допустим, кружочками, а резонансные системы — прямоугольниками. В этом случае от значка, изображающего приемную антенну, мы должны провести прямую линию со стрелкой на конце, упирающейся в квадратик, который у нас будет обозначать входной контур.

Для того, чтобы было ясно, что это именно резонансный контур, можем внутри квадратика поместить изображение контура. Правилами это не запрещается.

Пошли дальше. Куда должен поступить сигнал со входного контура в простейшем супергетеродине, не имеющем отдельного каскада УВЧ? Он должен поступить на вход некоего нелинейного элемента, на котором он будет смешиваться с сигналом от местного гетеродина. В 99% случаев роль такого нелинейного элемента в радиоаппаратуре играют радиолампы, транзисторы или микросхемы, т. е. активные элементы, которые мы договорились обозначать кружочками. Значит, от квадратика, обозначающего входной контур, должна идти прямая линия со стрелкой к кружочку, символизирующему прибор, в котором происходит смешение двух сигналов, поэтому внутри кружочка или над ним мы поместим буквы «Смес.», чтобы всем было ясно, какую функцию выполняет этот функциональный узел.

Но ведь к смесителю одновременно с «входным» сигналом должен поступать еще и сигнал от местного вспомогательного генератора — гетеродина. Этот гетеродин обязательно содержит как минимум один активный элемент и свой собственный резонансный контур. Значит, под кружочком, изображающим смеситель, мы должны на некотором расстоянии изобразить второй кружочек, обозначив его буквами «Гетер.», а от этого второго кружочка провести в сторону первого кружочка вертикальную прямую линию со стрелкой в сторону смесителя. Одновременно слева от второго кружочка нам придется нарисовать еще один квадратик, обозначающий резонансный контур гетеродина, соединив его горизонтальным отрезком прямой с кружочком «Гетер.».

В какую сторону должна быть направлена стрелка на этом отрезке? Мы об этом совсем недавно говорили. Стрелка указывает направление прохождения электрического сигнала. Но ведь высокочастотный сигнал в гетеродине не может возникнуть на контуре без лампы (или транзистора), равно как на лампе или транзисторе без контура. Оговоримся сразу, что в некоторых схемах последний вариант все же возможен. Но в нашем случае активный элемент гетеродина и входящий в схему резонансный контур взаимосвязаны, поэтому стрелки на этом отрезке прямой должны быть с обеих сторон.

Пошли дальше. На выходе смесителя присутствуют как минимум четыре разных сигнала, из которых нам нужен только один: разностный сигнал промежуточной частоты. Чтобы его выделить, необходим еще один резонансный контур, в качестве которого, как мы уже знаем, выгодно использовать полосовой фильтр или ФСС. Значит, дальше вправо от смесителя надо поместить квадратик с обозначением «1-й ФПЧ». Почему именно первый? Потому что, как правило, в супергетеродине присутствуют минимум два одинаковых (а может быть, и неодинаковых) фильтра промежуточной частоты. И, разумеется, надо соединить смеситель и 1-й ФПЧ стрелкой в сторону последнего.

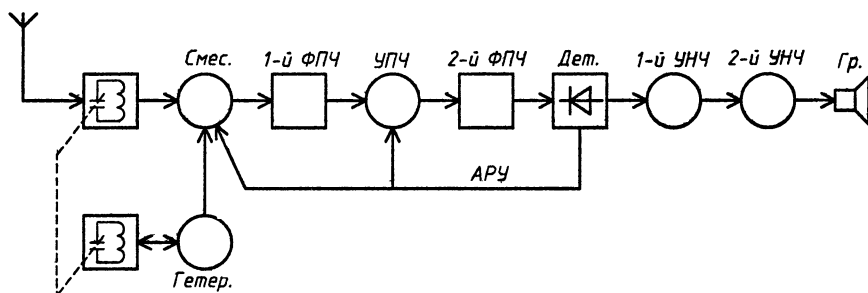
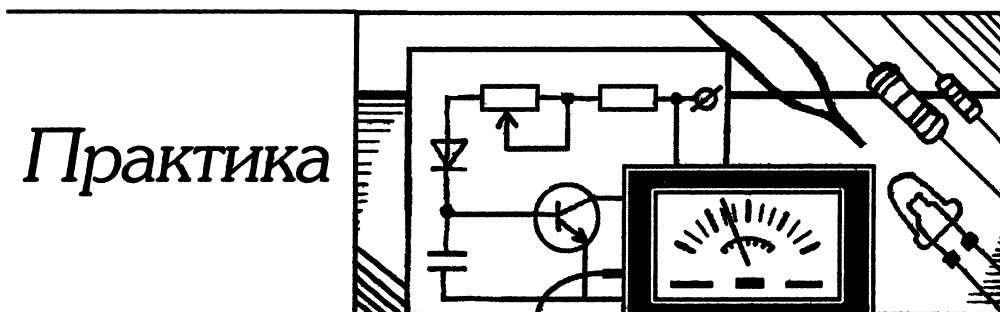


Рис. 24. Блок-схема простого супергетеродинного приемника

Выделенный фильтром сигнал ПЧ совершенно необходимо усилить, для чего требуется каскад УПЧ, содержащий активный элемент и свой (второй) ФПЧ, являющийся нагрузкой этого каскада. Осталось самостоятельно дорисовать два недостающих звена на нашей функциональной схеме.

А дальше еще проще. Усиленный сигнал нужно продетектировать, полученные после детектора две известные составляющие разделить, одну из них использовать в схеме автоматической регулировки усиления (АРУ), а другую после предварительного усиления подвести к громкоговорителю.

А теперь возьмем наш рисунок и сравним его с рис. 24. Если они полностью совпадают — отлично. Если не совсем — тоже не страшно. На ошибках принято учиться. Поэтому анализируем причину возникших несоответствий и делаем из этого правильные выводы.

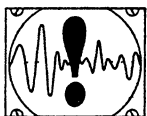


Сегодня после перерыва мы снова возвращаемся к «чисто радиолюбительским» практическим занятиям, и этому есть свои веские причины. На первых пяти занятиях мы достаточно подробно изучили принцип работы электровакуумных приборов, включая группу так называемых приемно-усилительных ламп, познакомились с понятием лампового каскада и даже попробовали самостоятельно рассчитывать один из таких каскадов.

Чтобы все эти знания не остались в дальнейшем смутными воспоминаниями, целесообразно закрепить их путем практического применения. Для этого мы попробуем своими руками смастерить очень простой усилитель низкой частоты к нашему детекторному приемнику, который позволит не только превратить его из еле слышимого в громкоговорящий, но и использовать усилитель для воспроизведения грампластинок или магнитофонных записей от плеера.

Может показаться несвоевременной идея создания лампового УНЧ с весьма посредственными показателями, когда существует множество схем несложных транзисторных усилителей гораздо лучшего качества.

Однако мы в нашей книге твердо придерживаемся основного правила:



Любая выполняемая работа должна быть осмысленной, т. е. необходимо не слепо копировать предлагаемые схемы или конструкции, а ясно и четко представлять себе принцип их работы и сущность всех происходящих в схеме процессов.

Что касается транзисторов, то мы только со следующего занятия начнем знакомство с ними, причем знакомство это будет, пожалуй, более сложным и долгим, чем с радиолампами, поэтому и конструкции с использованием транзисторов у нас еще впереди. А простенький ламповый усилитель нам уже сегодня по плечу. Более того, по замыслу он должен будет органически вписаться в окончательный вариант «нашего» приемника прямого усиления по схеме 2-V-2, в котором два каскада УВЧ будут выполнены на транзисторах, детектор — на полупроводниковом диоде, а двухкаскадный УНЧ — на одной удвоенной радиолампе.

Выбор лампы определяется тремя соображениями:

- 1) минимум баллонов;
- 2) удовлетворительные характеристики усилителя;
- 3) возможность приобретения.

Всем этим требованиям наилучшим образом соответствует комбинированная «пальчиковая» лампа — триод-пентод 6Ф3П. Заключение в одном баллоне триод для каскада предварительного усиления и мощный оконечный пентод специально разрабатывались именно для такого усилителя НЧ и очень широко применялись во многих отечественных ламповых телевизорах, радиоприемниках, магнитофонах.

Последнее обстоятельство решает проблему приобретения как самой лампы, так и выходного трансформатора под нее, поскольку в любой радиоремонтной мастерской или на радиорынке эти детали имеются и по сей день.

Полная принципиальная схема усилителя с указанием номиналов всех деталей и рабочими режимами на электродах лампы приведена на рис. 25, а на рис. 26 показан рисунок печатной платы и расположение на этой плате всех входящих в усилитель деталей.

Не поддавайтесь соблазну полностью копировать предложенный вариант. У нас совсем другая задача: научиться делать подобные вещи самостоятельно. Поэтому не спеша внимательно знакомимся с принципиальной схемой, освежаем в памяти назначение каждой входящей в схему детали.

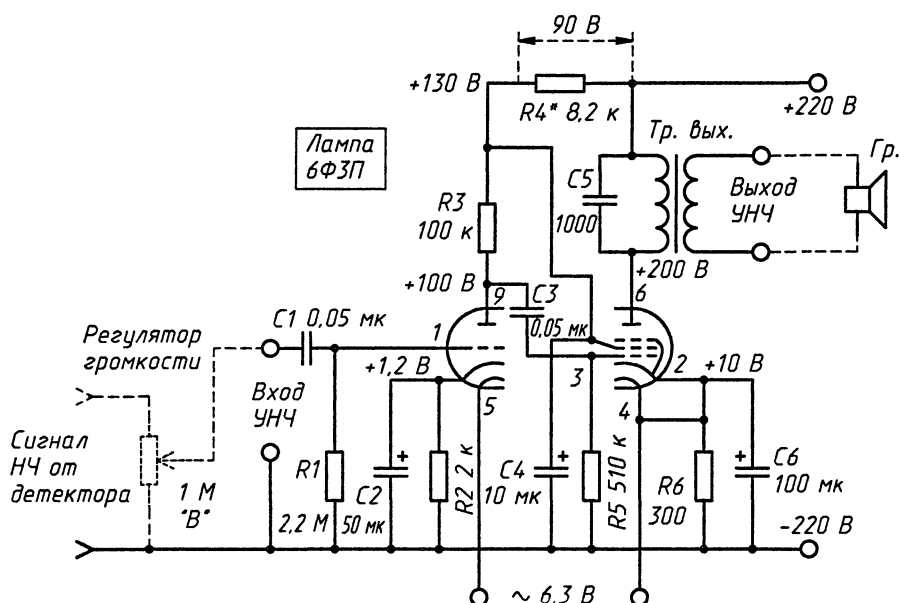


Рис. 25. Принципиальная схема простого лампового УНЧ

После этого обязательно пробуем составить рисунок печатной платы самостоятельно. А еще лучше — несколько разных вариантов и выбираем наилучший.

Исходным, пожалуй, следует считать размер платы по ширине. В данном случае выбрана ширина 70 мм, чтобы плата поместилась на шасси нашего макета, где уже расположена плата детекторного приемника.

Если же в нашем макете шасси имеет другие размеры, то нужно выбрать соответствующий размер и для платы УНЧ.

Длину платы заранее не ограничиваем: она определится сама по мере размещения на ней деталей. Обращаем внимание при этом, что громкоговорителя и регулятора громкости на плате нет: на принципиальной схеме эти две детали показаны пунктиром.

Это объясняется тем, что регулятор громкости будет установлен на шасси самостоятельно, вне платы, а громкоговоритель вообще будет скорее всего в отдельном футляре.

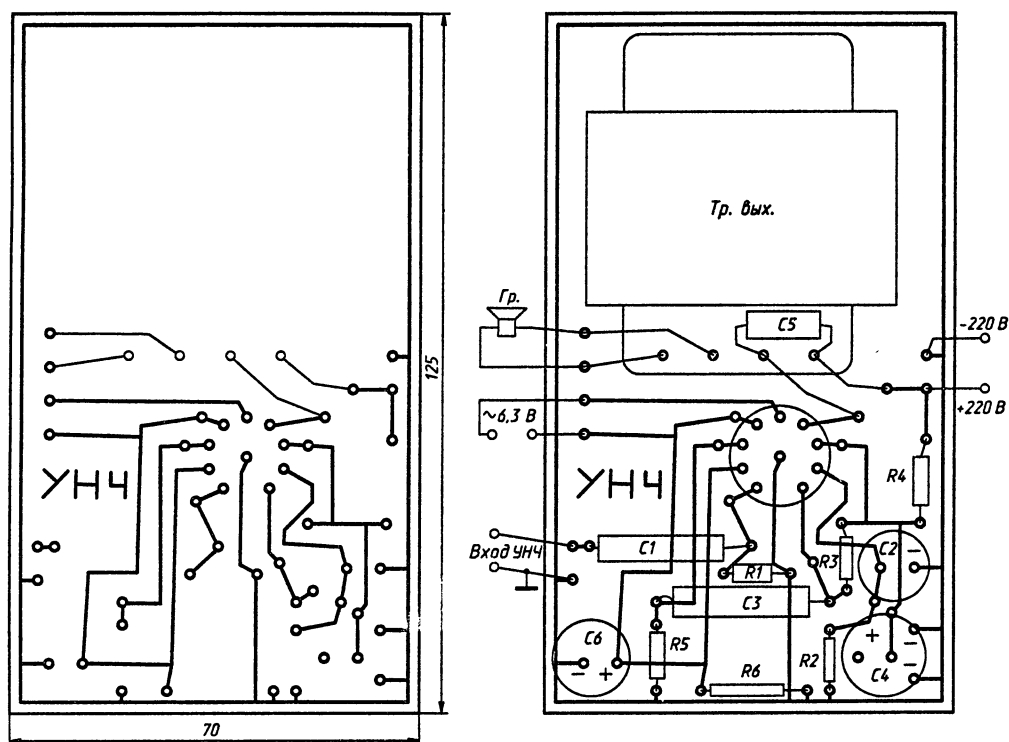


Рис. 26. Рисунок печатной платы усилителя и расположения на плате деталей

Соединение этих деталей с платой осуществляется двойными проводами, для чего на плате предусмотрены отверстия-«пяточки». И если для подключения громкоговорителя длина соединительных проводов большого значения не имеет и может составлять 1–2 м, то между регулятором громкости и соответствующими отверстиями на плате провода должны быть предельно короткими, не более нескольких сантиметров, а при необходимости делать их больше потребуются применять так называемый экранированный провод или отрезок коаксиального кабеля.

Это нужно для того, чтобы избежать «паразитных» наводок на вход усилителя, которые на слух будут восприниматься в виде постороннего низкочастотного фона (гудения).

С этой же целью (для снижения фона от нити накала лампы) питание накала осуществляется от независимой незаземленной шестивольтовой обмотки нашего блока питания, а один из выводов этой обмотки (4-я ножка ламповой панельки) соединен с катодом пентода (2-я ножка), на которой имеется постоянное напряжение «смещения» — порядка +10 В. В дальнейшем мы будем использовать это постоянное напряжение и для питания электродов двух транзисторов в каскадах УВЧ нашего приемника.

Приобретение деталей для усилителя не составит больших проблем. Они могли остаться после разборки старого телевизора или приемника. Это в первую очередь касается ламповой панельки, выходного трансформатора, переменного резистора для регулятора громкости, громкоговорителя. В крайнем случае их можно приобрести на радиорынке или в радиоремонтной мастерской.

Значение большинства деталей — резисторов и конденсаторов — малокритично и допускает относительно большой разброс.

К примеру, величину резистора *R1* можно выбрать любой в пределах от 470 кОм до 3 МОм, конденсаторов *C1* и *C3* — от 0,01 до 0,5 мкФ, конденсатора *C4* — от 10 до 100 мкФ.

Совсем иначе обстоит дело с рабочими напряжениями конденсаторов. И если для *C1*, *C2* и *C6* оно может не превышать 16 В, а для *C5* — 100 В, то конденсаторы *C3* и *C4* должны допускать рабочее напряжение не менее 250 В.

Напряжение источника питания может лежать в пределах 220...250 В, но в зависимости от его величины должен выбираться номинал резистора *R4*. Именно поэтому его обозначение на принципиальной схеме помечено звездочкой. Понимать это надо так, что в процессе регулировки усилителя его окончательная величина должна подбираться опытным путем.

Практически это выглядит так: после включения усилителя в режиме холостого хода (при отсутствии входного сигнала) нужно вольтметром твоего тестера измерить напряжение на экранной сетке пентода (или, что то же самое, — на плюсовом выводе конденсатора *C4*). Оно должно находиться в пределах 130...150 В. Оптимальным следует считать такое напряжение, при котором на катоде пентода (2-я «ножка» лампы) будет 10 В. В этом случае все остальные режимы окажутся автоматически в пределах нормы.

Выбор типа громкоговорителя вообще, говоря довольно строго, связан с نامо-точными данными выходного трансформатора, поскольку коэффициент трансформации однозначно определяет степень согласования полного сопротивления громкоговорителя и сопротивления нагрузки выходного каскада усилителя, от чего, в свою очередь, прямо зависит предельная неискаженная выходная мощность усилителя.

Но в нашем случае задача получения максимального КПД усилителя не ставится. Нам надо своими руками «пощупать» простенькую схему лампового УНЧ, а выходную мощность порядка 1 Вт усилитель обеспечит практически при использовании любого типа громкоговорителя, тем более что вряд ли у нас будет большой выбор.

Скорее всего в нашем распоряжении окажется либо громкоговоритель типа 1ГД-9 (1ГД-18), либо 2ГД-3 или их более поздние модификации.

На этом можно ограничиться по части рекомендаций. Теперь мы уже достаточно подкованы для проведения целой серии самостоятельных экспериментов с усилителем.

# ЗАНЯТИЕ ШЕСТОЕ

## Теория



## Урок 1. ВВЕДЕНИЕ В ПОЛУПРОВОДНИКОВУЮ ТЕХНИКУ

Сегодня мы начинаем знакомство с другой, самой большой и самой современной группой активных радиоэлементов — полупроводниковыми приборами. К ней относятся как отдельные дискретные приборы, называемые транзисторами (или иначе полупроводниковыми триодами), так и целый класс приборов называемых интегральными микросхемами.

И если по своим функциям, выполняемым в любых радиотехнических схемах, транзисторы фактически ничем не отличаются от ламповых триодов, то аналогов микросхемам в ламповой технике нет. Можно, впрочем, сказать, что отдаленными предшественниками микросхем были появившиеся «на закате» ламповой эры компактроны, заключавшие в одном баллоне несколько отдельных ламп и несколько пассивных элементов (как правило, резисторов). Однако такое сравнение не выдерживает критики при количественной оценке.

И если самые первые практические микросхемы имели в своем составе десятки дискретных транзисторов и столько же резисторов, то в современных «обычных» микросхемах их количество измеряется сотнями, а так называемые СБИС (сверхбольшие интегральные микросхемы) и микропроцессоры содержат десятки и сотни тысяч и даже миллионов дискретных транзисторов, резисторов, полупроводниковых диодов и конденсаторов.

Такая сверхвысокая степень интеграции в корне изменила смысл и принцип разделения схемы радиоаппарата на отдельные функциональные блоки. И если еще на предыдущем занятии мы с тобой, составляя функциональную схему супергетеродинного приемника, выделяли в нем такие узлы, как смеситель, гетеродин, УПЧ, детектор, АРУ и УНЧ, то сегодня все эти функции, вместе взятые, выполняет одна микросхема размером с одну таблетку жевательной резинки «Орбит».

Появление новейших микротехнологий выращивания кристаллов полупроводников, их сборки и монтажа в структуре микросхемы создали предпосылки и сделали возможным создание всех современных средств вычислительной техники, а уже на их базе — современных портативных персональных компьютеров и радиоаппаратуры на «цифровой» основе.



Без всякого преувеличения нужно сказать, что создание полупроводниковой техники явилось событием не менее революционным, чем в свое время изобретение радиолампы, положившее начало радиотехники и радиоэлектроники.

Так что же это такое — полупроводники? Ответить на этот вопрос обычным определением типа «полупроводник — это...» невозможно. Для того, чтобы выяснить а главное — уяснить смысл этого слова, нужно очень ясно представить себе физику процессов, происходящих в полупроводнике при его взаимодействии с энергией электрического поля и при протекании через полупроводник электрического тока.

А процессы эти намного сложнее, чем те, с которыми мы сталкивались при изучении физики работы электровакуумных и отчасти газонаполненных приборов. Поэтому изучению транзисторов и микросхем будет посвящено значительно больше внимания.

Физика эта не столь понятна и очевидна, как физика работы лампового диода или триода. И если при изучении работы радиолампы не надо было как-то специально растолковывать, что электрический ток — это направленное движение свободных электронов, то здесь придется поднапрячь все свое воображение, чтобы представить, что электрический ток может быть не только направленным движением электронов, но и направленным движением... дырок, т. е. тех пустых мест пространства, где когда-то находились электроны, а теперь их нет, как, впрочем, нет и ничего другого. Представить себе это не так просто.

И тем не менее теория работы полупроводниковых приборов основывается именно на признании этого факта. Более того, она даже и называется официально: *электронно-дырочная теория*. Вот со знакомства с основами этой теории нам и придется начать.

Самое общее представление о сущности полупроводников могут дать некоторые цифры. Существует у физиков особая единица (сименс/см), которая характеризует электропроводность различных материалов. Не вдаваясь в физическую сущность этой единицы, просто сравним электропроводности проводников, диэлектриков и полупроводников.

Для проводников, к группе которых принадлежат практически все металлы, электропроводность лежит в пределах  $10^4 \dots 10^6$  этих самых единиц. Для диэлектриков она меньше  $10^{-10}$ . А весь интервал от  $10^{-10}$  до  $10^4$  занимают полупроводники. Это огромный диапазон проводимости от «почти проводников» до «почти диэлектриков». Поэтому большинство веществ в природе по параметру электропроводности следует отнести к полупроводникам. Однако лишь немногие из них сегодня используются для производства полупроводниковых приборов, чему есть свои причины, о которых мы еще поговорим позже. Среди этих «избранных» главными являются чистый германий, чистый кремний и некоторые химические соединения, например арсенид галлия (GaAs), антимонид индия (InSb) и ряд других.

В отличие от металлов электрическое сопротивление полупроводников при нагревании не увеличивается, а уменьшается. Кроме того, оно может зависеть от целого ряда внешних факторов: освещенности, ионизирующего излучения, электрического поля. Очень сильно меняют сопротивление химически чистых полупроводников ничтожные, измеряемые иногда даже единицами молекул, посторонние примеси. Этот последний факт как раз очень широко используется при создании полупроводниковых приборов.

Для большинства металлов с хорошей электропроводностью (медь, алюминий, серебро и др.) характерна весьма слабая связь электронов внешней оболочки с атомом, поэтому в теле металла всегда, при любой температуре, имеется мно-

жество так называемых свободных электронов, оторвавшихся от «своих» атомов и хаотично блуждающих между атомами.

Если к такому проводнику приложить электрический потенциал, эти свободные электроны «охотно» и практически беспрепятственно выстраиваются в организованную цепочку, представляющую электрический ток.

В какую сторону этот ток будет направлен? Для свободных электронов это не вопрос. Они всегда устремляются в сторону положительного полюса источника поля. Стоит только поменять полярность источника — электроны тут же меняют направление движения на обратное, поэтому величина проводимости проводников не зависит от направления тока через них.

Точно так же не зависит от полярности приложенного напряжения проводимость диэлектриков: она одинаково плохая (если не сказать — ничтожная) в любом направлении.

Совсем иное дело полупроводники. В зависимости от целого ряда факторов их электропроводность может существенно (иногда в сотни раз) различаться в так называемом прямом и обратном направлениях.

Но главная особенность полупроводников — это наличие у них двух разных видов электропроводности: электронной и дырочной. Явление это настолько непривычное и специфичное, что прежде чем мы вплотную займемся его осмыслением, будет очень полезно вернуться назад и вспомнить, что происходило в разреженной газовой среде. В этой среде под воздействием внешних причин происходила ионизация молекул газа, т. е. от атомов, составляющих молекулу газа, по тем или иным причинам оказывался оторванным один электрон, вследствие чего оставшаяся часть молекулы превращалась в положительно заряженный ион.

И когда к участку с таким разреженным ионизированным газом подключали источник постоянного напряжения, в газовой среде возникали два разных электрических тока: один из них образовывали свободные электроны, направлявшиеся, как и положено, в сторону положительного электрода, а лишившиеся электронов положительные ионы начинали медленно перемещаться в противоположном направлении — в сторону отрицательного электрода.

Почему медленно? Да потому что масса иона во много раз больше массы электрона, а значит, при одной и той же величине потенциала электрического поля скорости их движения будут обратно пропорциональны их массам.

Стало быть, сама возможность существования в одной и той же проводящей среде двух разных по направлению и по скорости перемещений носителей электрических зарядов — явление обычное и широко используемое на практике.

Однако свободное перемещение ионов возможно только в жидкостях и газах. А все полупроводники представляют собой твердые тела, поэтому говорить о перемещении в них ионов не приходится. И тем не менее принято считать, что в теле полупроводника одновременно присутствуют два разных вида носителей заряда — электроны и ...дырки.

Когда съедают бублик, остается... дырка от бублика. Вот точно так же следует понимать, что когда от атома «отрывается» электрон, то в этом месте атома остается «дырка от электрона». А поскольку лишившийся электрона атом становится положительно заряженным, он стремится «поймать» любой пролетающий мимо свободный электрон и вернуть его... на место «удравшего» электрона, т. е. в образовавшуюся «дырку». А это позволяет говорить о том, что дырка обладает единственным положительным зарядом, равным по величине отрицательному заряду электрона.

Но ведь атомы и молекулы в твердом теле не могут свободно перемещаться. А значит, и образовавшиеся дырки, хоть они и положительно заряжены и являются носителями электрического заряда, также не могут никуда перемещаться и образовывать электрический ток!

Вот здесь мы как раз и подошли к наиболее сложному для понимания и усвоения моменту всей электронно-дырочной теории. И чтобы преодолеть этот рубеж, снова обратимся к не раз выручавшему нас методу аналогий.

Представим себе битком набитый зрительный зал на концерте знаменитой поп-звезды. Все до одного кресла в зале заняты, а часть студентов, проникшая в зал без билетов, даже стоит у стены позади последнего ряда.

Но вот сидевшему в первом ряду позвонили по мобильнику и сказали, что угоняют его джип. Он вокакивает с места и сломя голову бежит на улицу. В результате кресло, на котором он сидел, оказывается свободным, или, говоря иначе, в массиве кресел образуется дырка. Но существует она недолго: сидевший позади бедолаги зритель второго ряда, воспользовавшись ситуацией, быстро пересаживается на свободное место в первом ряду, заполняя тем самым образованную дырку.

Правда, при этом одновременно образуется новая дырка — уже во втором ряду. И в эту дырку быстро пересаживается зритель третьего ряда, освобождая новую дырку для зрителя четвертого ряда.

В результате не проходит и двух минут, как зритель последнего ряда пересаживается в дырку предпоследнего ряда, а дырку в последнем ряду тут же занимает безбилетный студент, стоящий у стены.

А теперь представим, что под самым потолком в центре зрительного зала подвешена включенная телекамера. Что она зафиксирует? Это нетрудно сообразить. Поскольку все зрители, если смотреть на них сверху, представляются одинаковыми шариками (так выглядят головы зрителей), камера зафиксирует быстрое последовательное(!) перемещение этих шариков в сторону сцены. Но одновременно она зафиксирует и точно такое же перемещение свободных кресел-дырок в противоположном направлении — от первого ряда к последнему.

Однако парадокс состоит в том, что шарики-электроны действительно перемещаются в пространстве, тогда как движение свободных кресел, зафиксированное телекамерой, только кажущееся, поскольку на самом деле все кресла остаются неподвижными на своих местах.

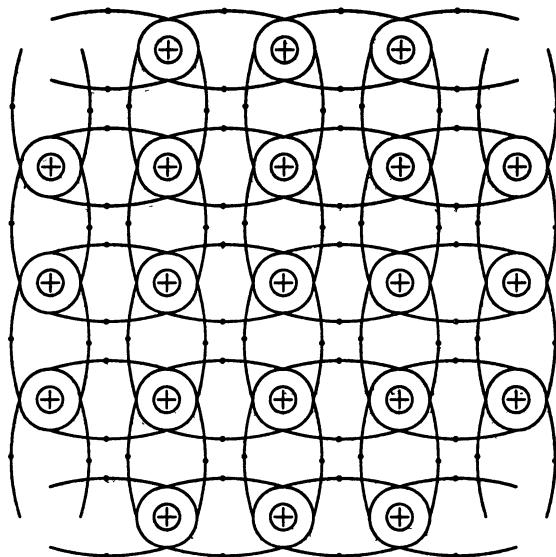


Рис. 27. Схематическое изображение «устройства» кристалла германия

Нечто подобное происходит и в теле полупроводника, к которому приложен электрический потенциал, однако для ясного понимания этого процесса нам понадобится более подробно ознакомиться со строением атома «классического» полупроводника — германия (Ge).

Вокруг ядра атома германия на нескольких орбитах вращаются 32 электрона. 28 из них занимают так называемые внутренние орбиты и ни при каких обстоятельствах не могут «оторваться» от ядра. А на самой последней, наружной орбите, располагаются оставшиеся 4 электрона. Они называются валентными. С их помощью осуществляется взаимосвязь соседних атомов, приводящая к образованию целого кристалла полупроводника.

Эти 4 электрона, относительно слабо удерживаемые притяжением ядра, при достаточно сильном воздействии внешнего источника энергии (электрическое поле, свет, ионизирующее излучение) могут «отрываться» от своей орбиты, становясь на какое-то время свободными и оставляя после себя на орбите как бы положительную дырку.

Атомы в кристалле расположены в строгом порядке: каждый атом с разных сторон окружен четырьмя точно такими же атомами, причем расположены они так близко друг к другу, что электроны наружных оболочек у двух соседних атомов являются общими. Схематически это изображено на рис. 27, а на рис. 28 показана схема образования пары электрон-дырка.

Мы уже знаем, что «просто так», ни с того ни с сего, валентный электрон не станет покидать предназначенную ему орбиту. Чтобы это произошло, нужна какая-то внешняя причина. Будем считать, что такой причиной стал электрический потенциал, который мы «приложили» к небольшому кристаллу чистого германия.

Под действием этого потенциала один из внешних электронов «не выдержал», сорвался с орбиты и умчался к положительному полюсу внешнего источника, оставив в одном из атомов «положительную» дырку. Его примеру захотел последовать другой электрон из соседнего слева атома, однако из этой затеи у него ничего не получилось, поскольку, пролетая над положительно заряженной дыркой первого атома, он оказался захвачен этой дыркой и водворен на орбиту вместо сбежавшего электрона.

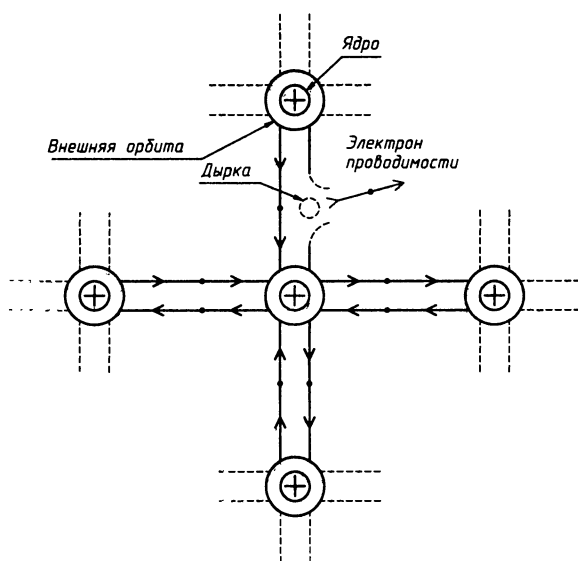


Рис. 28. Образование пары электрон—дырка

Ничего не подозревавший электрон третьего слева атома, покинув свою орбиту, также не долетит до источника внешнего поля, поскольку будет перехвачен дыркой второго атома, и т. д. В результате возникнет картина, которую мы наблюдали в нашем условном концертном зале.

Самый первый «сорвавшийся» электрон в отличие от всех последующих пролетает над целыми атомами, в структуре которых нет дырок, поэтому он не испытывает притяжения с их стороны и беспрепятственно (а следовательно, и очень быстро) достигает положительного полюса внешнего источника. Те же электроны, которые вынуждены последовательно перескакивать из одной дырки в другую, естественно, движутся значительно медленнее, и точно с такой же скоростью, но в направлении отрицательного полюса перемещаются дырки.

В результате в кристалле полупроводника возникают разные виды электропроводимости.

В любом полупроводнике всегда имеется какое-то количество изначально свободных, т. е. не входящих в состав атомов электронов. Именно они создают электронную проводимость. А движущиеся положительно заряженные дырки становятся причиной дырочной проводимости.

В чистом полупроводнике число высвобождающихся в единицу времени электронов равно числу образующихся дырок, однако при комнатной температуре общее их число сравнительно невелико, а потому и электропроводность кристалла низкая. Но картина резко меняется, если к чистому полупроводнику (скажем, тому же германию) добавить даже незначительное количество примеси. Это приводит к резкому увеличению электропроводности, причем характер ее зависит от валентности вводимой примеси. Чтобы разобраться и с этим, придется снова прибегнуть к пояснительным рисункам.

Посмотрим на рис. 29. Он отличается от рис. 28 тем, что в кристалл чистого германия встроена незначительная добавка пентавалентной сурьмы, у атомов которой на внешней оболочке имеется не четыре, как у германия, а пять электронов. А поскольку количество атомов германия несоизмеримо больше, чем атомов сурьмы, каждый атом сурьмы будет окружен четырьмя атомами германия.

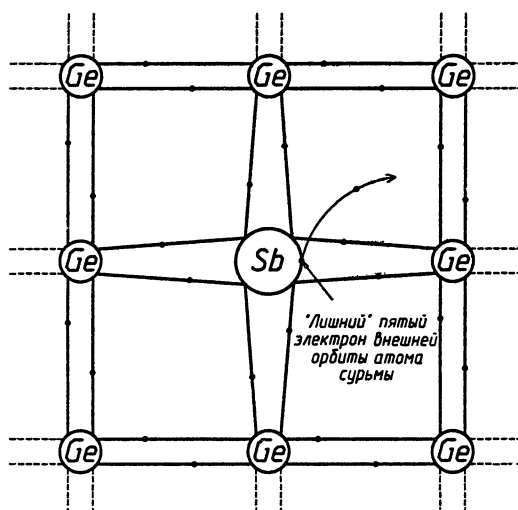


Рис. 29. Участок кристалла германия после введения в его структуру атома сурьмы

Подобная картина показана на рис. 27, и из этого же рисунка видно, что все четыре электрона внешней орбиты всех соседних атомов взаимосвязаны и использованы полностью, т. е. в кристалле чистого германия нет ни свободных (лишних), ни недостающих электронов.

Но эта идиллия резко нарушается с появлением атомов сурьмы. Из пяти электронов ее внешней орбиты четыре по-прежнему будут использоваться для создания связей с четырьмя соседними атомами германия, а пятый, оставшийся неиспользованным электрон окажется лишним и пополнит ряды свободных электронов электронной проводимости.

Число таких «дополнительных» свободных электронов будет в точности равно числу атомов введенной примеси сурьмы. А поскольку появление дополнительных свободных электронов не сопровождается возникновением дырок, в таком «обогащенном сурьмой» кристалле электронная проводимость окажется существенно выше дырочной проводимости.

Так как электроны заряжены отрицательно (от латинского слова *негативно*), что принято обозначать латинской буквой *n*, то и полупроводники с преобладанием электронной проводимости называют полупроводниками *n*-типа.

Если же вместо сурьмы в качестве добавки применить трехвалентный индий (или алюминий), картина поменяется на противоположную (рис. 30). У атома индия просто не хватит электронов внешней оболочки, чтобы образовать связи с четырьмя соседними атомами германия, поэтому один недостающий электрон ему придется «позаимствовать у ближайшего пятого атома германия».

Но при этом неизбежно образуется дырка в том месте, откуда «позаимствован» недостающий электрон. И таких «лишних» дырок, как ты уже догадался, будет ровно столько, сколько атомов индия введено в кристалл германия.

В результате общее число дырок многократно превысит число свободных электронов, что и обусловит преимущественную дырочную проводимость кристалла. По аналогии с кристаллами *n*-типа кристаллы с преимущественно дырочной проводимостью называют кристаллами *p*-типа (от латинского слова *позитив*, т. е. положительный).

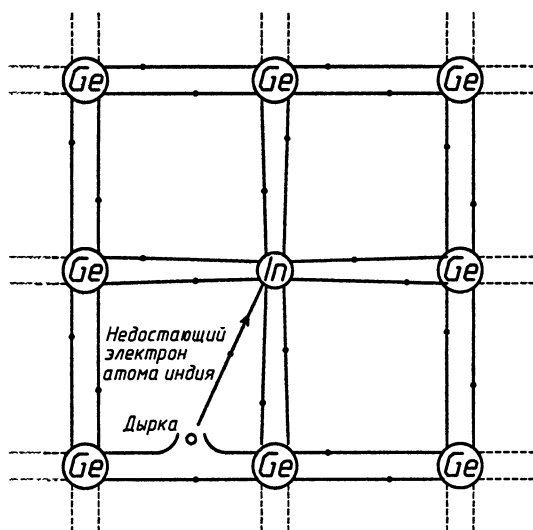


Рис. 30. Участок кристалла германия после введения в его структуру атома индия

Теперь ясно, что в чистом, без примесей, полупроводнике имеет место собственная электропроводность, достаточно низкая, а в полупроводниках с добавлением примесей — примесная проводимость, которая может быть либо электронной, либо дырочной. Впрочем, в любом полупроводнике всегда присутствуют одновременно все виды электропроводимости, только они существенно различаются между собой количественно.

Те носители, которые образуют преимущественный вид проводимости, называются основными носителями, а другие носители — не основными. Нетрудно сообразить, что в полупроводниках  $n$ -типа основными носителями являются электроны, а в полупроводниках  $p$ -типа — дырки.

*Примесные* полупроводники обоих типов обладают гораздо большей электропроводностью, чем *чистые* полупроводники.

Вот теперь, когда мы освоили самые элементарные азы электронно-дырочной теории полупроводников, можно было бы и перейти к рассмотрению принципа работы полупроводниковых приборов. Однако продолжим эту тему на следующих занятиях.

## Урок 2. ЗНАКОМСТВО С ГЕНЕРАТОРАМИ

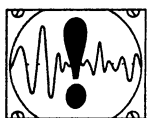
От занятия к занятию мы неуклонно продвигаемся вперед, осваивая все новые и новые понятия. Сегодня наступила очередь знакомства с генераторами, поскольку без этого мы не сможем освоить работу супергетеродина.

Диоды и радиолампы, с которыми мы уже познакомились, занимались тем, что преобразовывали подводимый к ним сигнал: либо его детектировали, либо усиливали. Но в любом случае они работали с подводимым извне сигналом. В отличие от них любой генератор не нуждается в подводимом извне сигнале, поскольку он сам создает электрический сигнал, используя для этого энергию источника постоянного тока.

Вообще, если говорить совсем строго, существуют и генераторы с внешним возбуждением, однако на этом этапе мы их касаться не будем, а поговорим о генераторах с так называемым самовозбуждением.

А чтобы стало понятнее, как возникает такое самовозбуждение, лучше всего вернуться к работе и характеристикам одиночного колебательного контура.

В предыдущей книге на пятом занятии мы сформулировали одно из важнейших положений, которое звучит так:



---

*В идеальном замкнутом колебательном контуре с первоначально введенным запасом электрической энергии возникают собственные незатухающие электромагнитные колебания с периодом «Т».*

---

В идеальном — это значит без каких бы то ни было потерь. А незатухающие — это значит такие, которые, однажды возникнув, будут существовать сколь угодно долго без уменьшения амплитуды.

Однако мы тут же разъяснили, что такие контуры могут существовать только в мечтах, поскольку любой реальный контур всегда и обязательно сам является носителем и источником неизбежных потерь, на которых расходуется какая-то часть

первоначально введенной в контур извне энергии. В результате общее количество первоначально введенной в контур энергии постепенно уменьшается, что приводит к уменьшению амплитуды собственных колебаний контура или, как принято говорить, к затуханию колебаний.

Поскольку устранить внутренние потери в реальном контуре невозможно даже теоретически, возникла другая идея. А что если после первого периода свободных колебаний, в ходе которого первоначальная амплитуда свободного колебания уменьшилась на величину  $\Delta U$ , добавить или, точнее, вернуть в контур эту самую разницу амплитуд второго и первого колебания? Иначе говоря, скомпенсировать возникшую потерю энергии внутри контура за счет какого-либо другого, внешнего источника? И поступать так каждый раз после очередного полного колебания в контуре? Ведь если количественно эта дополнительная порция энергии будет равна  $\Delta U$ , то каждый следующий период окажется по амплитуде снова равным  $U$ , разница в амплитудах любых двух соседних колебаний окажется равна нулю, а колебания станут незатухающими.

Теоретически такое предположение вполне корректно, но вот вопрос: а откуда взять эту дополнительную энергию? Ведь возвращаемый в контур компенсирующий сигнал должен быть в точности таким же, как и собственные колебания в контуре, т. е. совпадать с ним по частоте, фазе и отличаться только меньшей амплитудой.

«Снять» этот сигнал с дополнительного резонансного контура? Но ведь и в любом другом контуре собственные колебания также будут затухающими, а нам нужен источник «подпитки» с незатухающими колебаниями, а если мы хотим поддерживать незатухающие колебания в перестраиваемом по частоте контуре, то и источник компенсирующего сигнала должен точно так же, и притом автоматически, перестраиваться вместе с основным контуром.

Вот тут-то на помощь и пришла радиолампа, самый обычный триод. Как работает любой усилительный каскад? На управляющую сетку лампы подводится любой электрический сигнал в виде переменного напряжения, а на выходе каскада получается точно такой же сигнал, но усиленный во много раз. Он, правда, имеет противоположную фазу относительно входного сигнала, и, кроме того, нам вовсе не нужен усиленный сигнал, а, напротив, совсем маленький, равный  $\Delta U$ .

Но это проблемы уже чисто технические и, как оказалось, легко решаемые. Возьмем самый обычный усилительный каскад на триоде, в анодную цепь которого в качестве сопротивления нагрузки включен резонансный контур. Вернее, не совсем обычный резонансный контур, а высокочастотный трансформатор, первичной обмоткой которого действительно является сам контур, а с его катушкой связана индуктивно дополнительная вторичная обмотка.

Если в контуре возникнут свободные колебания, то точно такие же колебания окажутся и на выходе вторичной обмотки. При этом амплитуду колебаний на вторичной обмотке мы можем получить любую, поскольку она определяется исключительно коэффициентом трансформации, т. е. соотношением витков основной катушки контура и дополнительной вторичной обмотки. Что же касается фазы, то она изменяется на  $180^\circ$  в зависимости от полярности включения вторичной обмотки.

Таким образом, оба условия, необходимые для поддержания в контуре незатухающих колебаний, мы без труда реализовали. Кроме одного, для поддержания в контуре незатухающих колебаний нужно, чтобы свободные колебания в нем уже существовали.

Но тут нам крупно повезло. И не зря же генератор подобного типа называли генератором с самовозбуждением. Оказывается, никакого первоначального сигнала в контур вводить не нужно. Посмотрим на схему рис. 31 и проследим последова-



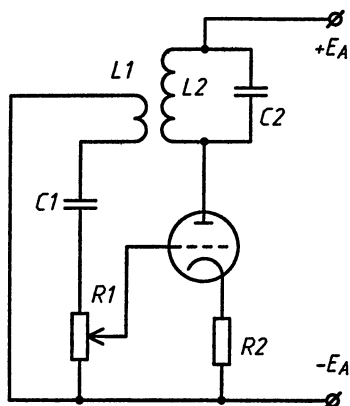


Рис. 31. «Трансформаторная» схема лампового генератора с самовозбуждением (схема Мейснера)

Так возникнет первая фаза собственных колебаний в контуре с неизбежными потерями амплитуды на активном сопротивлении катушки. Но, протекая через катушку индуктивности, разрядный ток конденсатора создаст в катушке связи  $L1$  наведенную ЭДС, фазу которой мы можем по собственному усмотрению сделать совпадающей или противоположной фазе собственных колебаний в контуре, просто поменяв местами выводы катушки  $L1$ .

А амплитуду этой наведенной ЭДС с помощью потенциометра  $R1$  мы можем также произвольно установить любой в интервале от нуля до максимума. И если теперь эту ЭДС подать на сетку триода, то, будучи усиленной им, эта ЭДС вернется в колебательный контур в нужной нам фазе и нужной амплитуды, чтобы полностью скомпенсировать неизбежные потери в контуре. В результате раз возникшее колебание станет незатухающим, а весь каскад превратится в генератор незатухающих колебаний с самовозбуждением.

Остается только добавить, что частота этих колебаний будет однозначно определяться параметрами резонансного контура — индуктивностью катушки и емкостью конденсатора.

Выбирая степень обратной связи (т. е. амплитуду сигнала на сетке лампы) следует помнить, что при слишком малой величине сигнала компенсация потерь в контуре может оказаться недостаточной, и возникшие колебания будут затухающими.

А при большой обратной связи рабочий участок характеристики лампы будет заходить в область верхнего загиба, что неминуемо приведет к искажению формы генерируемых колебаний.

Из сказанного становится ясно, что для получения устойчивых и в то же время неискаженных колебаний величина обратной связи должна быть выбрана оптимальной.

Но что значит оптимальной? Это значит, что она должна отвечать условиям следующего соотношения:

$$K_{oc} = \frac{1}{\mu} + \frac{1}{SR_H},$$

где  $\mu$  и  $S$  — паспортные значения лампы;  $R_H$  — полное сопротивление контура на частоте резонанса.

тельность процессов, происходящих в этой схеме после включения источника анодного напряжения.

К этому моменту конденсатор  $C2$  полностью разряжен, а потому представляет для постоянного тока короткое замыкание. После включения анодного напряжения в анодной цепи потечет ток, естественно, по кратчайшему пути, по цепи наименьшего сопротивления — через короткозамкнутый конденсатор  $C2$ . Протекая через конденсатор, анодный ток начнет заряжать конденсатор, следовательно, на его обкладках начнет возрастать постоянное напряжение.

Через какое-то время конденсатор полностью зарядится, дальнейший рост напряжения на нем прекратится, и он, как и положено конденсатору в резонансном контуре, начнет разряжаться на катушку индуктивности.

В промышленных супергетеродинных приемниках наиболее часто встречаются три схемы отдельных гетеродинов, известные среди специалистов по именам их создателей: схема Мейснера, схема Хартлея и схема Доу.

По физическому принципу их еще называют схемами с трансформаторной обратной связью, с индуктивной «трехточкой» и с емкостной «трехточкой». Каждая из них имеет свои достоинства и недостатки, поэтому выбор той или иной схемы осуществляет конструктор, руководствуясь в каждом конкретном случае определенными соображениями.

В преобразователях с совмещенным гетеродином чаще применяется схема гетеродина «индуктивная трехточка», поскольку она имеет наиболее простую коммутацию при переходе с одного диапазона на другой.

Схема с трансформаторной обратной связью приведена на рис. 31, схема Доу (индуктивной «трехточки») для лампового и полупроводникового триодов — на рис. 32.

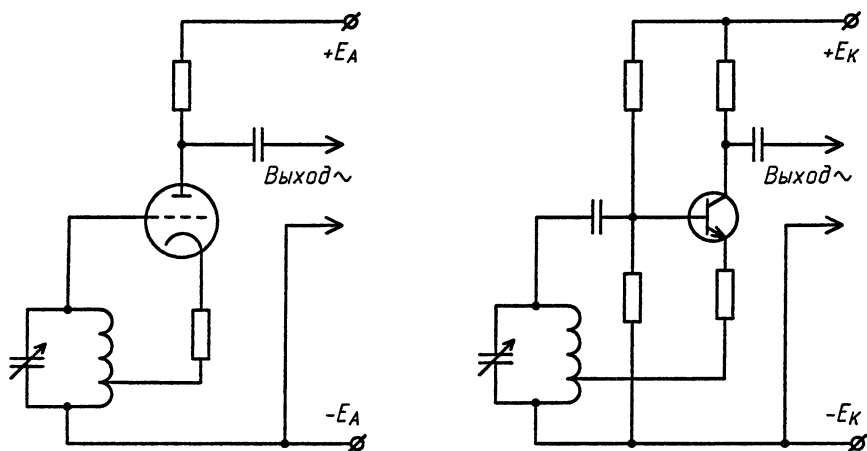


Рис. 32. Генератор с самовозбуждением по схеме «индуктивной трехточки» (схема Доу)

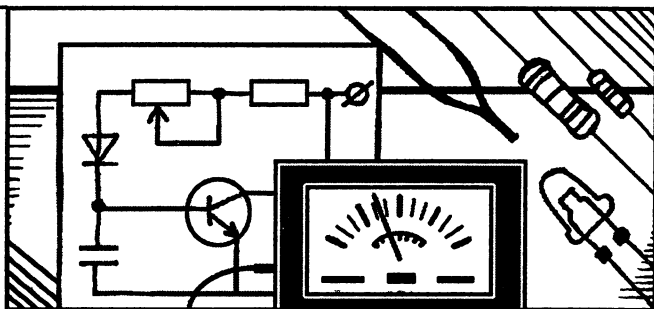
Схема с «емкостной трехточкой» сегодня практически почти не применяется (по крайней мере в радиовещательных приемниках бытового назначения).

Кроме того, надо иметь в виду, что все сказанное относится лишь к схемам на дискретных активных элементах — транзисторах и радиолампах, тогда как в абсолютном большинстве современных радиоприемников каскады УВЧ, смесителя, отдельного гетеродина, а иногда и всего радиотракта, включая УПЧ, детектор сигнала и схему АРУ, выполняются на одной общей микросхеме, поэтому в этом случае говорить об отдельных каскадах не приходится.

Вот, пожалуй, и все, что необходимо знать на данном этапе обучения. На самом деле тема генераторов значительно более обширна и обязательно включает в себя такие понятия, как стабилизация частоты, автоподстройка частоты, термокомпенсация ухода частоты от изменения температуры, а также целый класс генераторов несинусоидальных сигналов — мультивибраторов, блокинг-генераторов и т. п., находящих самое широкое применение в так называемых импульсных схемах — в телевизорах, видеомагнитофонах.

Однако на сегодня мы еще не готовы к их освоению, тем более что эти схемы нам в ближайшее время не понадобятся.

# Практика



На сегодняшнем практическом занятии попробуем поближе познакомиться с простейшим генератором по схеме Мейсснера, причем для этого не потребуется создавать ничего нового: в качестве генератора используем оконечный каскад уже собранного лампового УНЧ по схеме рис. 25. Мы только внесем в его схему совсем незначительные изменения, после которых оконечный каскад УНЧ превратится в генератор звуковой частоты с самовозбуждением, схема которого приведена на рис. 33.

Сравним эту схему со схемой рис. 25. Все изменения сводятся к следующему:

1. Левый (по схеме) конец конденсатора  $C3$  нужно отпаять от вывода анода триода и припаять к нему отрезок изолированного проводника такой длины, чтобы он дотянулся до выводов вторичной обмотки выходного трансформатора.

2. Параллельно выводам вторичной обмотки нужно припаять потенциометр с линейной зависимостью (с заглавной буквой А на крышке корпуса), номинальная величина которого практически не имеет значения и может быть выбрана в широком диапазоне — от 1 до 100 кОм.

3. Средний (подвижный) вывод этого потенциометра нужно заземлить, т. е. соединить его с корпусом (шасси) усилителя.

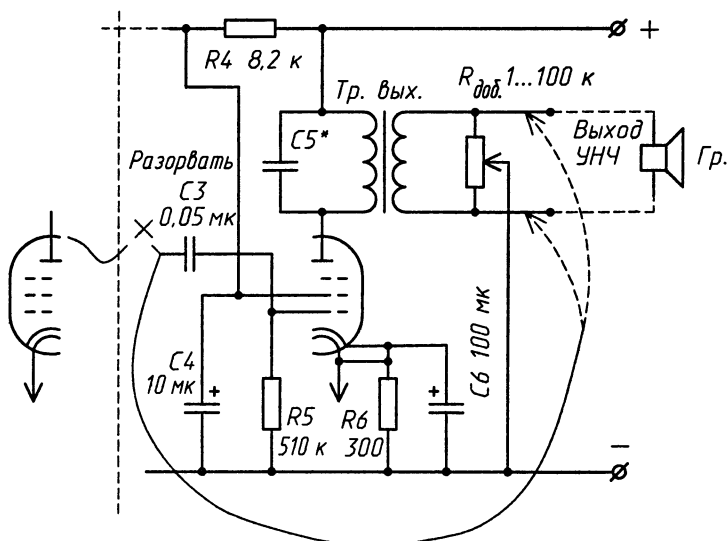


Рис. 33. Генератор звуковой частоты на базе оконечного каскада УНЧ

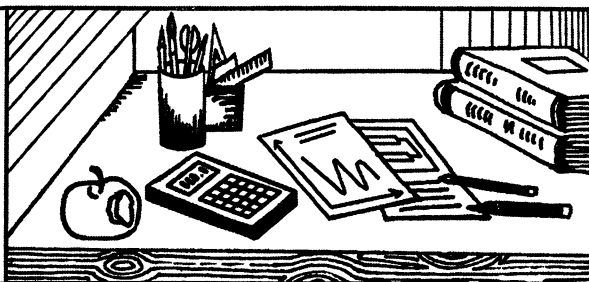
Дальнейшие действия должны осуществляться в такой последовательности:

4. Ось потенциометра установим приблизительно в среднее положение.
5. Включим усилитель и дадим лампе прогреться.
6. Припаянным к выводу конденсатора  $C3$  проводником поочередно прикоснемся к крайним выводам потенциометра  $R_{доб}$ . В одном из двух положений усилитель загенерирует на звуковой частоте («завоеет»).
7. Выключим питание усилителя и припаяем проводник к найденному выводу потенциометра, обеспечивающему самовозбуждение усилителя.
8. Снова включим питание, и как только возникнет генерация, повернем ось потенциометра в одно и в другое крайнее положение. В одном из них генерация прекратится («сорвется»).
9. После этого очень медленно начинаем вращать ось потенциометра в сторону среднего положения. В какой-то момент генерация снова возникнет. Вот это самое положение оси потенциометра и будет соответствовать оптимальному коэффициенту обратной связи.

Теперь наступает самое интересное: исследование работы генератора при изменении величин входящих в него схемных элементов. Однако эту работу надо проделать самостоятельно, без подсказок. Можно лишь намекнуть, что изменение величин практически всех деталей каскада будет приводить к тому или иному изменению частоты собственных колебаний. А к какому именно изменению — это будет видно в процессе экспериментов.

# ЗАНЯТИЕ СЕДЬМОЕ

## Теория



## Урок 1. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДИОДЫ РАЗЛИЧНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Вот теперь мы вплотную подошли к изучению принципов работы полупроводниковых приборов. А чтобы это изучение стало совсем уж простым, подведем некоторые итоги и сделаем важные выводы из того, что мы освоили на первом уроке предыдущего занятия.

1. Чистый четырехвалентный полупроводник с дозированной примесью трех- или пятивалентного элемента превращается в полупроводник с преимущественной (электронной или дырочной) электропроводностью, т. е. в полупроводник  $n$ -типа или в полупроводник  $p$ -типа.

2. Принципиальное различие между этими двумя типами полупроводников состоит в том, что при взаимодействии с приложенным электрическим потенциалом в одном случае внутри тела полупроводника будет наблюдаться преимущественное перемещение отрицательных электронов, а в другом случае — положительных «дырок».

Теперь мысленно проведем очень любопытный и крайне важный эксперимент. Возьмем маленькую квадратную или круглую пластиночку чистого германия и на ее поверхность вплавим совсем малюсенькую капельку расплавленного индия. Технологически это не так уж сложно, поскольку индий легко диффундирует в тело германия, образуя некоторую зону, в которой атомы обоих элементов как бы перемешаны между собой. На рис. 34,а изображена такая конструкция, а на рис. 34,б она же приведена в условно-схематическом представлении.

На предыдущем занятии мы установили, что интенсивное образование пар электрон—дырка происходит в том случае, если каждый атом примесного элемента окружен четырьмя атомами основного полупроводника, т. е. если атомы примеси распространены в теле основного полупроводника равномерно.

В нашем же случае (рис. 34,а) освобождение электронов и образование дырок возможно только в некоторой крайне узкой зоне непосредственного контакта двух полупроводников — в зоне их взаимной диффузии.

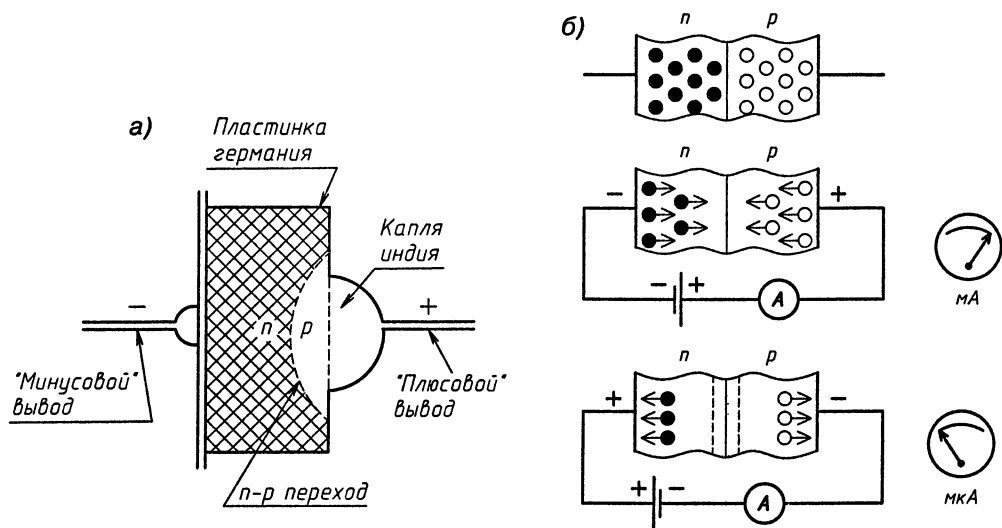


Рис. 34. Плоскостной полупроводниковый диод:

а — конструкция; б — условно-схематическое представление

Что же касается основного «тела» кристалла германия и капли индия, то в них подобного процесса не происходит, их электропроводность остается довольно плохой, и это сводит на нет все специфические особенности работы полупроводникового прибора. Именно поэтому на практике пластину германия стремятся сделать как можно более тонкой (ее толщина измеряется десятками или сотыми долями миллиметров), а каплю индия — предельно маленькой.

А теперь внимательно рассмотрим рис. 34,б. На нем при огромном увеличении показан узкий участок зоны взаимной диффузии обоих полупроводников. Центральная вертикальная линия, делящая эту зону пополам, — это граница непосредственного контакта двух полупроводников.

Если вернемся к рис. 30, то легко сообразим, что слева от этой линии в диффузной зоне будут преобладать электроны, а стало быть, эта часть зоны будет представлять собой полупроводник *n*-типа, а справа от пограничной линии преимущество будет на стороне дырок, т. е. эта часть зоны будет являться полупроводником *p*-типа. Саму же пограничную линию принято называть *p-n* (или *n-p*) переходом. И именно в этой узенькой зоне перехода происходят чудесные вещи, использование которых привело к очередной революции в радиотехнике — созданию многочисленных типов полупроводниковых приборов.

На верхнем из трех рисунков 34,б показано преимущественное размещение свободных электронов и дырок в зоне диффузии при отсутствии электрического потенциала от внешнего источника.

На среднем рисунке внешний источник подключен такой полярностью, которая отражена значками «+» и «-». В этом случае электроны из *n*-участка устремятся к положительному полюсу батареи, образуя во внешней цепи нормальный электрический ток (т. е. поток электронов).

Одновременно из правой части поток дырок устремится к отрицательному полюсу батареи, из которого непрерывно будут поступать недостающие электроны, заполняющие дырки. Иными словами, во внешней цепи никакого движения дырок не будет, а будет протекать нормальный поток электронов: на среднем рисунке слева направо.

Какой величины будет этот ток? Это зависит исключительно от двух факторов: величины приложенного напряжения и электропроводности  $p$ - $n$  перехода (или, что то же самое, — от величины его сопротивления).

А теперь поменяем полярность внешнего источника и посмотрим, что будет происходить в этом случае (нижний рисунок). В новой ситуации направление движения и электронов и дырок поменяется на обратное, т. е. они начнут удаляться друг от друга, оставляя после себя некоторое пространство (заштрихованное на рисунке), где нет ни свободных электронов, ни свободных дырок, а потому НЕэлектропроводное. А это означает, что пограничная зона как бы «размыкает» внешнюю цепь, делая невозможным протекание в ней электрического тока.

Впрочем, наличие, отсутствие или полярность приложенного внешнего напряжения не может повлиять на самопроизвольное непрерывное образование новых пар электрон—дырка в зоне диффузии, поэтому зона перехода в любом случае будет обладать некоторой, хотя и очень незначительной, электропроводностью. Так что и во втором случае во внешней цепи можно наблюдать некоторый ток обратного направления, хотя его величина будет в тысячи раз меньше тока в прямом направлении, что отображено двумя приборами справа от рисунков.

Это ничего не напоминает? Мы вроде бы уже сталкивались с каким-то прибором, который очень хорошо проводил электрический ток в одном направлении и совсем не проводил его в обратном направлении.

Ну конечно же, это был ламповый диод. А значит, можно рассматривать пластинку германия со вплавленной каплей индия как полупроводниковый диод. И совсем неважно, что в отличие от лампового диода в нем нет специального «горячего» источника свободных электродов — катода. Более того, это как раз является огромным преимуществом полупроводникового диода, поскольку для него не требуется дополнительной и бесполезной затраты электроэнергии на подогрев катода.

Приблизительно так, как это показано на рис. 34,а, и устроен практически так называемый плоскостной полупроводниковый диод. Такое название он получил от того, что контактная площадка двух материалов занимает определенную часть плоскости германиевой пластины. С одной стороны, это хорошо. Более того: чем больше эта плоскость, тем большей величины прямой ток выдерживает диод. Это позволяет на плоскостных диодах делать выпрямители, допускающие выпрямленные токи в единицы и даже десятки ампер. С другой стороны, большая площадь контактной площадки и очень малая толщина  $p$ - $n$  перехода делают весьма значительной собственную емкость такого диода, что на практике ограничивает область применения плоскостных диодов диапазоном звуковых частот.

Этого недостатка лишены так называемые точечные диоды, у которых роль второго электрода выполняет не капля расплавленного полупроводника-примеси, а острие остро заточенного проводника. В этом случае площадь, а стало быть, и собственная емкость такого перехода становится ничтожно малой, но одновременно резко снижается предельно допустимая величина тока, проходящего через место контакта.

Поэтому для создания мощных выпрямителей и в цепях звуковой частоты обычно используют плоскостные диоды, а для детектирования высокочастотных (радиочастотных) сигналов используют исключительно точечные диоды.

Мы уже отметили, что в отличие от лампового полупроводниковый диод хотя и крайне незначительно, но все же проводит ток в «обратном» направлении. Он так и называется: обратный ток диода, и его значение является обязательной паспортной величиной, приводимой во всех справочниках. Кроме того, если ты помнишь, собственное внутреннее сопротивление любого полупроводника в отличие от металлов и резисторов с увеличением температуры уменьшается, что приводит

к увеличению обратного тока. Эту особенность всегда следует иметь в виду, поскольку при работе в схемах мощных выпрямителей при токах порядка 20...30 А температура  $p$ - $n$  перехода у диода может приближаться к 100 °С, а величина обратного тока достигать нескольких миллиампер.

И еще одна существенная деталь. При увеличении приложенного к диоду «обратного» (запирающего) напряжения величина обратного тока вначале возрастает очень незначительно, но по достижении некоторого критического значения начинает быстро возрастать даже без дальнейшего увеличения приложенного напряжения, что почти сразу приводит к необратимому пробое диода. Это явление хорошо видно из графика на рис. 35 (левая ветвь характеристики).

Впрочем, существует довольно большая группа диодов особой конструкции, нормальная работа которых происходит как раз на участке  $A$ – $B$  при подаче на них напряжения «обратной» полярности. Из графика видно, что при изменении обратного тока через диод вдвое напряжение на нем почти не меняется, а остается стабильным. Это свойство позволяет использовать такие диоды в качестве стабилизаторов напряжения подобно газонаполненным ламповым стабилизаторам. Такие диоды образуют большую группу стабилитронов.

О стабилитронах имеет смысл поговорить несколько подробнее, поскольку в дальнейшем придется очень часто использовать их в своих конструкциях. Приглядимся к участку  $A$ – $B$  левой ветви вольт-амперной характеристики диода более внимательно. Путем соответствующего подбора процентного содержания примесей и конструкции перехода удастся существенно расширить величину этого участка характеристики, так что этот участок становится таким, как это изображено на рис. 36.

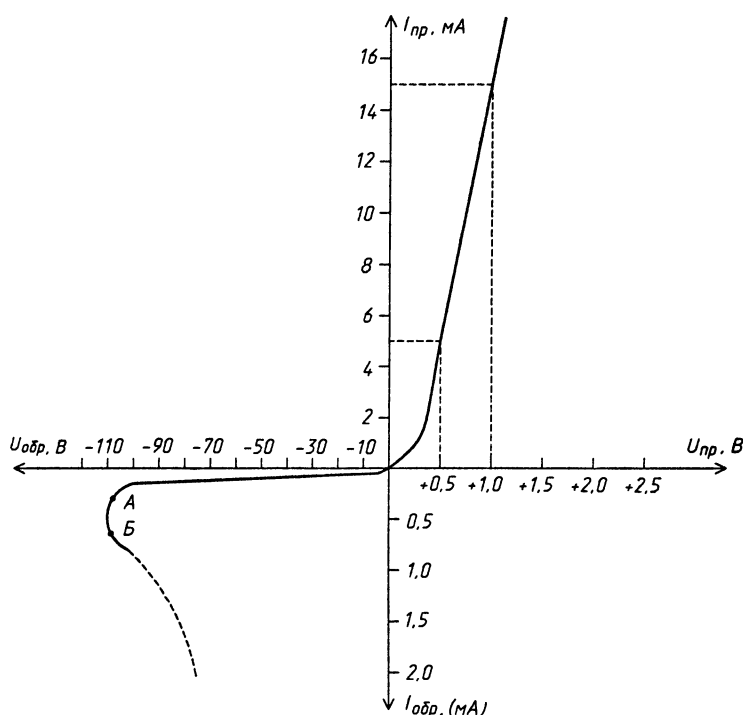


Рис. 35. Вольт-амперная характеристика полупроводникового диода



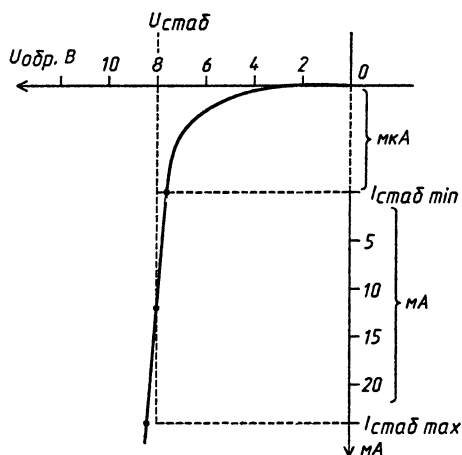


Рис. 36. Вольт-амперная характеристика стабилитрона

Схема на рис. 34,а — самая простая. Величина сопротивления ограничительного резистора выбирается такой, чтобы общий ток в последовательной цепи был равен среднему значению паспортного тока стабилитрона. К примеру, при необходимости получить стабильное напряжение в 9 В от 12-вольтового аккумулятора или выпрямителя и использовании 9-вольтового стабилитрона типа Д814Б, имеющего значения минимального и максимального тока стабилизации соответственно в 3 и 36 мА, расчет величины ограничительного резистора выглядит так:

$$I_{\min} + I_{\max} = 3 + 36 = 39 \text{ мА};$$

$$I_{\text{ср}} = \frac{39}{2} = 19,5 \text{ мА}; \quad R_{\text{огр}} = \frac{U_{\text{ист}} - U_{\text{стаб}}}{I_{\text{ср}}} = \frac{12 - 9}{19,5} = 150 \text{ Ом (округлено)};$$

$$P = I^2 R = 0,02^2 \cdot 150 = 0,06 \text{ Вт}$$

или (даже с учетом необходимости двойного запаса) порядка 0,12 Вт.

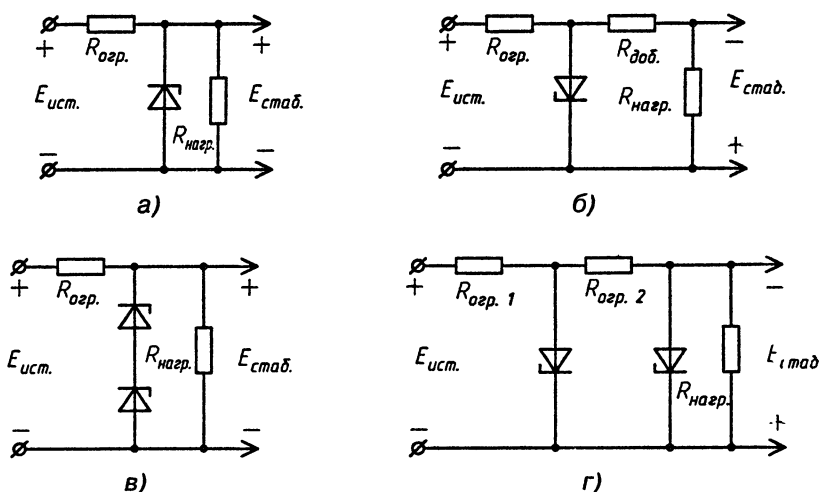


Рис. 37. Типовые схемы включения стабилитронов

Подавляющее большинство современных стабилитронов изготавливают на основе не германия, а кремния: они имеют лучшие температурные характеристики и потому допускают большие значения тока. Это позволяет создавать стабилитроны на напряжения порядка нескольких сотен вольт при достаточно широком диапазоне колебаний напряжения нестабильного источника.

На рис. 37 показаны четыре наиболее распространенные схемы использования полупроводниковых стабилитронов в самых различных радиотехнических устройствах. Заметим, что они очень близки к схемам включения газоразрядных стабилизаторов напряжения, которые мы подробно рассматривали на четвертом занятии.

Очень часто на практике возникает ситуация, когда стабилизатора на точно нужное значение напряжения нет. В этом случае можно использовать стабилизатор на ближайшее большее напряжение стабилизации и параллельно стабилизатору включить обычный резистивный делитель, как это показано на рис. 37,б. В этом случае при расчете величины ограничительного резистора общий ток в цепи надо определять как сумму среднего тока через стабилизатор и тока, потребляемого делителем.

Как и в случае газовых стабилизаторов полупроводниковые стабилизаторы допускают последовательное соединение *однотипных* диодов. В этом случае средний ток стабилизации остается равным среднему току одного стабилизатора, а общее стабилизированное напряжение становится равным сумме стабилизированных напряжений всех последовательно включенных стабилизаторов. Расчет ограничительного резистора в этом случае точно такой же, как и для схемы рис. 37,а.

И, наконец, последняя схема (рис. 37,г) представляет собой так называемый двухступенчатый стабилизатор напряжения. Его суть состоит в том, что второй стабилизатор подключен не непосредственно к источнику нестабильного напряжения, а к «предварительному» стабилизатору на стабилизаторе с большим номинальным напряжением стабилизации.

При таком включении общий коэффициент стабилизации всей схемы равен произведению коэффициентов стабилизации обоих стабилизаторов. Иными словами, если каждый стабилизатор в отдельности уменьшает нестабильность выходного напряжения по отношению к нестабильности напряжения источника в 10 раз, то общая нестабильность на нагрузке уменьшается в  $10 \cdot 10 = 100$  раз.

Общим недостатком любой из четырех приведенных схем являются неизбежные дополнительные потери энергии на самих стабилизаторах и резистивных делителях. Особенно велики эти потери в последней схеме, где они могут оказаться соизмеримыми с полезной потребляемой мощностью самого устройства (например, экономичного «карманного» радиоприемника или плеера). Это обстоятельство необходимо учитывать при решении применить ту или иную схему стабилизации напряжения.

К достоинствам рассмотренных стабилизаторов следует отнести и то, что в силу специфики работы они не только стабилизируют рабочее напряжение по величине, но и очень существенно снижают величину пульсаций на выходе выпрямителя, поскольку такие пульсации воспринимаются схемой как обычные колебания напряжения источника.

Поэтому очень часто (в основном при малых токах нагрузки) отпадает необходимость в использовании конденсатора фильтра большой емкости.

Все схемы со стабилизаторами используют в качестве рабочего участка небольшую часть вольт-амперной характеристики обратного тока на границе зоны пробоя. Именно поэтому их подключают к источнику в обратной полярности, т. е. как бы перевернутыми. Кстати говоря, при «нормальном», прямом включении любой стабилизатор ведет себя как «обычный» диод.

Однако существует довольно большая группа специальных диодов, предназначенных для стабилизации напряжения, которые работают при «правильном», т. е. прямом включении. В отличие от стабилизаторов такие приборы называются «стабисторами». Чтобы понять, как они работают, вернемся к рис. 35 и обратим внимание на правую ветвь характеристики. Из нее видно, что при изменении прямого напряжения всего на 0,5 В ток через диод возрастает от 5 до 15 мА, т. е. в 3 раза. А в специально сконструированных стабисторах это соотношение возрастает весьма существенно, т. е. при меньшем увеличении прямого напряжения прямой ток возрастает еще больше. Схемы включения стабисторов ничем не отличаются от схем со стабилизаторами, за исключением полярности включения диода.

В отличие от ламповых полупроводниковые диоды имеют гораздо более широкий ассортимент не только по разным электрическим параметрам, но и — что гораздо более важно — по областям применения в электронных схемах.

Иллюстрацией к этому может служить простое перечисление целых групп диодов, специально предназначенных для тех или иных схем:

1. Диоды выпрямительные маломощные (на токи до 1 А).
2. Диоды выпрямительные средней мощности (на токи 1...10 А).
3. Диоды выпрямительные мощные (на токи в десятки ампер).
4. Диоды мощные высоковольтные (на ток свыше 30 А при напряжениях до 1500 В).
5. Диоды импульсные.
6. Диоды туннельные усилительные.
7. Диоды туннельные генераторные.
8. Диоды туннельные переключательные.
9. Диоды обращенные переключательные.
10. Стабилитроны.
11. Стабисторы.
12. Варикапы.
13. СВЧ диоды смесительные.
14. СВЧ диоды детекторные.
15. СВЧ диоды параметрические.
16. СВЧ диоды переключательные.
17. СВЧ диоды ограничительные.
18. СВЧ диоды умножительные.
19. СВЧ диоды генераторные.
20. Светодиоды.
21. Фотодиоды.
22. Диоды-индикаторы ионизирующего излучения.

Однако из всего этого многообразия на уровне нашей сегодняшней подготовки тебя могут интересовать, помимо уже рассмотренных выпрямителей и стабилитронов, два вида диодов: варикапы и светодиоды, с которыми мы сейчас и познакомимся поближе.

Когда мы говорили о плоскостных диодах, то отметили в качестве одного из их недостатков наличие довольно большой собственной емкости  $p$ - $n$ -перехода, ограничивающей использование диодов областью звуковых частот.

Однако оказалось, что этот «недостаток» можно очень выгодно использовать на практике в совсем иной области. Более того, конструкторы научились искусственно значительно увеличивать эту емкость. С какой целью? Чтобы ответить на этот вопрос, следует знать, что в процессе экспериментов с диодами выяснилось, что собственная емкость диода не только определяется площадью контакта двух структур и толщиной перехода, но при этом изменяет свою величину в зависимости от величины приложенного внешнего напряжения.

Иначе говоря, изменяя приложенное к диоду постоянное напряжение, можно в некоторых пределах изменять его емкость. А если такой диод подключить к резонансному контуру вместо переменного конденсатора, можно изменять частоту настройки контура с помощью... обыкновенного потенциометра, подключенного к источнику постоянного напряжения.

Так появилась целая группа полупроводниковых диодов под общим названием варикапы, что в дословном переводе обозначает изменяемую емкость. С помощью особых технологий и при использовании определенных полупроводниковых и примесных материалов удалось создать варикапы, емкость которых изменялась в широких пределах как по абсолютной величине, так и по коэффициенту перекрытия

(т. е. по отношению максимальной емкости к минимальной). В качестве примеров можно назвать следующие отечественные варикапы (табл. 4).

Таблица 4

Тип варикапа	Начальная емкость, пФ	Изменение напряжения, В	Коэффициент перекрытия
KB122B	1,9...3,1	3...25	4...6
KB109B	8,0...16	3...25	4...6
KB134A	18...22	1...10	2
KB117A	26...39	3...25	5...7
KB132A	36...38	2...5	3,5
KB119A	168...252	1...10	18
KB127Г	230...320	1...30	20

А всего на сегодня общее число освоенных промышленностью типов варикапов приближается к сотне, что позволяет использовать их в любых радиовещательных аппаратах (в основном приемниках) вместо сложных и дорогостоящих переменных конденсаторов.

На рис. 38 изображена типовая схема включения варикапа в цепь резонансного контура. Здесь последовательно с основным конденсатором контура  $C_1$  включен варикап, емкость которого при изменении приложенного постоянного напряжения изменяется от минимального значения  $C_{\text{мин}}$  до максимального  $C_{\text{макс}}$ . В результате общая суммарная емкость контура изменяется в определенных пределах.

Чтобы установить эти пределы, нужно воспользоваться известными формулами для последовательного соединения емкостей, которые тебе хорошо известны из первой книги:

$$C_{\text{мин контура}} = \frac{C_1 C_{\text{мин}}}{C_1 + C_{\text{мин}}}; \quad C_{\text{макс контура}} = \frac{C_1 C_{\text{макс}}}{C_1 + C_{\text{макс}}}.$$

Закрепим эти сведения числовым примером. Пусть у нас применен варикап типа KB105A с крайними значениями емкости 400 и 600 пФ, а величина емкости конденсатора  $C_1$  составляет 400 пФ. Тогда общая емкость резонансного контура будет изменяться в следующих пределах:

$$C_{\text{мин контура}} = \frac{400 \cdot 400}{400 + 400} = \frac{160000}{800} = 200 \text{ пФ}.$$

Вообще говоря, это вычисление можно и не делать, если вспомнить, что при последовательном соединении двух одинаковых конденсаторов общая емкость уменьшается вдвое.

Ну да ладно, лишнее упражнение нам не повредит. Теперь определим максимальную емкость контура:

$$C_{\text{макс контура}} = \frac{400 \cdot 600}{400 + 600} = \frac{240000}{1000} = 240 \text{ пФ}.$$

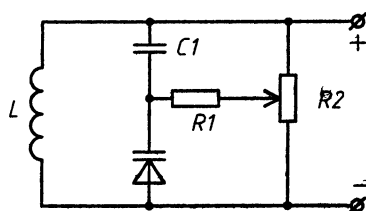


Рис. 38. Типовая схема включения варикапа

Таким образом, регулируя в некоторых пределах с помощью потенциометра *R2* постоянное напряжение, можно без переменного конденсатора изменять собственную емкость резонансного контура в определенных пределах, осуществляя таким образом его перестройку по частоте.

Напрашивается вопрос: а почему нельзя просто подключить варикап параллельно катушке без конденсатора *C1*? Ответ очень простой: в этом случае малое омическое сопротивление катушки попросту замкнет накоротко подводимое к варикапу постоянное напряжение.

А зачем в схеме нужен резистор *R1*? Он нужен для того, чтобы уменьшить шунтирующее влияние цепи постоянного тока (внутреннего сопротивления источника и сопротивления потенциометра) на резонансный контур.

Сравнивая достоинства и недостатки варикапов и переменных конденсаторов, можно утверждать, что использование варикапов безусловно предпочтительней в малогабаритных приемниках, поскольку варикап вместе с регулирующим потенциометром занимают намного меньше места, чем переменный конденсатор (особенно с воздушным диэлектриком).

Варикап в отличие от переменных конденсаторов совершенно не склонен к так называемому микрофонному эффекту. Кроме того, варикап и потенциометр можно располагать в любых местах аппарата независимо друг от друга, тогда как ось переменного конденсатора является неотделимой частью самого конденсатора, что вынуждает применять в аппарате достаточно сложные механические и кинематические системы передач и верньерно-шкальные устройства.

В то же время емкость варикапа, как и любого полупроводникового прибора, существенно зависит от температуры, что сказывается на так называемом уходе частоты контура в процессе работы. Это обстоятельство вынуждает применять в схеме аппарата дополнительные специальные схемы автоподстройки частоты, что в значительной мере «съедает» преимущества варикапной настройки.

Еще одним существенным недостатком варикапов по сравнению с переменными конденсаторами является меньший диапазон перекрытия по емкости. Сравним отношение максимальной и минимальной емкости «воздушного» конденсатора в нашем приемнике с тем же параметром любого варикапа: у воздушного переменного конденсатора это соотношение составляет  $490 : 11 = 45$ , тогда как у большинства варикапов оно не превышает единиц. Исключение составляют, пожалуй, только несколько варикапов с коэффициентом перекрытия равным 20, а такое отношение не обеспечивает нужного перекрытия основных вещательных диапазонов.

Именно поэтому во многих промышленных радиоприемниках, использующих в качестве органов настройки варикапы, средневолновый диапазон разбивается на два смежных поддиапазона, а так называемый обзорный коротковолновый диапазон вообще отсутствует: вместо него присутствуют несколько «растянутых» КВ-диапазонов, для которых необходимое перекрытие по емкости составляет меньше двух.

Еще одну группу полупроводниковых приборов, с которыми мы наверняка будем сталкиваться очень часто, составляют светодиоды. Чтобы понять физику работы светодиодов, придется в самых общих чертах напомнить некоторые положения из физики ядра.

Напомним самое главное, без чего будет непонятно, с чего это вдруг полупроводниковый диод начинает светиться.

Так вот, современной физикой доказано, что электроны в любом атоме не могут обладать произвольными энергиями. Энергия любого электрона может принимать лишь определенные дискретные значения, называемые энергетическими уровнями.

Чем ближе электрон находится к ядру, тем его энергетический уровень меньше. Чтобы удалить электрон с любой орбиты, ему нужно сообщить некую дополнительную энергию, достаточную для преодоления силы притяжения ядра.

Понятно, что такой «удаленный» электрон обладает большей энергией, чем его собратья по общей орбите. И если такой электрон пожелает со временем вернуться в свое место, он эту «лишнюю» энергию обязан вернуть. А вернуть ее он может только в строго определенном количестве, единицей измерения которой является квант (или, другими словами, фотон).

Поэтому перемещение атома с более высокого энергетического уровня на более низкий всегда сопровождается выделением кванта энергии, сопровождающимся видимым или инфракрасным излучением.

Не вдаваясь в подробности и тонкости, скажем, что в полупроводниковых светодиодах при прохождении через них прямого тока в прилегающих к переходу областях происходит интенсивная рекомбинация электронов и дырок. При этом часть освобождающейся энергии выделяется в виде квантов света.

В зависимости от ширины «запрещенной» зоны излучение может быть либо в спектре видимого света, либо инфракрасным. Цвет излучения светодиода зависит от материала полупроводника и может лежать в границах от красного до голубого (включая желтый, оранжевый и зеленый). Конструктивно светодиод устроен так, что световое излучение в области перехода можно видеть через специальное «окно» в его корпусе.

Схема включения светодиода приведена на рис. 39. В паспортах и справочниках для любого светодиода приводятся значения прямого тока и прямого напряжения. Исходя из этих данных определяется величина ограничительного резистора, включаемого последовательно со светодиодом для конкретного источника с данной величиной напряжения. Его расчет не выходит за пределы знания закона Ома.

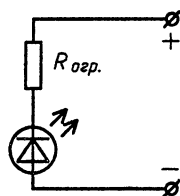


Рис. 39. Типовая схема включения светодиода

Вот, пожалуй, и все, что на сегодня следует знать о полупроводниковых диодах. Следующее занятие мы посвятим знакомству с транзисторами.

## Урок 2. СОСТАВЛЯЕМ ПОЛНУЮ ПРИНЦИПИАЛЬНУЮ СХЕМУ СУПЕРГЕТЕРОДИНА

Как и с чего лучше начать эту работу? Поскольку мы на пятом занятии сумели составить блок-схему такого приемника, то теперь логично эту блок-схему развернуть, раскрыв содержание каждого функционального узла, т. е. воспроизведя каждый узел в виде полной электрической схемы со всеми входящими в эту схему радиоэлементами и электрическими соединениями между ними, при этом каждую такую схему функционального узла надо рассматривать как вполне законченный блок, имеющий входные и выходные клеммы для соединения с соседними функциональными узлами, а также клеммы для соединения с источниками питания.

И когда схемы всех отдельных узлов будут готовы, останется соединить их между собой в соответствии с исходной блок-схемой.

Однако прежде чем начинать составление полной принципиальной схемы, необходимо решить, что будет представлять из себя этот приемник: сколько и каких

диапазонов в нем будет, будет ли он питаться от силовой сети или от батарей, будет ли в нем плавная настройка на всех диапазонах или только несколько «фиксированных» настроек на определенные станции, и т. д.

Ответ на все эти вопросы обычно составляет предмет технического задания на проектирование (или сокращенно — ТЗ). Разумеется, в нашу теперешнюю задачу не входит составление полного ТЗ, поэтому мы ограничимся самыми необходимыми пунктами.

Прежде всего приемник будет ламповым, поскольку с транзисторами мы пока что еще не знакомы. Однако детектор вполне можно выполнить на полупроводниковом диоде, с которым мы уже хорошо познакомились только что: на первом уроке этого занятия.

Питание приемника будем осуществлять от силовой сети с напряжением 220 В, так как приемник будет стационарным, а не переносным или автомобильным.

Что же касается количества диапазонов и способа настройки, то почему бы не сделать приемник всеволновым (а точнее — трехдиапазонным, без диапазона УКВ, поскольку знакомство с принципом частотной модуляции у нас еще впереди). Так что останавливаемся на стандартном наборе: ДВ, СВ и КВ.

В качестве органа настройки выбираем уже хорошо известный нам сдвоенный переменный конденсатор с воздушным диэлектриком, а выбор диапазонов будем осуществлять с помощью так называемого «галетного» переключателя на три положения.

Осталось решить вопрос о том, сколько и каких именно радиоламп нам понадобится. Дело это достаточно ответственное, и для его решения требуется ряд серьезных и довольно сложных математических расчетов.

Со временем будет обязательно освоена и эта премудрость, а на данном этапе придется принять на веру следующие рекомендации, в основе которых лежит стремление ограничиться минимальным количеством отдельных ламп. Преобразователь частоты будем делать по схеме с отдельным гетеродином, однако обе лампы (и смеситель, и гетеродин) будут представлены в одном баллоне комбинированного триод-гептода типа 6И1П «пальчиковой» серии. Эта лампа специально создавалась именно для этих целей и использовалась практически во всех последних моделях ламповых супергетеродинов.

Для усиления промежуточной частоты также существует специальный высокочастотный пентод-варимю типа 6К4П, предусматривающий управление сигналом АРУ (мы с этим набором букв уже сталкивались).

Детектор и сетевой выпрямитель мы решили делать на полупроводниковых диодах, а УНЧ нам изобретать не придется: мы его только что изготовили своими руками по схеме рис. 25 на триод-пентоде типа 6Ф3П.

Вот теперь, пожалуй, можно приступать непосредственно к составлению полной принципиальной схемы.

С чего она начинается? Естественно, с приемной антенны. Так что рисуем на схеме изображение антенны.

Сигнал от антенны идет на входной резонансный контур. Точнее, не на сам контур (чтобы не вносить в него собственную емкость самой антенны), а на индуктивно связанную с контуром катушку связи. А поскольку у нас не один диапазон, а целых три, то и отдельных контуров также будет три, поэтому сигнал от антенны надо подводить к входной секции переключателя диапазонов, с помощью которой мы будем переключать диапазоны. Таким образом, самый первый квадратик на функциональной схеме (см. рис. 24) на полной принципиальной схеме будет выглядеть так, как это изображено на рис. 40. Разберемся с назначением каждой детали, входящей в эту схему.

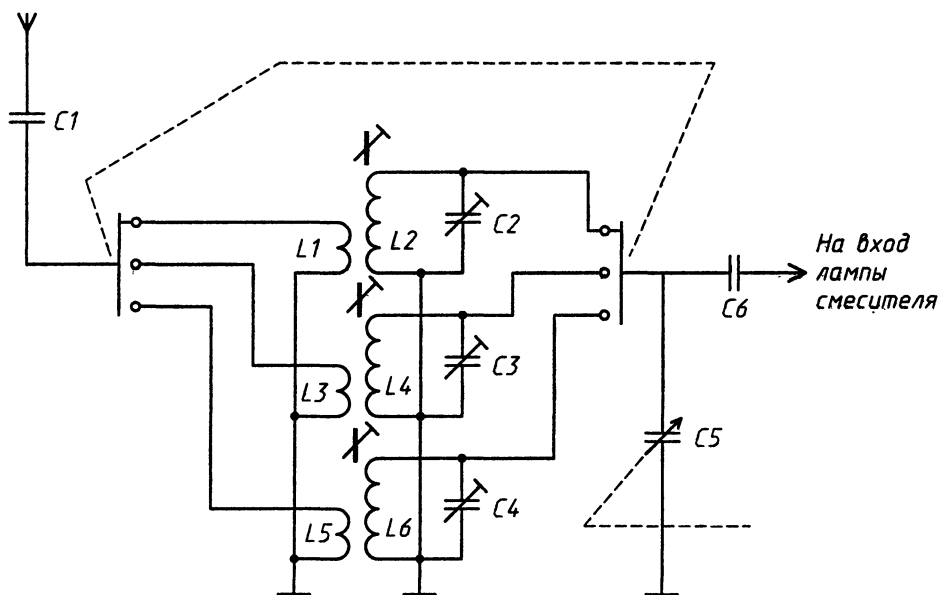


Рис. 40. Принципиальная схема входных цепей супергетеродина

Конденсатор  $C1$  предназначен для уменьшения влияния собственной емкости антенны на общую емкость входного контура. За счет чего это получается? За счет того, что собственная емкость антенны и конденсатор  $C1$  включены последовательно, а емкость двух последовательно соединенных конденсаторов всегда меньше наименьшей из них. А значит, независимо от величины собственной емкости антенны суммарная шунтирующая емкость будет определяться емкостью конденсатора  $C1$ , величину которого мы можем выбрать такой, какая нас устраивает.

Дальше идет переключатель катушек связи входных контуров всех трех диапазонов. Это катушки  $L1$ ,  $L3$  и  $L5$ . Понятно, что в любой момент к антенне может быть подключена только одна из них.

Пунктирная линия, соединяющая две секции переключателя диапазонов, означает, что обе секции связаны механически и могут переключаться только вместе. Иными словами, если к первой секции подключена катушка  $L1$ , как показано на схеме, то ко входу лампы смесителя будет подключена именно связанная с ней катушка  $L2$ , а не  $L4$  или  $L6$ .

К общему выводу второй платы переключателя подключена одна из двух секций переменного конденсатора настройки  $C5$ . При таком включении в любом из трех положений переключателя конденсатор  $C5$  оказывается подключенным параллельно катушке индуктивности одного из диапазонов, образуя с этой катушкой входной резонансный контур.

Помимо этого параллельно каждой из контурных катушек включены полупеременные (подстроечные) конденсаторы небольшой емкости ( $C2$ ,  $C3$  и  $C4$ ), с помощью которых в процессе первичной настройки приемника осуществляется «укладка» (или подгонка) фактического перекрытия диапазона под необходимый. Этой же цели служат и три магнитных сердечника внутри контурных катушек. Сердечниками корректируется частота контура на самом низком краю диапазона, а подстроечными конденсаторами — на самом верхнем.

Оборванная пунктирная линия от оси конденсатора  $C5$  говорит о том, что он соединен механически с другим элементом, на данной схеме не показанным.



Наконец, разделительный конденсатор  $C6$  на выходе схемы предназначен для того, чтобы предотвратить замыкание по постоянному току входа лампы смесителя через омическое сопротивление контурных катушек.

Все легко и просто, а главное — понятно. И оказывается, что ничего страшного в принципиальной схеме, даже самой навороченной, нет, если понятен смысл и назначение каждой входящей в схему детали.

Пойдем дальше и попытаемся таким же образом разобраться с тем, что скрывается за кружочком, помеченным на блок-схеме рис. 24 буквами «Смес.».

Мы уже знаем, что буквы эти обозначают «смеситель», т. е. такое устройство, на котором в супергетеродине происходит смешение входного сигнала и сигнала от местного гетеродина, в результате чего на выходе этого самого смесителя возникает новая «промежуточная» частота.

В нашем приемнике роль такого смесителя выполняет гептодная часть комбинированной лампы 6И1П. На всякий случай напомним, гептодом называют семи-электродную лампу. У нарисованной на схеме лампы помимо катода и анода можно насчитать как раз еще пять электродов — сеток различного назначения.

Зачем так много? В данном случае «рабочими» можно считать только две из них: первую (со стороны катода), на которую подается входной сигнал, и третью, к которой будет подводиться сигнал от гетеродина. Что касается остальных сеток, они в формировании сигнала промежуточной частоты непосредственного участия не принимают, а выполняют вспомогательные функции.

Самая ближняя к аноду сетка является антидинаatronной, ее назначение мы узнали из предыдущих занятий, а две оставшиеся, соединенные вместе, являются экранирующими — с их помощью снижается до минимума паразитная емкостная связь «гетеродинной» сетки как с анодом, так и с входной, «сигнальной» сеткой.

Вот теперь разберемся, что к чему на схеме рис. 41. Входной сигнал от преселектора поступает непосредственно на первую управляющую сетку лампы смесителя (через разделительный конденсатор  $C5$  на схеме рис. 40!). Резистор  $R1$  является сопротивлением «утечки» (с этим понятием ты также знаком). Правда, в отличие от классического варианта включения нижний конец этого резистора не заземлен и не соединен непосредственно с катодом, а через него на сетку заводится управляющий сигнал от схемы АРУ.

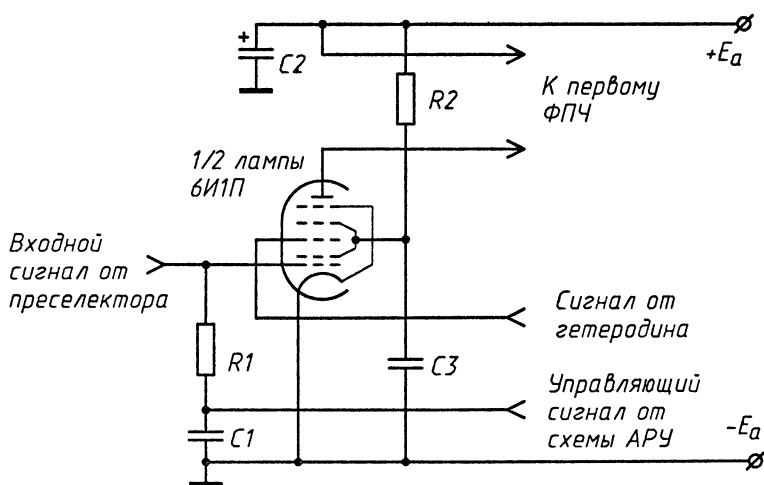


Рис. 41. Принципиальная схема смесительной части преобразователя

Этот сигнал является «побочным продуктом» детектирования модулированного ПЧ-сигнала и представляет собой постоянную составляющую пульсирующего напряжения. Но поскольку переменная составляющая этого пульсирующего напряжения нам в схеме АРУ не нужна, она по дороге к сетке смесителя «заземляется» (отфильтровывается) с помощью конденсатора  $C1$  достаточно большой емкости.

Катод лампы также заземлен, поэтому на сетке лампы нет первоначального смещения, чем обеспечивается необходимая для преобразования нелинейность характеристики смесителя.

С помощью резистора  $R2$  напряжение анодного источника понижается до величины, необходимой для питания экранирующей сетки, а конденсатор  $C3$  (так же, как и  $C1$ ) устраняет ненужную переменную составляющую именно на экранирующей сетке. Кстати говоря, и у конденсатора  $C2$  такое же назначение: устранить паразитную переменную составляющую, но уже в общей цепи питания анодно-экранированных цепей. Все эти три конденсатора принято называть «развязывающими» конденсаторами фильтров в той или иной цепи.

Еще остались не обследованными две стрелочки, идущие «к первому ФПЧ». Вообще говоря, ФПЧ органически входит в состав преобразователя частоты, ибо именно на этом фильтре и происходит выделение промежуточной частоты. Первый ФПЧ в схеме любого супергетеродина является сопротивлением нагрузки лампы или транзистора.

Однако на блок-схемах все резонансные системы (в том числе и любые частотные фильтры) чаще всего выделяют в самостоятельный функциональный узел, как это сделано и на нашей блок-схеме (рис. 24), поэтому принципиальную схему первого ФПЧ можно найти на рис. 43.

Этот ФПЧ, представляющий собой известный тебе полосовой фильтр, помимо основной функции — формирования АЧХ, как бы соединяет между собой каскад смесителя с каскадом УПЧ.

Теперь самое время разобраться со схемой гетеродина, которая изображена на рис. 42.

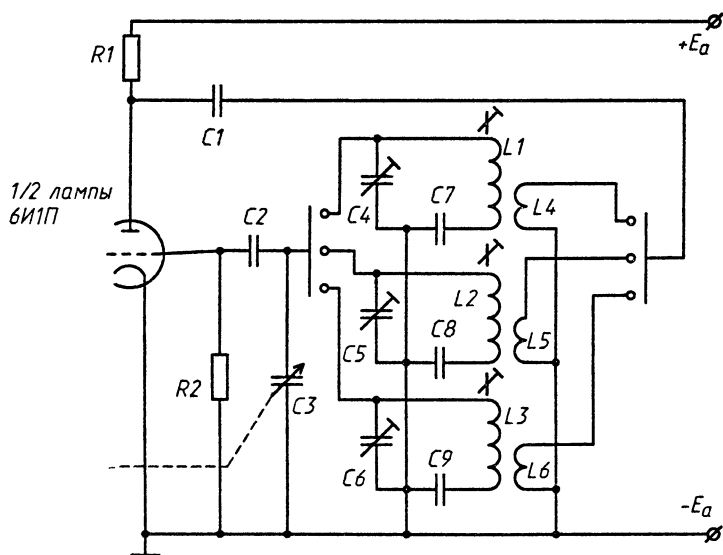


Рис. 42. Принципиальная схема гетеродинной части преобразователя

Здесь дело пойдет быстрее, поскольку основная часть этого рисунка, заключенная между двумя платами переключателя диапазонов, нам хорошо известна, так как почти полностью повторяет схему входных контуров преселектора.

Сравним между собой рис. 40 и 42 и обнаружим всего три различия:

1. Сигнал с контурных катушек преселектора поступает на управляющую сетку лампы смесителя, а сигнал с контурных катушек в схеме гетеродина подается на управляющую сетку лампы гетеродина.

2. Через катушки связи в схеме преселектора на контурные катушки передается сигнал, принятый антенной, а в схеме гетеродина через катушки связи из анодной цепи лампы (через разделительный конденсатор  $C1$ ) подводится сигнал положительной обратной связи, необходимый для самовозбуждения гетеродина.

3. В цепь контурных катушек гетеродина последовательно включены сопрягающие (или иначе — педдинговые) конденсаторы  $C7$ ,  $C8$  и  $C9$ . О том, что значит «сопрягающие» говорилось в предыдущем материале.

Резистор  $R1$  является нагрузкой лампы гетеродина, конденсатор  $C1$  предотвращает попадание постоянной составляющей анодного напряжения на катушки обратной связи, общий конец которых заземлен. Конденсатор  $C2$  и резистор утечки сетки  $R2$  в сочетании образуют так называемый *гридлик*, что переводится с английского именно как *утечка сетки*. Гридлик формирует на сетке гетеродина начальное смещение за счет возникновения сеточного тока.

Сеточный ток возникает только в работающем (генерирующем) каскаде, чем широко пользуются на практике для обнаружения наличия или отсутствия генерации.

Если на сетке есть «минус», значит, схема генерирует, если минуса нет, значит, нет и генерации. Следует только иметь в виду, что для измерения напряжения на сетке необходимо пользоваться высокоомным вольтметром (лучше всего ламповым или транзисторным), иначе сам факт подключения вольтметра может «сорвать» генерацию.

Ну и что у нас осталось? Остался единственный переменный конденсатор настройки  $C3$ , оборванная пунктирная линия от которого означает, что он является составной частью сдвоенного конденсатора настройки, вторая часть которого осталась на рис. 40.

Остался еще один совсем пустяковый вопрос: а откуда снимается полезный сигнал гетеродина, который, если верить рис. 41, должен поступить на вторую управляющую сетку гептодной части лампы 6И1П?

Ответ на этот вопрос может удивить, потому что, вообще говоря, принципиально безразлично, из какой точки схемы гетеродина этот сигнал снимать. Можно снимать его непосредственно с анода, можно прямо с конденсатора  $C3$ , можно непосредственно с управляющей сетки — во всех этих точках сигнал будет различаться только по амплитуде. Естественно, что на аноде он будет во много раз больше, чем, скажем, на сетке. А поскольку нам нужен в принципе не слишком большой сигнал, проще всего соединить между собой вторую управляющую сетку гептода и управляющую сетку триода, и не понадобится никаких дополнительных делителей, согласователей и т. п.

Именно так и поступают на практике в большинстве промышленных приемников с лампой 6И1П в качестве преобразователя частоты.

Мы благополучно добрались до следующего кружочка на блок-схеме, обозначенного буквами УПЧ. УПЧ — это каскад усиления промежуточной частоты, для которого в качестве активного элемента мы остановились на пальчиковом пентодевариию типа 6К4П.



Последним звеном в нашей схеме (не считая уже освоенного УНЧ) является схема детектора, связанная с предыдущим каскадом (УПЧ) вторым фильтром ПЧ. Эта схема изображена на рис. 44. Оба фильтра — и 1-й, и 2-й — абсолютно одинаковы и представляют собой полосовые фильтры с общей полосой пропускания 9 кГц и настроенные на среднее значение промежуточной частоты в диапазоне 450...470 кГц.

Рис. 44. Принципиальная схема 2-го ФПЧ и детектора

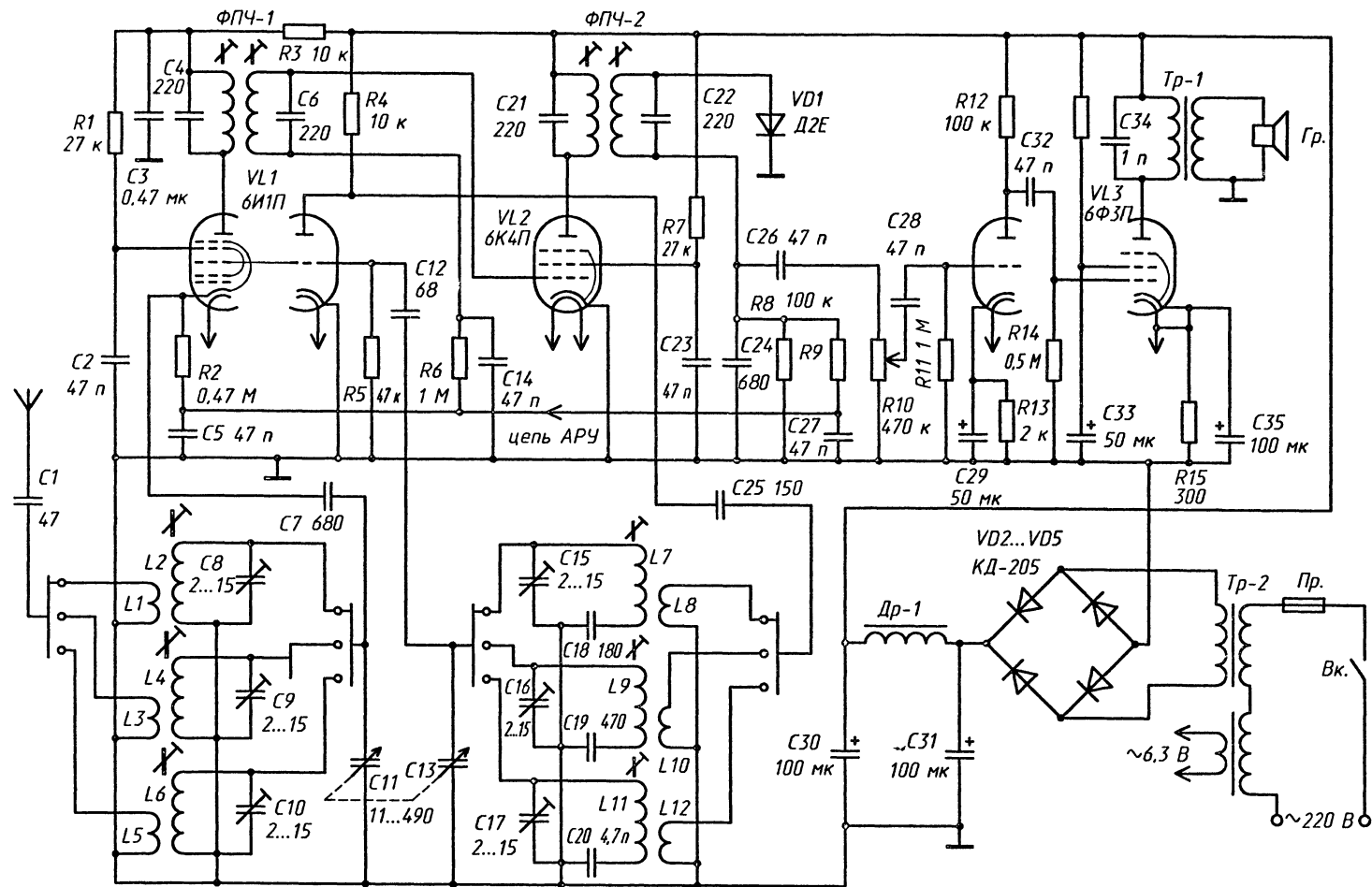


Рис. 45. Полная принципиальная схема супергетеродина

Вторичная (выходная) обмотка 2-го ФПЧ нагружена на обычный однополупериодный диодный детектор, полярность включения которого обеспечивает на резисторе нагрузки ( $R1$ ) постоянную составляющую «минусом» относительно «земли». Такая полярность необходима для нормальной работы системы АРУ.

Конденсатор  $C1$  отфильтровывает остатки (обрезки) высокочастотных синусоид несущей ПЧ. Конденсатор  $C3$  является разделительным между выходом детектора и входом УНЧ.

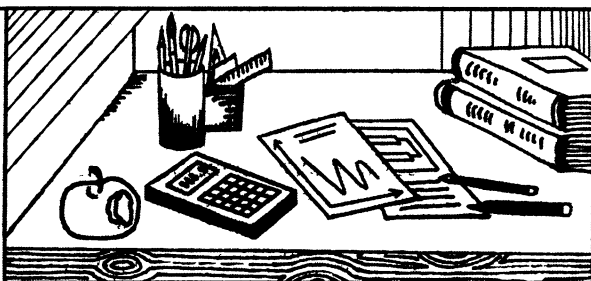
С назначением резистора  $R2$  и конденсатора  $C2$  в цепи управляющего сигнала АРУ мы познакомились уже дважды на протяжении этого урока.

Ну вот и все. Мы самостоятельно составили полную принципиальную схему несложного, но вполне работоспособного лампового супергетеродина, ничуть не хуже промышленных приемников третьего или даже второго класса. И если все эти отдельные кусочки схемы сложить в одну общую, добавив к ней уже изученный нами УНЧ и сетевой выпрямитель по мостовой двухполупериодной схеме на четырех кремниевых выпрямительных диодах, получится полная принципиальная схема, которая приведена на рис. 45 и которую смело можно читать самостоятельно и, главное, вполне осознанно.

Итак, мы взяли очередную вершину на пути к радиолюбительскому совершенству.

# ЗАНЯТИЕ ВОСЬМОЕ

## Теория



### Урок 1. УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП РАБОТЫ ТРАНЗИСТОРА

Сегодняшняя тема едва ли не самая важная, сложная и трудная для понимания, поэтому тебе придется мобилизовать все свое внимание, а также объемно-пространственное воображение, иначе будет очень сложно представить себе физику работы транзистора и механизм усиления им слабых сигналов.

Поэтому вначале мы поставим «телегу впереди лошади» и начнем не с принципа работы транзистора, а с его практического устройства, поскольку в этом случае будет понятнее, что и почему происходит внутри транзистора при его работе в реальной схеме.

Для начала вернемся к рис. 34 (из предыдущего занятия) и освежим в памяти устройство полупроводникового диода. А теперь мысленно включим два диода «навстречу» друг другу таким образом, чтобы соприкасающимися оказались две одинаковые области: или *p*, или *n*. Тогда две другие одноименные области окажутся по краям нового прибора, так, как это изображено на рис. 46.

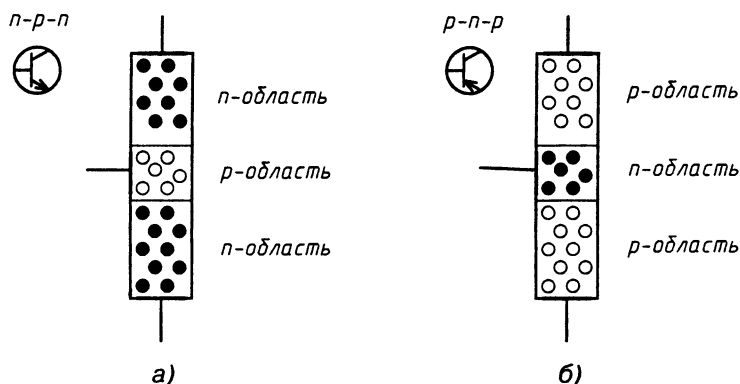


Рис. 46. Условно-схематическое изображение транзисторов «прямой» и «обратной» проводимости

Эти приборы и есть плоскостные транзисторы двух видов проводимости:  $n$ - $p$ - $n$  (рис. 46,а) и  $p$ - $n$ - $p$  (рис. 46,б). Единственное практическое различие между ними состоит только в полярности питающих напряжений, поэтому дальше мы будем рассматривать один из этих двух видов — транзистор типа  $n$ - $p$ - $n$ .

А теперь самое главное, самое существенное, без чего транзисторов просто не могло бы быть. После соединения между собой двух диодов одинаковыми  $p$ -слоями место их стыка можно представить как одну общую  $p$ -зону (или область), как это и изображено на рис. 46,а. Эта общая зона названа базой. Две другие области (обе с проводимостью  $n$ -типа) названы эмиттером и коллектором

Которая из них эмиттер, а которая коллектор? Вот здесь нас поджидает первый сюрприз. Дело в том, что для работы транзистора это не принципиально. Если бы обе  $n$ -зоны были выполнены конструктивно одинаковыми, то транзистор можно было бы с одинаковым успехом подключать к источнику питания как «вниз ногами», так и «вверх ногами». На практике эти две зоны конструктивно выполнены разными. Различие состоит в площади, занимаемой на пластинке базы примесным материалом. Электрод с большей площадью перехода назван коллектором, а с меньшей площадью — эмиттером. Дальше мы еще вернемся к этому различию и выясним, чем оно обусловлено, а пока примем это к сведению.

Вторая наиважнейшая особенность транзистора состоит в толщине базового электрода, т. е. пластинки из кремния или германия, на которую с двух сторон наносятся примесные материалы. Пластина эта очень тоненькая. Как себе представить понятие «очень тоненькая пластинка»? В 1 мм? В 0,5 мм? Или даже в 0,1 мм?

Чтобы мы дальше смогли разговаривать на одном общем языке, вспомним, что за единица измерения — микрон (мкм)? Микрон — это одна тысячная доля миллиметра. Можно ли такую величину представить себе практически? Даже очень легко. К примеру, толщина одного листа обычной писчей бумаги составляет около 70 мкм ( $\pm 10...15$  мкм). А толщина базы в зоне переходов составляет... несколько (!) микрон, т. е. в 10...15 раз ТОНЬШЕ листа писчей бумаги! И вот на эту, с позволения сказать, пластинку с двух сторон (!) нанесены капельки примеси.

Но такого не может быть! На самом деле базовая пластинка имеет толщину в несколько десятков или даже сотен микрон, но в месте переходов в ней при помощи химического фрезерования сделаны два углубления — одно меньшего диаметра, другое — чуть большего.

Примесный элемент в меньшем углублении — это будущий эмиттер транзистора, а в большем — будущий коллектор. Что же касается тоненькой перемычки в базовой пластинке, оставшейся после фрезерования, то ее толщина действительно составляет всего несколько микрон.

Более того: чем тоньше эта перемычка, тем лучше усилительные свойства транзистора. Почему это так? С этим вопросом мы будем сегодня разбираться очень детально.

Вернемся к первому уроку третьего занятия, на котором мы разбирали принцип действия и устройство экранирующей сетки четырехэлектродной лампы — тетрода.

Этот материал необходимо внимательно перечитать, поскольку он поможет в значительной мере упростить понимание процессов, происходящих в зоне переходов транзистора.

И последняя предварительная информация: при изготовлении транзисторов материал базы делают с незначительным количеством примеси с тем расчетом, чтобы в зоне перехода образовывалось умеренное количество пар электрон—дырка, тогда как в смежных с зоной перехода областях напротив, содержалось большое число носителей: свободных электронов в  $n$ -структуре и свободных «дырок» в  $p$ -структуре.



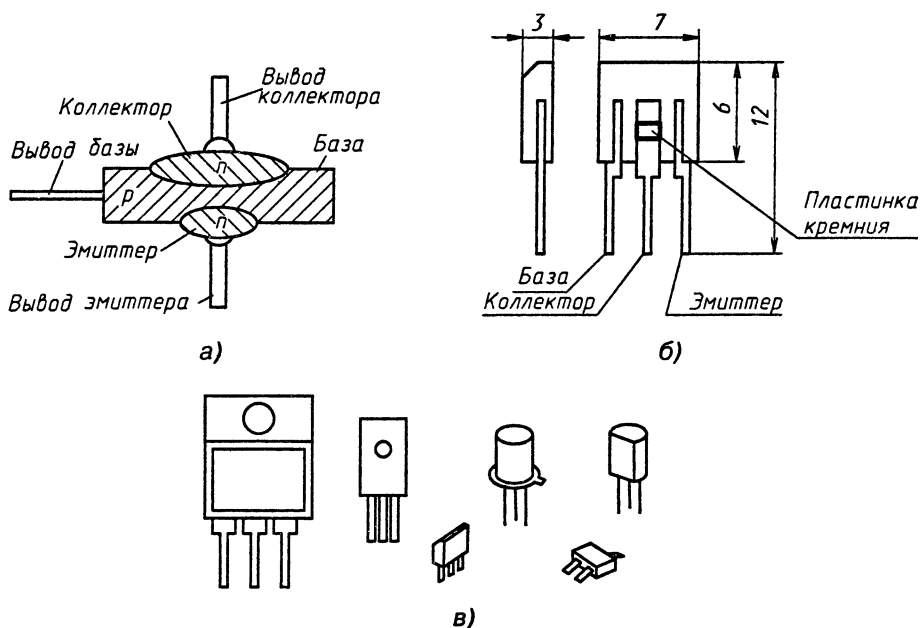


Рис. 47. Современный полупроводниковый триод (транзистор):

- а — конструкция сплавного полупроводникового транзистора в разрезе (сильно увеличено);  
 б — практическая конструкция современного транзистора в пластмассовом корпусе;  
 в — внешний вид современных транзисторов

Вот теперь, держа в уме все сказанное, попробуем разобраться с работой такого уникального прибора, каким является простой и скромный на вид транзистор, схематическое устройство которого, одна из возможных конструкций и несколько вариантов современного внешнего оформления приведены на рис. 47.

Вообще говоря, если быть совсем уж строгим в определениях, существуют транзисторы и с несколькими разными переходами, но мы пока что будем говорить только о простых транзисторах с двумя *p-n*-переходами: между базой и эмиттером и между базой и коллектором. Договоримся так их и называть: *эмиттерный переход* и *коллекторный переход*. В дальнейшем в тексте под этими понятиями мы будем рассматривать все процессы, происходящие на границе между материалом базы и материалом коллектора или эмиттера.

Любой транзистор может работать по меньшей мере в трех разных режимах: в активном режиме, в режиме отсечки (запираания) или в режиме насыщения, получающиеся при разной полярности и величинах питающих напряжений. Мы сегодня будем рассматривать активный режим, при котором напряжение на эмиттерном переходе прямое (проводящее состояние перехода), а на коллекторном переходе — обратное (непроводящее состояние перехода).

Начнем с того, что рассмотрим процессы, происходящие в таком транзисторе в статическом режиме, без нагрузки и при отсутствии полезного сигнала на его входе, когда к электродам транзистора подключены только источники питания: коллекторная и базовая батареи с напряжениями  $E_K$  и  $E_B$ . Полярность их включения такова, что на эмиттерном переходе напряжение прямое, а на коллекторном — обратное (рис. 48).

В этом случае сопротивление эмиттерного перехода маленькое, порядка десятков ом, и для получения тока в цепи эмиттер—база достаточно незначительного напряжения в несколько долей вольта.

Сопротивление коллекторного перехода велико — в тысячи раз больше, поэтому напряжение коллекторного источника намного больше: оно может составлять десятки, а в некоторых случаях и более сотни вольт.

Из рис. 48 видно, что общее напряжение коллекторного источника, приложенное к участку эмиттер—коллектор можно рассматривать как сумму напряжений на участках эмиттер—база и база—коллектор, т. е.

$$U_{\text{ЭК}} = U_{\text{ЭБ}} + U_{\text{БК}}.$$

При работе в активном режиме, когда прямое напряжение на участке эмиттер—база много меньше напряжения эмиттер—коллектор и измеряется долями вольта, вполне допустимо считать напряжения коллектор—база и коллектор—эмиттер приблизительно равными.

Физические процессы, происходящие внутри транзистора, можно в грубом приближении рассматривать так: при увеличении прямого напряжения между базой и эмиттером избыточные электроны из эмиттерной *n*-зоны преодолевают потенциальный барьер эмиттерного перехода и устремляются в *p*-зону базы, где ПРИ ОТСУТСТВИИ напряжения на коллекторе могли бы заполнить избыточные дырки в теле базы и образовать существенный электронный ток во внешней цепи эмиттер—база.

Однако при наличии положительного напряжения на коллекторе происходит совсем иной процесс — электроны эмиттера, прорвавшиеся через эмиттерный переход и диффундировавшие в сверхтонкую «пленку» материала базы, сразу же оказываются под воздействием положительного потенциала коллектора, поле которого во много раз превосходит по величине поле базы. В результате лишь небольшое число «эмиттерных» электронов успевает по дороге заполнить дырки в материале базы. Основная же часть «эмиттерных» электронов проскакивает второй *p*-*n*-переход и вливается в электронный поток уже в составе коллекторного тока.

Таким образом даже незначительный положительный потенциал на базе приводит к весьма значительному увеличению как эмиттерного, так и коллекторного тока. При этом параллельно неизбежно присутствует и прямой ток в цепи эмиттер—база (за счет частичной рекомбинации в теле базы), однако по величине базовый ток во много раз меньше суммарного тока в цепи эмиттер—коллектор.

Процессы, происходящие в цепи экранирующей сетки тетрода, очень схожи с процессами в цепи базы транзистора если не по содержанию, то наверняка по форме.

В результате описанного процесса в цепи источника коллекторного питания устанавливается некий суммарный ток  $i_z$ , представляющий собой сумму коллекторного и базового токов. Притом наглядно видно, что с помощью незначительного тока в цепи базы оказывается можно управлять гораздо более значительным током в цепи эмиттер—коллектор.

Если теперь перейти от статического режима к динамическому, т. е. включить в цепь коллектора резистор нагрузки, а в цепь базы ввести переменную составляющую некоего сигнала, станет очевидной явная аналогия транзистора и лампового триода как активных усилительных элементов.

Сравнивая между собой ламповый и полупроводниковый триоды можно провести довольно много аналогий: анод считать эквивалентом коллектора, катод — двойником эмиттера, а управляющую сетку — аналогом базы. При этом и по внеш-

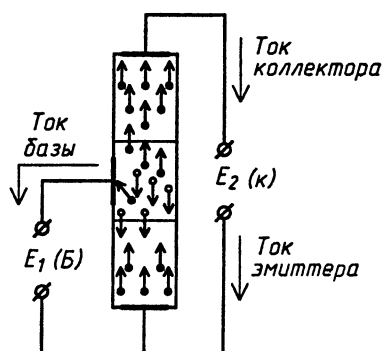


Рис. 48. Иллюстрация к процессам в теле биполярного транзистора при включенных источниках питающих напряжений

ним проявлениям в реальных схемах усилителей и генераторов оба вида триодов имеют много общего. Так, к примеру, трем ламповым схемам включения триода — с общим катодом, с общим анодом и с общей сеткой — полностью соответствуют три схемы включения транзистора: с общим эмиттером, общим коллектором и общей базой.

Также одинаково оба вида триодов «усиливают» подводимый к ним сигнал как по амплитуде, так и по мощности. В обоих случаях сигнал на выходе транзистора при включении по схеме с общим катодом (или эмиттером) имеет фазу, противоположную фазе входного сигнала, а при включении по схемам с общим анодом и общей сеткой (соответственно с общим коллектором и общей базой) — фазы входного и выходного сигнала одинаковы.

Наряду с этим есть и существенные различия, определяющие достоинства и недостатки ламповых и полупроводниковых триодов. Перед тем, как ознакомиться с нижеследующей сравнительной таблицей следует учесть, что это сравнение касается только группы биполярных транзисторов с токовым управлением, с физикой которых мы только что познакомились. Помимо них существует большая группа униполярных (полевых) транзисторов, с которыми мы познакомимся позже и для которых сравнительные показатели будут совсем иными. А теперь приведем сравнения (табл. 5).

Нетрудно видеть, что по большинству потребительских параметров транзисторы существенно превосходят вакуумные лампы с подогревным катодом, хотя на заре появления транзисторов, до возникновения совершенных технологий, все полупроводниковые приборы имели очень существенный недостаток: они хорошо работали только в достаточно узком частотном диапазоне, не выходявшим даже у лучших образцов за пределы средневолнового радиовещательного диапазона.

Таблица 5

СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ДАННЫЕ ЛАМПОВЫХ ТРИОДОВ И БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ

Показатель	Ламповый триод	Биполярный транзистор
Потребление дополнительной энергии цепью подогревателя катода («накал» лампы)	есть	нет
Анодное (коллекторное) напряжение питания	десятки и сотни вольт	от единиц до сотен вольт
Наличие «вредного» сеточного (базового) тока	нет	есть
Входное сопротивление в схеме с общим катодом (общим эмиттером)	высокое (сотни кОм и единицы МОм)	низкое (десятки или сотни Ом)
Внутреннее сопротивление ( $R_i$ )	сотни кОм	единицы кОм
Отношение полезная мощность/габариты	низкое	высокое
Срок службы (долговечность) при гарантированных паспортных условиях эксплуатации	сотни часов	десятки тысяч часов
Склонность к «микрофонному» эффекту	есть	нет
Зависимость всех параметров от величины напряжения накала	сильная	нет
Механическая прочность (применительно к лампам — в стеклянных баллонах)	низкая	высокая
КПД (отношение полезной мощности к потребляемой от источника питания)	низкий	высокий

В этом смысле они не могли конкурировать с радиолампами в аппаратуре на диапазонах УКВ и СВЧ. Сегодня картина резко изменилась, и современные транзисторы, диоды и микросхемы эффективно работают практически на всех диапазонах.

Единственным существенным и, увы, неустранимым недостатком биполярных транзисторов был и остается довольно большой ток базы, обуславливающий низкое входное сопротивление транзисторного усилительного каскада и, как следствие, сильное шунтирование источника сигнала. Этот недостаток сильно затрудняет стыкование транзисторного каскада с резонансными системами высокой добротности.

Именно этот недостаток заставил конструкторов искать пути повышения входного сопротивления, что в итоге привело к появлению транзисторов нового поколения, использующих иной принцип работы. Это так называемые полевые транзисторы. Название полевые отражает тот факт, что управление током через транзистор осуществляется не током в базовой цепи, а электростатическим полем, приложенным ко «входному» электроду транзистора. Этот последний революционный шаг по существу устраняет все остальные недостатки транзисторов по сравнению с радиолампами, которые приводились в сравнительной таблице для биполярных транзисторов.

Полевые транзисторы — это тема особого отдельного разговора, и именно о них мы сейчас и поговорим. Полевые транзисторы, которые еще называют униполярными или канальными, построены по совершенно иному принципу, что наглядно видно уже из рис. 49. В них нет отдельных переходов — эмиттер—база и база—коллектор. Так называемое тело транзистора представляет собой материал полупроводника одной проводимости (в случае, который мы рассматриваем —  $n$ -проводимости) и является проводящим каналом для тока во внешней цепи (откуда и название — канальный транзистор). Чтобы дальше не путаться в терминах, надо запомнить, что у полевых транзисторов три их электрода называются иначе, чем у биполярных. То, что у биполярных транзисторов называется эмиттером, у полевых называется истоком, то, что коллектором, — стоком, а роль базы выполняет затвор. Именно так на нашем рисунке (рис. 49) и обозначены эти электроды.

Из рисунка ясно видно, что единственной проводящей цепью транзистора является канал в теле транзистора, а из этого легко перейти к заключению, что ток во внешней цепи при неизменной величине напряжения источника питания может определяться исключительно величиной внутреннего сопротивления канала. И уж совсем легко догадаться, что в этом случае управлять током через транзистор можно только путем изменения этого внутреннего сопротивления, что на практике и осуществляет управляющий электрод — затвор.

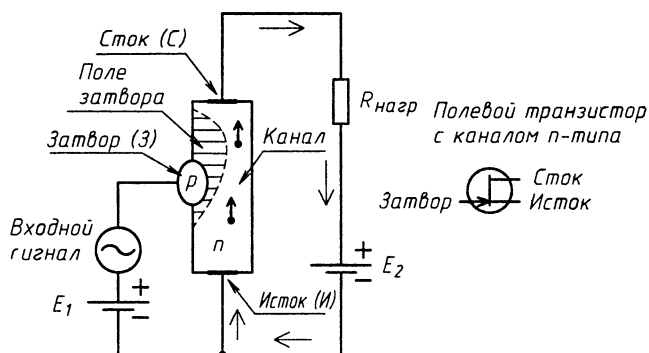


Рис. 49. Схематическое устройство полевого (канального) транзистора

А теперь посмотрим, как устроен и работает полевой транзистор. Пластика из полупроводника имеет на противоположных концах выводы электродов (исток — снизу и сток — сверху). В цепь источника питания со стороны стока включен резистор нагрузки  $R_n$ . Вдоль транзистора, по каналу, протекает ток основных носителей (в нашем случае — электронов).

Входная (управляющая) цепь транзистора (затвор) представляет собой зону с противоположным типом проводимости — в нашем случае с проводимостью  $p$ -типа. Источник питания входной цепи ( $E_1$ ) создает на единственном  $p$ - $n$ -переходе обратное (запирающее) напряжение.

Последовательно с этим источником постоянного напряжения обычно включают и источник переменного напряжения полезного сигнала, чтобы величина суммарного запирающего напряжения определялась только изменением амплитуды входного сигнала. По существу точно так же, как это было в цепи управляющей сетки лампового триода.

Смысл происходящих в полевом транзисторе процессов сводится к следующему: по мере увеличения входного напряжения на затворе запирающий слой  $p$ - $n$ -перехода становится толще, а поперечное сечение проводящего канала — соответственно тоньше, вследствие чего сопротивление канала увеличивается, а значит, ток во внешней цепи уменьшается. При достаточном большом входном напряжении канал будет полностью перекрыт запирающим полем затвора и ток через транзистор прекратится.

Чтобы вся эта замечательная теория оказалась реализованной на практике, потребовалось выполнить несколько условий.

Для эффективного воздействия «запирающего поля» материал основного полупроводника должен быть достаточно высокоомным, с незначительной концентрацией примеси. Но главное — начальная толщина проводящего канала (при нулевом напряжении на затворе) не должна превышать... несколько микрон! Именно этим последним обстоятельством объясняется тот факт, что полевые транзисторы смогли появиться на свет только после усовершенствования промышленно-производственных микротехнологий, позволяющих оперировать с микронными величинами.

Что касается практического устройства или конструкции полевых транзисторов, то они зависят от технологии производства и существенно различаются. Известны следующие виды технологий: сплавная, диффузионная, диффузионно-сплавная, планарная, эпитаксиальная, планарно-эпитаксиальная, МДП (или МОП) технология с изолированным затвором, технология с индуцированным (инверсионным) каналом и ряд др.

Все это, конечно, очень интересно, но гораздо важнее тот факт, что в полевых транзисторах полностью устранены все недостатки биполярных транзисторов (по сравнению с радиолампами), а все достоинства сохранены и даже приумножены.

На одном из очередных занятий мы обязательно вернемся к этой теме и рассмотрим вопросы практического использования как биполярных, так и полевых транзисторов, а сейчас имеет смысл вернуться немного назад и рассмотреть с математической стороны взаимозависимости токов и напряжений у биполярных транзисторов и различные схемы их включения.

Самое первое и, пожалуй, самое существенное отличие в оценке параметров биполярных транзисторов от радиоламп состоит в том, что для ламп при их включении по схеме с общим катодом коэффициент усиления лампы определяется из формулы:

$$\mu = \frac{\Delta U_A}{\Delta U_G} \quad \text{при } I_A = \text{const.}$$

Для биполярного транзистора эта формула неприемлема, поскольку в транзисторе управление коллекторным током осуществляется не за счет приложенного к базе напряжения, а за счет изменения величины базового тока.

Поэтому коэффициент усиления транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером, определяется как отношение приращения коллекторного тока к вызвавшему его приращению тока в цепи базы. В отличие от ламп, этот коэффициент для транзисторов обозначается греческой буквой  $\beta$  (бета) и выглядит так:

$$\beta = \frac{\Delta I_K}{\Delta U_B} \quad \text{при } U_{KЭ} = \text{const.}$$

Однако во многих справочниках вместо этого показателя можно встретить другой коэффициент усиления, обозначаемый греческой буквой  $\alpha$  (альфа), который характеризует усиление транзистора, включенного по схеме «с общей базой». Коэффициент такого каскада меньше единицы, хотя и очень незначительно. Но между этими двумя коэффициентами существует однозначная взаимосвязь, поэтому, зная один из них, легко определить другой, воспользовавшись следующими отношениями:

$$\alpha = \frac{\beta}{1+\beta}, \quad \text{а} \quad \beta = \frac{\alpha}{1-\alpha}.$$

Так, к примеру, транзистор, имеющий в схеме с общей базой коэффициент усиления  $\alpha = 0,98$ , в схеме с общим эмиттером будет иметь коэффициент усиления

$$\beta = \frac{0,98}{1-0,98} = \frac{0,98}{0,02} = 49,$$

а коэффициенту 0,99 будет соответствовать коэффициент 99. Таким образом, чем ближе к единице коэффициент альфа, тем больше коэффициент бета. Очень часто в справочной литературе вместо «бета» применяют термин «статический коэффициент передачи в схеме с общим эмиттером», что по существу одно и то же. Для большинства хороших современных биполярных транзисторов этот коэффициент лежит в пределах от нескольких десятков до нескольких сотен, доходя у некоторых типов до тысячи (например, у транзисторов КТ342В, КТ3102Г и КТ3102Е) и даже до полутора тысяч (2Т3175А).

В этом смысле современные биполярные транзисторы не только не уступают ламповым триодам, но и существенно их превосходят.

В практической радиолюбительской работе наверняка придется использовать разные схемы включения транзисторов, поэтому сейчас рассмотрим каждую из четырех возможных схем. С самой простой и наиболее распространенной мы уже частично знакомы: это схема с общим эмиттером, несколько вариантов которой изображены на рис. 50.

Эта схема почти полностью аналогична схеме на ламповом триоде с общим катодом как по назначению, так и по основным параметрам и зависимостям. Единственное отличие состоит в способе подачи начального смещения. На рис. 50,а,б,в — три таких разных варианта. Первый из них (а) можно назвать классическим. Здесь начальное смещение на базу задается резисторным делителем, обеспечивающим практически независимую от входного сигнала и стабильную величину этого смещения.

Единственный недостаток такого способа — в сильном шунтировании выхода предыдущего каскада или входного сигнала. Объясняется это тем, что для переменной составляющей входного сигнала оба резистора делителя включены параллельно, а следовательно, их общее сопротивление будет меньше сопротивления наименьшего из них.

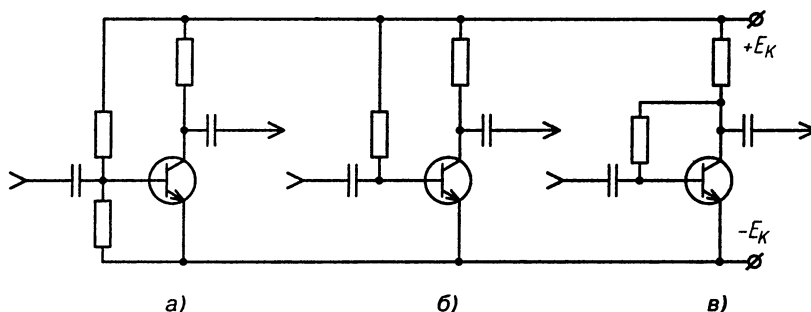


Рис. 50. Способы подачи начального смещения на базу биполярного транзистора:

*а* — с помощью потенциометрического делителя; *б* — с помощью последовательного «гасящего» резистора; *в* — с одновременным охватом каскада отрицательной обратной связью

Такую схему целесообразно применять там, где выходное сопротивление предыдущего каскада или источника сигнала меньше или, по крайней мере, не превышает сопротивления наименьшего из двух резисторов базового делителя.

Вторая схема (*б*) имеет значительно большее входное сопротивление, но в этой схеме величина смещения на базе не остается постоянной, а сильно зависит от изменений тока базы. Эту схему целесообразно использовать в каскадах с малыми изменениями уровня переменной составляющей сигнала, например в «микрофонных» усилителях НЧ или каскадах УВЧ.

Третий вариант отличается от второго тем, что «верхний» (горячий) вывод базового резистора подключен не к источнику коллекторного питания, а непосредственно к выводу коллектора. В этом случае в цепь базы помимо постоянной составляющей тока смещения возвращается и часть усиленной переменной составляющей сигнала, притом в противофазе, что равносильно охватыванию каскада отрицательной обратной связью по напряжению. Такая обратная связь, с одной стороны, несколько снижает общий коэффициент усиления каскада, но с другой стороны, существенно уменьшает нелинейные искажения и частично расширяет диапазон пропускаемых частот за счет уменьшения неравномерности АЧХ.

Этот вариант схемы более всего пригоден для каскадов усиления напряжения в УНЧ в цепях с малыми уровнями полезного сигнала.

Схема, изображенная на рис. 51, называется схемой с общим коллектором или (по аналогии с ламповым катодным повторителем) — эмиттерным повторителем. Слово «повторитель» отражает тот факт, что сигнал на выходе каскада почти полностью повторяет входной сигнал как по амплитуде, так и по фазе. Почти — это означает, что коэффициент передачи каскада по напряжению очень близок к единице.

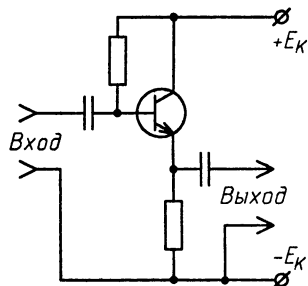


Рис. 51. Включение транзистора по схеме с общим коллектором (ОК)

Но тогда возникает вполне законный вопрос: а зачем нужен такой каскад, если он не изменяет входного сигнала? Вопрос законный, но он не учитывает одного очень важного обстоятельства. У каскада с эмиттерным повторителем входное и выходное сопротивления различаются в десятки, а то и в сотни раз, при этом входное сопротивление повторителя — очень высокое и может достигать значений в сотни килоом (а на полевых транзисторах — десятки мегаом), тогда как выходное сопротивление редко превышает единицы килоом, поэтому эмиттерный повторитель нередко называют «трансформатором сопротивлений».

Основное, если не единственное, назначение эмиттерного повторителя — служить буфером (разделителем) между источником сигнала с большим внутренним сопротивлением или резонансной системой с высокой добротностью и каскадом с малым входным сопротивлением.

Схема на рис. 52 называется схемой с общей базой. В обычной РЭА бытового назначения (приемниках, магнитофонах) она применяется значительно реже, чем две предыдущие, при этом преимущественно во входных цепях и преобразователях частоты на УКВ диапазоне. Такое избирательное применение обусловлено специфическими особенностями самой схемы.

Чуть раньше мы уже упоминали о том, что коэффициент передачи схемы с общей базой чуть меньше единицы и выражается коэффициентом  $\alpha$  (альфа). Для хороших современных транзисторов этот коэффициент может выражаться числами 0,995 и даже больше.

Основные преимущества такой схемы — низкая величина проходной емкости и низкое входное сопротивление — гарантируют стабильность каскада УВЧ даже при полном (не частичном) включении резонансного контура в коллекторную цепь, что особенно важно именно на самых высоких частотах вещательного диапазона (УКВ).

В практических радиоприемных устройствах часто встречается комбинация из двух каскадов: по схеме с общей базой и по схеме с общим эмиттером. Такой тандем получил название каскодная схема. Она органически сочетает в себе достоинства обеих схем, обладая высоким входным сопротивлением, малой проходной емкостью, большим коэффициентом усиления по мощности и высокой стабиль-

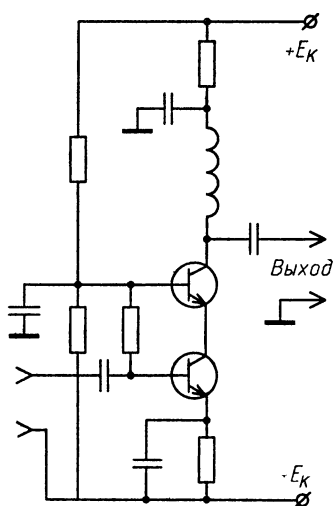


Рис. 53 Каскодная схема включения транзисторов

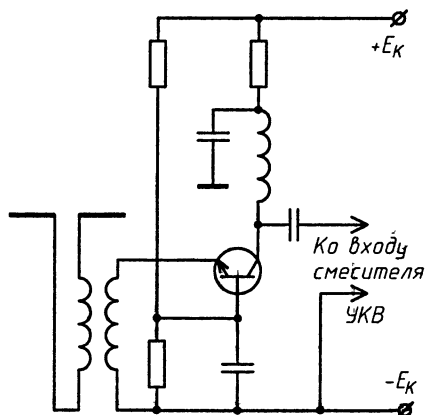


Рис. 52. Включение транзистора по схеме с общей базой (ОБ)

ностью и не «наследует» недостатки каждой из двух схем. На рис. 53 приведена полная типовая схема включения двух транзисторов по каскодной схеме в усилителе высокой частоты.

В большинстве литературных источников обычно ограничиваются рассмотрением трех основных схем включения транзисторов: с общим эмиттером (ОЭ), общим коллектором (ОК) и общей базой (ОБ). Между тем существует еще одна разновидность включения, представляющая собой как бы комбинацию схем ОЭ и ОК. Это схема с так называемыми разделенными нагрузками. Она приведена на рис. 54.

Сущность этой схемы состоит в том, что и в цепь коллектора, и в цепь эмиттера включены два самостоятельных резистора нагрузки. При одинаковой абсолютной величине сопротивления этих резисторов протекающий через них один и тот же общий коллекторный ток создает на них одинаковые по величине падения напряжения, различающиеся между собой фазой.



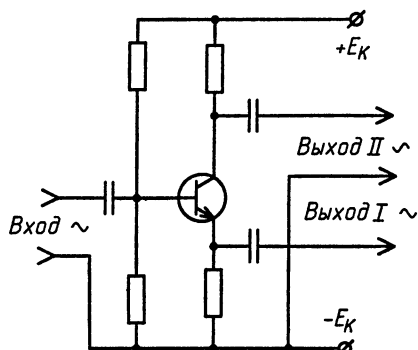


Рис. 54. Типовая схема каскодного УВЧ в реальном приемнике

в эмиттерной цепи должен быть чуть меньше резистора в коллекторной цепи, поскольку ток эмиттера чуть побольше тока коллектора.

Вот на этом, пожалуй, мы сегодня и остановимся.

Сдвиг фазы между ними составляет ровно  $180^\circ$ , что позволяет называть такой каскад фазоинвертором.

Фазоинверторный каскад необходим в тех случаях, когда возникает потребность перехода от одноконтурной схемы усиления к двухконтурной. Чаще всего такая потребность возникает в относительно мощных усилителях низкой частоты (УНЧ).

Оговоримся, что поскольку у любого биполярного транзистора токи коллектора и эмиттера отличаются на величину тока базы, то для получения одинаковых напряжений на двух резисторах нагрузки должны соответственно различаться и величины сопротивлений этих резисторов. Резистор

## Урок 2. ДОСТОИНСТВА И НЕДОСТАТКИ СУПЕРГЕТЕРОДИННОГО МЕТОДА ПРИЕМА

Благополучно разобравшись с принципиальной схемой супергетеродинного приемника, мы заодно пришли к выводу, что супергетеродинный приемник превосходит приемник прямого усиления по всем статьям.

У него и чувствительность можно увеличивать за счет числа каскадов УПЧ, не боясь самовозбуждения и обходясь при этом только удвоенным переменным конденсатором, и избирательность формировать почти идеальную прямоугольную, используя полосовые фильтры или ФСС, и усиление оказывается почти равномерным на всех вещательных диапазонах.

Получается так, что у него вообще нет никаких недостатков? Не будем спешить с выводами, а лучше проведем небольшой мысленный эксперимент. Поставим на столе рядом два приемника — прямого усиления и «супер» (так у радиолюбителей принято называть супергетеродинный приемник). Включим их на один и тот же диапазон (к примеру, на КВ) и настроим на прием одной и той же станции на частоте, скажем, ровно 10 000 кГц.

Оба приемника справились с этой задачей успешно и практически одинаково. Правда, с небольшим различием в самой технике приема. В приемнике прямого усиления этот сигнал после усиления по ВЧ в неизменном виде был подведен к детектору, а в «супере» он был предварительно преобразован в сигнал ПЧ, для чего мы его «смешали» с сигналом местного гетеродина.

Какова в данном случае была частота гетеродина, если промежуточная частота в нашем «супере» выбрана равной 460 кГц? Это не вопрос, это мы уже проходили. Она должна быть либо на 460 кГц выше, либо на 460 кГц ниже частоты принимаемой станции.

А что лучше? В принципе это безразлично — можно и так, и так. Важно лишь, чтобы разница между ними была точно 460 кГц, поэтому частоту гетеродина в данном случае можно выбрать одну из двух:

- 1)  $10\,000 + 460 = 10\,460$  кГц;
- 2)  $10\,000 - 460 = 9\,540$  кГц.

Остановимся на первой. Итак, мы сидим и наслаждаемся музыкой, которая одновременно и одинаково воспроизводится обоими приемниками.

Но вот проходит несколько минут, и вдруг из «супера» на фоне продолжающейся музыки бодрый голос диктора начинает рассказывать нам о том, как и когда лучше всего сажать картошку. Две разные станции работают одновременно на одной и той же волне!

Хотя почему же в этом случае приемник прямого усиления продолжает принимать только одну «музыкальную» станцию без сопровождения лекции о картошке?

Начинаем разбираться, и при этом в конце концов выясняется, что передача о картошке ведется вовсе не на частоте 10 000 кГц, а совсем «в другом месте» — на частоте 10 920 кГц.

Но каким же образом эта «картошка» пролезла в супер? А очень просто. Как мы уже знаем, одиночный входной контур обладает весьма посредственной избирательностью, особенно на коротких волнах, а частоты этих двух станций различаются всего на 10%, поэтому сигнал «картошки» хоть и будет ослаблен, но все же попадет на вход смесителя, при этом если сигнал «картошки» в точке приема будет сильнее музыкального сигнала, то их уровни на входе смесителя вполне могут оказаться если не равными, то, во всяком случае, соизмеримыми.

Больше того: «картофельной» передаче вовсе не обязательно «проникать» ко входу смесителя через входные контуры. Он может использовать в качестве приемной антенны проводники и детали в цепи базы (или управляющей сетки) самого смесителя или гетеродина, или статорные пластины переменного конденсатора и таким путем попасть на нелинейный элемент смесителя.

Дальше мы знаем, что «музыкальный» канал создаст с частотой гетеродина промежуточную частоту, равную  $f_{\text{ПРОМ}} = 10\,460 - 10\,000 = 460$  кГц. А сигнал «картошки»? Посчитаем:

$$f_{\text{ПРОМ}} = 10\,920 - 10\,460 = 460 \text{ кГц!}$$

Как же так: две разные станции создают одну и ту же промежуточную частоту. Каким образом?

Самым естественным образом, потому что промежуточная частота — это разность частот принимаемой станции и собственного гетеродина, а какая из этих двух частот выше, какая ниже — не имеет абсолютно никакого значения, поэтому любой супергетеродин одинаково охотно готов принимать сигналы любых станций, лишь бы их частота отстояла от собственной частоты гетеродина на величину промежуточной частоты. А выше или ниже — «суперу» это все равно.

Если на чистом листе бумаги провести горизонтальную линию, изображающую шкалу частот, поставить посередине точку и обозначить ее как «частота гетеродина», то слева от этой точки на расстоянии, соответствующем 460 кГц, расположится частота основной принимаемой «музыкальной» станции, а справа на точно таком же расстоянии — «картофельной».

Эта вторая «паразитная» станция представляет собой как бы зеркальное отражение основной станции относительно частоты гетеродина, и именно такой термин узаконен среди профессионалов. Принято говорить, что помимо основного канала приема у супергетеродина существует зеркальный канал, избавиться от которого невозможно даже теоретически, потому что, попав на вход смесителя, сигналы

обоих каналов вырабатывают одну и ту же промежуточную частоту, на которой оба сигнала будут дальше усиливаться и детектироваться на равных основаниях.

Так как же все-таки на практике отделить концерт классической музыки от «картофельной шелухи»? Можно без особого труда догадаться, что если уж оба сигнала «добрались» до смесителя, то — никак. Значит, единственный способ — это не допустить сигнал зеркального канала ко входу смесителя. Для этого нужно, чтобы входные цепи преселектора пропускали сигнал принимаемой станции и не пропускали (или очень сильно ослабляли) сигнал от «зеркальной» станции.

Иначе говоря, в супергетеродине в корне поменялось назначение входных цепей. Если в приемнике прямого усиления весь ВЧ-тракт вплоть до детектора был подчинен одной задаче — избавиться от помех со стороны соседних станций, то в «супере» эта задача перепоручена тракту промежуточной частоты, а главной заботой входных цепей становится отстройка от станций, отстоящих от принимаемой по частоте на расстоянии, равном удвоенному значению промежуточной частоты.

Попробуем вычислить, на каком из вещательных диапазонов (ДВ, СВ, КВ или УКВ) это проще обеспечить? А заодно и объяснить — почему?

Но этот недостаток «супера» отнюдь не единственный. Продолжим наш эксперимент, для чего уберем со стола приемник прямого усиления и вместо него поставим рядом второй точно такой же «супер». Вернее, с очень небольшой разницей: если у первого частота гетеродина мы выбрали выше частоты принимаемой станции, то во втором для разнообразия сделаем ее ниже — это безразлично.

Настроим их, как и в первом случае, оба на прием «музыкальной» станции и убедимся, что и тот, и другой ведут себя одинаково. А теперь, не выключая первый приемник, перестроим второй приемник на прием футбольного матча, который транслирует станция на частоте в 920 кГц (это где-то ближе к середине средневолнового диапазона).

Но как только мы приблизимся к этой самой частоте, первый приемник вдруг начнет громко свистеть, не хуже автоинспектора. Только у автоинспектора свисток свистит на одной частоте, а мы можем заставить первый приемник заливаться соловьем на всех частотах звукового диапазона, для чего нам достаточно чуть-чуть вращать ручку настройки второго приемника в районе точной настройки на частоту 920 кГц.

Что же происходит в этом случае? Начнем с вычисления частоты гетеродина второго приемника. Если принимаемая станция работает на частоте 920 кГц, а его промежуточная частота равна 460 кГц, то частота гетеродина второго приемника составит 920 минус 460, тоже 460 кГц!

Ну и что? Разве это запрещено? Нисколько. И притом второй приемник преспокойно транслирует футбольный матч и не собирается свистеть. А свистит как раз первый приемник, который нормально работал и не свистел, пока нам не вздумалось перестроить второй приемник на другую принимаемую станцию.

В чем здесь дело? Отложим на некоторое время дальнейшее чтение и пошевелим мозгами.

Начнем с того, что ответим на простой вопрос: гетеродин — это что такое? Известное дело, гетеродин — это высокочастотный генератор, создающий собственные высокочастотные колебания, т. е. в некотором смысле он прямой родственник генератора несущей любой нормальной радиостанции. И точно так же, как и передатчик радиостанции, гетеродин излучает в пространство немодулированные ВЧ колебания, которые в принципе могут быть приняты любым другим высокочувствительным приемником, особенно если этот второй приемник находится не на расстоянии в сотни километров от первого, а стоит рядом с ним на одном столе, как в нашем случае.

А дальше происходит следующее: на нелинейном элементе смесителя нашего «свистуна» оказывается одновременно целый букет разных сигналов — сигнал принимаемой станции и сигнал собственного гетеродина, которые образуют суммарный и разностный сигналы собственной промежуточной частоты, одну из которых (460 кГц) выделяет 1-й ФПЧ, а также принятый из эфира сигнал гетеродина второго приемника.

Эта вторая принятая частота на нелинейном элементе смесителя вместе с собственной промежуточной частотой будет, в свою очередь, образовывать совершенно новый сигнал, равный разности их частот.

Но ведь в нашем случае обе эти частоты равны и составляют 460 кГц, а значит, их разность равна нулю! И никакого нового сигнала не появляется.

Совершенно верно. Но только при абсолютно точной (с точностью до нуля герц) настройке второго приемника на станцию с частотой 920 кГц. А что будет, если мы чуть-чуть, всего на 1 кГц, расстроим второй приемник? Скажем, настроим его на частоту 919 или 921 кГц? Тогда и частота гетеродина этого приемника автоматически изменится и станет равной 459 или 461 кГц.

И тогда паразитные биения в нашем «музыкальном» приемнике станут не равны нулю, а составят 1 кГц, т. е. попадут в самый что ни на есть звуковой диапазон. И поскольку смеситель является нелинейным элементом для любых сигналов, эта вновь возникшая звуковая частота промодулирует собственную промежуточную частоту приемника и «верхом» на ней благополучно доберется до детектора, где превратится в полноценный низкочастотный сигнал в виде свиста на частоте 1 кГц.

Ну, а если расстройка «футбольного» приемника составит не 1, а 2 или 4 кГц, что тогда? Тогда и высота тона свиста соответственно изменится с 1 кГц до двух или четырех.

Так что если вдруг нормально принимающий «супер» ни с того ни с сего начнет «насвистывать», можно быть уверенным, что это сосед за стеной (или в соседнем доме) ищет в своем «супере» какую-нибудь интересную передачу.

Устранить такую возможность можно лишь двумя путями. Первый путь — это жесткое ограничение с помощью закона допустимого уровня излучения собственного гетеродина в любом (промышленном или любительском) приемнике. И второй путь — максимально возможное снижение принимающей способности твоего собственного приемника на частоте 460 кГц.

Это, в свою очередь, возможно двумя способами: максимально тщательной экранировкой всех узлов, деталей и прочих цепей до входа смесителя, включая все элементы схемы самого гетеродина, а также включением в цепь антенны последовательного режекторного фильтра (его обычно называют фильтр-пробка), настроенного на промежуточную частоту и препятствующего проникновению сигнала ПЧ как из приемника в антенну, так и из антенны в приемник.

На рис. 55 показана одна из возможных схем фильтра-пробки, используемая в промышленных супергетеродинах. Эта схема при точном расчете и правильном выборе входящих в нее элементов дает практически полное подавление сигнала с промежуточной частотой.

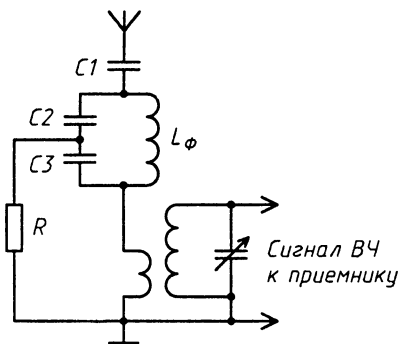


Рис. 55. Схема включения транзистора с разделенными нагрузками

Расчет элементов схемы ведется в таком порядке:

1. Емкости конденсаторов  $C2$  и  $C3$  выбираем произвольно и одинаковыми в районе 500 пФ.

2. Определяем величину индуктивности катушки  $L$  по формуле

$$L = \frac{25300}{(Cf_{\text{ПРОМ}})/2}.$$

3. Исходя из реально возможной добротности катушки фильтра, определяем величину резистора  $R$

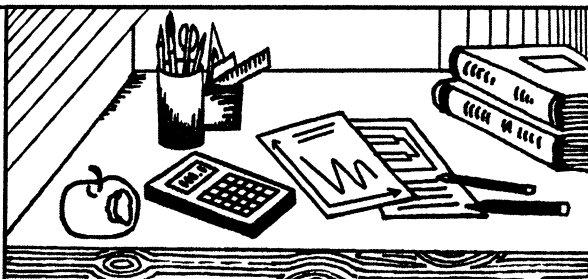
$$R = \frac{Q}{12,5Cf_{\text{ПРОМ}}}.$$

Таким образом, теперь мы видим, что и приемникам прямого усиления, и супергетеродинам свойственны как свои достоинства, так и свои недостатки. И изменять тот или другой тип следует исходя из реальных условий приема и поставленных задач. Так, для фиксированного приема трех-четырех мощных местных станций на ДВ и СВ диапазонах безусловно целесообразно делать приемник прямого усиления с двумя или даже тремя каскадами УВЧ, тогда как всеволновый многодиапазонный приемник с высокой чувствительностью и плавной настройкой, конечно же, должен быть супергетеродинным.

На этом закончим и — до следующей встречи!

# ЗАНЯТИЕ ДЕВЯТОЕ

## Теория



## Урок 1. ПРАКТИЧЕСКИЕ СХЕМЫ НА ТРАНЗИСТОРАХ

Теперь, когда мы уже достаточно «подкованы» и не пугаемся слов коллектор, эмиттер, база, сток, исток, затвор, каскодная схема, эмиттерный повторитель и т. п., самое время от чистой теории перейти к чистой практике и познакомиться с некоторыми реальными схемами различных узлов БРА на транзисторах.

По существу, разница между «транзисторными» схемами и схемами «ламповыми» не так уж и велика и определяется скорее разницей в параметрах ламп и транзисторов да особенностями задания начального смещения на управляющий электрод.

Ну и, разумеется, в параметрах источников питания. Если для большинства ламповых схем требовалось постоянное напряжение в сотни вольт (но при токах, не превышающих десятков миллиампер), то транзисторные схемы вполне довольствуются постоянными напряжениями, «типичный» диапазон которых лежит в пределах 6...25 В. А некоторые наиболее экономичные схемы-скраги умудряются обходиться одной батарейкой с напряжением в 1,5 В, питая при этом целый супергетеродинный приемник или аудиоплейер.

Правда, при этом отдельные транзисторные схемы (например, стереоусилитель с выходной мощностью 2×25 Вт) умудряются переваривать постоянный ток до десятка ампер! Если, конечно, конструктор не забыл укрепить эти мощные выходные транзисторы на специальные массивные теплоотводящие радиаторы, поскольку 25 В, умноженные даже всего на 2 А,— это как-никак 50 Вт(!) мощности, которых тебе лично вполне хватает для того, чтобы разогреть твой паяльник до температуры плавления припоя.

Что же касается термина «реальные схемы» на транзисторах, то я бы лично заменил его на термин « типовые схемы », и вот почему. В ламповой технике в распоряжении конструктора целый набор разных по конструкции, назначению и параметрам ламп, начиная от двухэлектродных диодов до девятиэлектродных нонодов,— всякие там тетроды, пентоды, гептоды, пентагриды и т. п.

Естественно, что для каждого из этих типов должна существовать своя собственная « типовая » схема включения, различающаяся в разных аппаратах лишь

в незначительных деталях. А единой «типовой» схемы для односеточного триода и пентодного гептода просто не может быть в принципе.

Что касается транзисторов (как биполярных, так и полевых), то основная их масса, если смотреть на них с «ламповой» колокольни, — это самые обыкновенные примитивные триоды, даже если управляющая сетка у них называется базой или затвором, — сути дела это не меняет. А раз так, то как транзистор ни включи, это все равно будет одна из типовых схем включения триода.

Почему «...основная масса»? Потому что «трехэлектродные» транзисторы впервые появились на свет и существовали довольно долго. Что же касается их сегодняшнего ассортимента, то в любом справочнике можно встретить транзисторы с двумя или несколькими затворами, с одним коллектором, одной базой и целой «кучей» эмиттеров — аж до восьми штук! Однако при всем этом по сущности своей они все остаются триодами, поскольку даже в «восьмиэмиттерном» транзисторе эти эмиттеры работают по-очереди, а если вдруг одновременно, то при этом всего лишь изменяют абсолютную величину коллекторного тока и ничего более.

А раз так, то не может быть и большого разнообразия «типовых схем» включения транзисторов (имеется в виду каждого в отдельности). Потому что, к примеру, каскодная схема — это не типовая схема включения транзистора, а совмещенная схема использования двух типовых схем на двух самостоятельных транзисторах. Постарайся это понять и в дальнейшем не путаться в терминах.

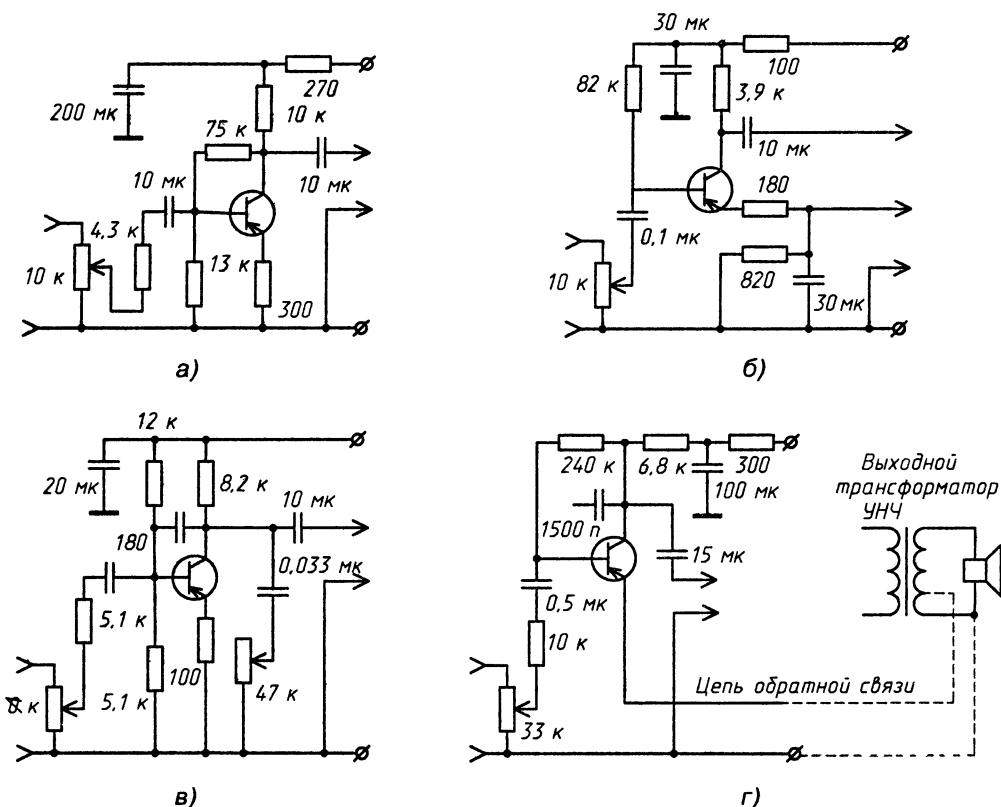


Рис. 56. Резистивные каскады предварительного усиления в УНЧ промышленных транзисторных приемников:

а — «Сокол-308»; б — «Спорт-2»; в — «Сувенир»; г — «Космонавт»

А теперь ближе к теме сегодняшнего занятия. Итак, типовые схемы использования транзисторов в БРА. Начинается эта тема с предварительной сортировки всех схем на несколько принципиально различных групп. Деление это произвольное и довольно условное, но более или менее разумное.

Первая группа — это резистивные (с нагрузкой в виде постоянного сопротивления) линейные усилители напряжения в низкочастотном спектре. К ним следует отнести все каскады предварительного усиления в УНЧ, включая так называемые микрофонные усилители. Три возможных варианта такой схемы мы приводили чуть раньше, на рис. 50.

На рис. 56 приведены несколько реальных схем такого использования, взятые из промышленной аппаратуры. Этот рисунок приводится специально для того, чтобы можно было убедиться что, несмотря на некоторые различия, сущность их не выходит за пределы схем, приводившихся на рис. 50.

Все эти схемы объединяют следующие показатели:

1. Достаточно большой коэффициент усиления по напряжению (порядка 50...200 в зависимости от параметров самого транзистора).

2. Очень незначительный коэффициент нелинейных искажений при достаточно малых входных сигналах, особенно в случае наличия в каскаде цепи отрицательной обратной связи.

3. Сравнительно низкое входное сопротивление (особенно для биполярных транзисторов).

К этой же группе можно отнести и эмиттерные повторители, а также каскады с разделенной нагрузкой, схемы которых приводились на рис. 51 и 55. От предыдущих схем их отличают лишь весьма высокое входное сопротивление и коэффициент усиления по напряжению, который всегда меньше единицы.

Ко второй группе следует отнести все схемы низкочастотных усилителей мощности, разделяющиеся, в свою очередь, на однотактные и двухтактные (в дальнейшем тебе возможно придется сталкиваться с другим названием двухтактных схем и каскадов — пушпульные).

Эта группа схем отличается от предыдущих достаточно большим разнообразием в основном потому, что непосредственно «в чистом виде» многие из них вообще не используются, а применяются в комплексе с другими вспомогательными транзисторами и диодами, осуществляющими разнообразные формы коррекции параметров основной схемы — снижение нелинейных искажений отдельно для больших и малых сигналов, стабилизацию рабочей точки транзисторов в двухтактной схеме, температурную компенсацию, отрицательную обратную связь по току и по напряжению и т. п.

Кроме того, как однотактные, так и двухтактные усилители мощности могут быть трансформаторными (и со стороны входа, и со стороны выхода) либо бестрансформаторными, с гальванической связью между входящими в каскад элементами, или с использованием разделительных конденсаторов и т. п. Наконец, в состав оконечного усилителя мощности может входить также двухтактный предоконечный каскад (или иначе — драйвер), транзисторы которого неотделимы от транзисторов оконечного каскада, поскольку соединены между собой гальванически и неразрывно связаны единым электрическим режимом по постоянному току. Очень часто такой драйвер одновременно является и фазоинвертором, если в нем применены разнополярные транзисторы.

Поскольку мы решили здесь говорить только о практических схемах, то и на рис. 57 приведены схемы различных усилителей мощности, использованные в конкретных промышленных УНЧ, так что если решено делать транзисторный УНЧ, можно смело компоновать его из отдельных каскадов по приводимым здесь и дальше схемам. Они многократно проверены на серийных изделиях и наверняка сразу заработают.



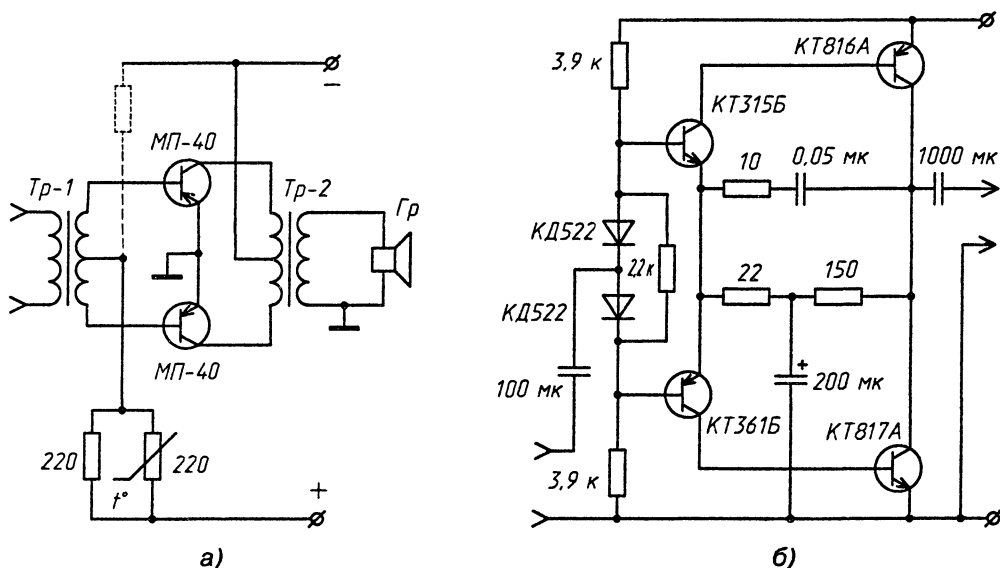


Рис. 57. Двухтактные оконечные каскады (усилители мощности):

- а — каскад с трансформаторным входом и выходом в промышленном приемнике «Сокол-403»;  
 б — двухтактный усилитель мощности вместе с драйвером-инвертором на транзисторах разной проводимости и бестрансформаторным (емкостным) выходом от промышленной магнитолы «Соната РМ-323С»

Во всех низкочастотных схемах в принципе могут хорошо работать любые типы транзисторов как *n-p-n*, так и *p-n-p* проводимости, однако лучше все же применять те из них, которые в справочниках перечисляются под рубрикой низкочастотные транзисторы малой и средней мощности. Что же касается низкочастотных транзисторов большой мощности, то они понадобятся только тогда, когда всерьез придется заняться высококлассными стереофоническими усилителями.

Следующая группа схем — это так называемые апериодические усилители ВЧ. Сегодня они встречаются как на биполярных, так и на полевых транзисторах с высокой граничной частотой (в зависимости от диапазона, на котором работает каскад). И если аппарат многодиапазонный, то граничная частота транзистора должна быть по крайней мере в 1,5–2 раза выше наивысшей рабочей частоты самого высокочастотного диапазона. В справочниках по транзисторам в разделе «транзисторы высокочастотные маломощные» этот параметр (граничная частота) обязательно указывается.

По схемотехнике апериодические каскады ВЧ мало отличаются от каскадов предварительного усиления НЧ, если не считать того, что в апериодических усилителях очень часто вместо активного резистора в качестве нагрузки применяется высокочастотный дроссель, не имеющий выраженного резонанса в рабочей полосе частот.

Впрочем, довольно часто у такого дросселя искусственно создают резонанс на самой высокой частоте рабочего диапазона, чтобы скомпенсировать естественный «завал» АЧХ на этих частотах, обусловленный влиянием различных паразитных емкостей (например, емкости монтажа). Если такая хитрость применяется в апериодическом видеоусилителе телевизора или видеомagneтофона (с целью максимально увеличить четкость изображения), то эту хитрость называют по-научному апертурной коррекцией. Звучит солидно.

В качестве примера на рис. 58 приведена схема каскодного апериодического ВЧ усилителя на двух полевых транзисторах отечественного производства.

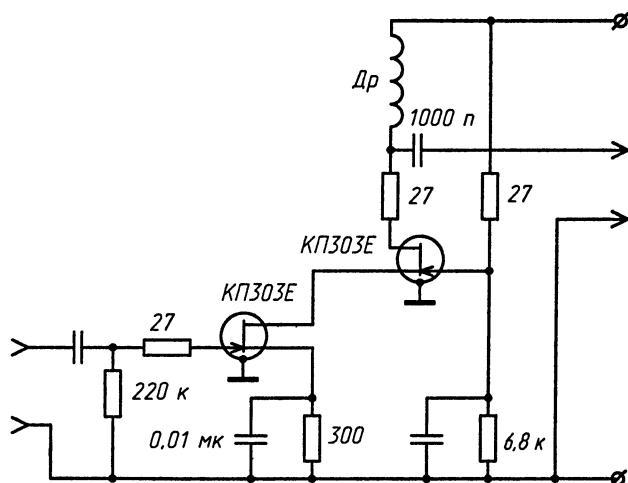


Рис. 58. Аperiодический широкополосный усилитель ВЧ по каскодной схеме на двух полевых транзисторах

Немного отличаются от аperiодических ВЧ усилителей усилители резонансные. Вся разница состоит в том, что вместо ненастраиваемого дросселя, обеспечивающего аperiодическому усилителю широкую полосу пропускания с незначительной неравномерностью, нагрузкой резонансного усилителя является настраиваемая резонансная система с определенной полосой пропускания. Такой нагрузкой может быть, к примеру, полосовой фильтр ПЧ, включенный в разрыв коллекторной цепи транзистора по схеме с общим эмиттером, либо одиночный резонансный контур, либо, наконец, ФСС. Типовая схема такого резонансного усилителя ПЧ изображена на рис. 59.

Сравнительно недавно в схемах БРА появились так называемые дифференциальные усилители, представляющие собой по существу два каскада на отдельных транзисторах по схеме с общим эмиттером, у которых эмиттеры в прямом смысле являются общими, т. е. соединены параллельно.

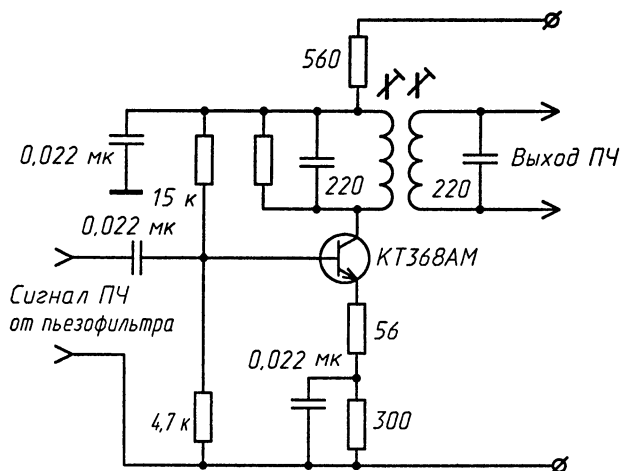


Рис. 59. Каскад резонансного усилителя ПЧ в тюнере высшего класса «Эстония УУ1»

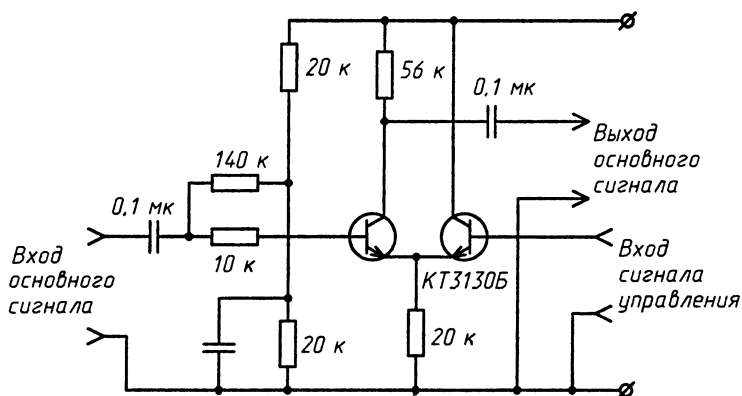


Рис. 60. Входной каскад УНЧ по дифференциальной схеме радиоприемника «Меркурий-210»

В коллекторную цепь первого (основного) транзистора включен резистор (или контур) нагрузки, с которого снимается усиленный сигнал. Коллектор второго транзистора соединен напрямую с источником питания, поэтому он оказывается каскадом с общим коллектором, т. е. эмиттерным повторителем.

Весь фокус состоит в том, что один и тот же резистор в эмиттерной цепи одновременно выполняет две разные функции. Для первого транзистора он является источником сигнала отрицательной обратной связи, а для второго — нагрузкой эмиттерного повторителя, сигнал с которого также поступает в токовую цепь основного транзистора. Таким образом, подавая на базу первого транзистора входной сигнал, мы используем дифференциальный каскад как обычный усилитель напряжения с ООС по току, а на базу второго транзистора мы можем подавать все, что нам заблагорассудится, вводя таким образом дополнительный сигнал в цепь первого транзистора.

В качестве такого дополнительного сигнала можно подавать постоянное напряжение (например, сигнал АРУ в ВЧ каскадах), или компенсационное напряжение с выхода схемы, или дополнительное напряжение частотно-зависимой обратной связи по напряжению и т. п. Типичная схема дифференциального каскада в качестве входного каскада УНЧ приведена на рис. 60.

Еще одну группу типовых схем включения транзисторов с «общим коллектором», «общей базой» и с «разделенными нагрузками» мы подробно рассматривали на предыдущем занятии (рис. 51, 52 и 55), поэтому нет смысла повторяться. Что же касается использования транзисторов в схемах генераторов, то эта тема требует отдельного разговора, чем мы и займемся на втором уроке.

## Урок 2. ГЕНЕРАТОРЫ СИНУСОИДАЛЬНЫХ И ИМПУЛЬСНЫХ СИГНАЛОВ

На одном из прошедших занятий, когда речь шла о принципе супергетеродинного приема, мы довольно подробно познакомились с тремя типами генераторов синусоидального напряжения с самовозбуждением, которые применяются во всех гетеродинах. Этим трем схемам даже присвоены собственные имена: схема Мейсснера, схема Хартля и схема Доу.

Так вот, этими тремя типами общее семейство генераторов отнюдь не ограничивается. Помимо них существует еще не один десяток самых разнообразных ге-

нераторов. На данном этапе мы ограничимся знакомством лишь с несколькими наиболее распространенными и часто встречающимися как в БРА, так и в некоторых измерительных приборах (первый из которых, кстати говоря, мы уже сегодня начнем делать для нашего рабочего места).

Вообще говоря, общая классификация генераторов начинается с разделения их на генераторы с внешним возбуждением и на генераторы с самовозбуждением. Но мы для начала ограничимся только второй группой, которая, в свою очередь, подразделяется на генераторы синусоидальных сигналов (ГСС) и генераторы импульсных сигналов (ГИС).

Все три изученные нами схемы гетеродинов относятся к ГСС, причем к той их подгруппе, в которой для получения синусоидальных колебаний обязательно используются индуктивности и емкости. Их так и называют: *LC*-генераторы. Помимо них существует несколько разных схем *RC*-генераторов синусоидальных колебаний, в которых процесс генерации возникает без участия индуктивности.

Чтобы быть ближе к делу, рассмотрим работу двух таких генераторов, схемы которых приведены на рис. 61. Работа обеих схем основана на свойстве последовательно соединенных резистора и конденсатора (так называемая *RC*-цепочка) «сдвигать» по фазе подводимое к цепочке переменное напряжение. При определенном соотношении реактивного сопротивления конденсатора и активного сопротивления резистора и только на одной частоте сдвиг фазы составляет ровно  $180^\circ$ .

В схеме рис. 61,а между коллектором и базой транзистора включены три последовательные *RC*-цепочки, каждая из которых осуществляет «свой» сдвиг фазы. Кроме того, поскольку каскад собран по схеме с общим эмиттером, он не только усиливает подводимый к базе сигнал, но и переворачивает его по фазе на те же самые  $180^\circ$ .

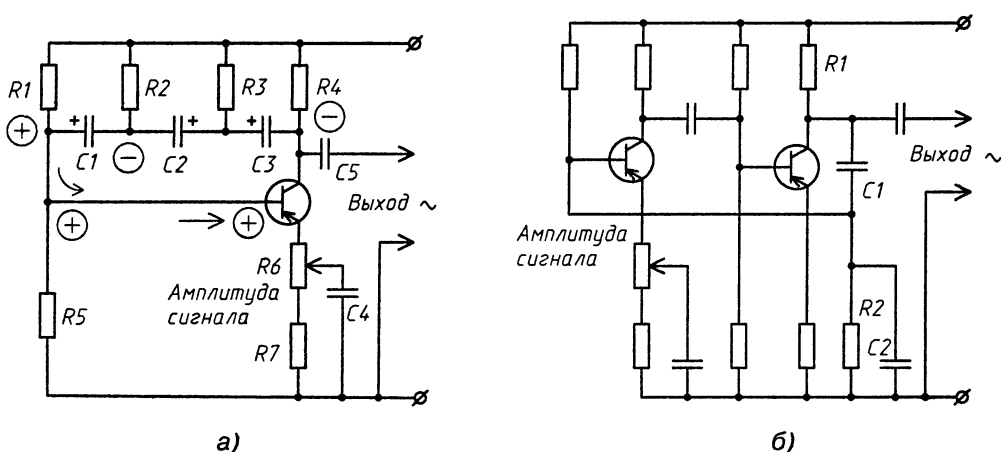


Рис. 61. *RC*-генераторы синусоидальных напряжений:

а — схема с тремя фазосдвигающими цепочками; б — схема с мостом Вина

В момент включения схемы за счет так называемых неустановившихся процессов на базе транзистора возникнет некоторое напряжение.

Пусть оно будет, к примеру, положительным (хотя с таким же основанием можно взять и отрицательное — от этого ничего не меняется). На схеме этот факт отображен знаком «+» в кружочке возле базы.

Тогда на коллекторе фаза окажется отрицательной (знак «-» в кружочке), после чего три фазосдвигающих цепочки еще 3 раза поменяют эту фазу на противо-

ложную, в результате чего подведенный к базе сигнал положительной полярности вернется на базу в той же самой положительной полярности, т. е. налицо окажется главное условие возникновения генерации — положительная обратная связь.

Мы уже отметили, что изменение фазы ровно на  $180^\circ$  при заданных значениях  $R$  и  $C$  возможно только на одной какой-то частоте, поэтому и приведенная схема является одночастотной. Разумеется, ее можно заставить генерировать и на любой другой частоте, если соответствующим образом изменить параметры всех  $RC$ -цепочек.

Качество генерируемого сигнала, т. е. степень его близости к идеальной синусоиде, можно улучшать, уменьшая степень обратной связи, что достигается уменьшением величины резистора  $R5$  почти до порога срыва колебаний. Потенциометром  $R6$  можно в некоторых пределах регулировать величину снимаемого сигнала за счет изменения глубины отрицательной обратной связи по току.

Схема на рис. 61,б по принципу возникновения условий генерации от предыдущей схемы отличается не так существенно. Тем не менее это другая схема. Эта схема называется мост Вина.

Сам мост Вина образуется двумя резисторами  $R1$  и  $R2$  и двумя конденсаторами  $C1$  и  $C2$ . Подбором величин элементов моста он балансируется таким образом, чтобы на какой-то определенной частоте сдвиг фазы на параллельной цепочке  $R2C2$  равнялся  $180^\circ$ , а значит, фаза на выходе моста совпадала с фазой на базе первого транзистора, обеспечивая наличие условия для самовозбуждения.

Теперь у нас есть как минимум пять разных схем ГСС, поэтому будет разумно перейти к рассмотрению нескольких схем генераторов несинусоидальных сигналов. И начнем мы с самой наипростейшей схемы, в которой нет ничего, кроме одного резистора, одного конденсатора да еще в придачу самой простой неоновой лампочки, которая не то что в усилители, но даже в детекторы не годится. И тем не менее...

Посмотрим на рис. 62. На этой схеме кроме резистора и конденсатора ничего нет. Правда, еще есть неоновая лампочка, которую мы поначалу просто отключим с помощью тумблера, как это и показано на схеме.

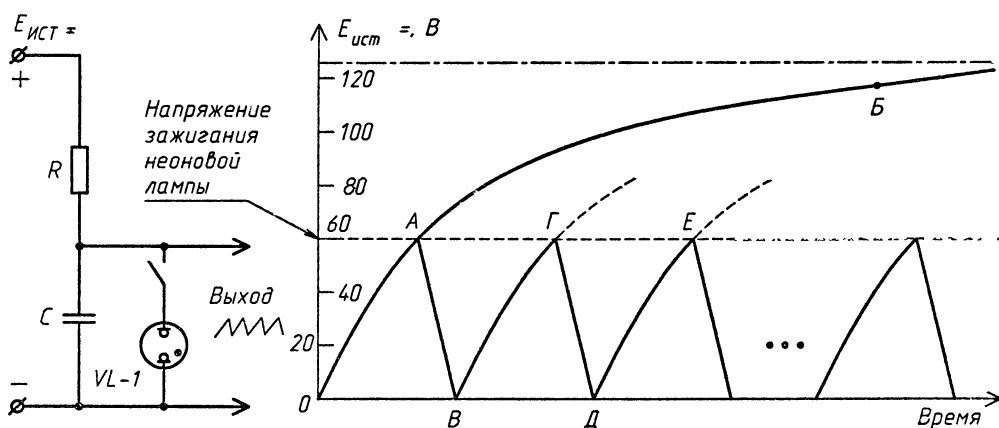


Рис. 62. Простейший генератор пилообразного напряжения

До включения напряжения источника конденсатор у нас полностью разряжен и напряжение на нем равно нулю. На графике это соответствует точке 0 в начале координат. Как только мы включим источник, конденсатор сразу же начнет заряжаться через резистор  $R$ , а напряжение на нем возрастать. Скорость этого возрас-

тания будет обратно пропорциональна величинам сопротивления резистора и емкости конденсатора, а количественно будет определяться так называемой постоянной времени цепочки, равной произведению  $RC$  (разумеется, в соответствующей системе единиц).

Но независимо ни от постоянной времени, ни от величины приложенного напряжения характер возрастания напряжения на конденсаторе всегда будет оставаться одним и тем же: оно будет возрастать по экспоненте. На нашем рисунке она выглядит как кривая, идущая от начала координат через точки *A* и *B* и дальше направо за пределы чертежа в бесконечность, но она никогда не сольется со штрихпунктирной прямой, изображающей на том же графике величину напряжения источника питания, даже если схема будет подключена к источнику не год и не 10 лет, а хоть 10 веков.

Почему не сольется? Да именно потому, что эта кривая — ЭКСПОНЕНТА! Правда, если уже через час после включения попытаемся измерить разницу между напряжением источника и напряжением на конденсаторе, у нас вряд ли что-нибудь получится.

Эта разница будет столь ничтожна, что ее нельзя уловить никакими самыми чувствительными приборами, но тем не менее теория продолжает настаивать на том, что эта разница, пусть даже самая различимая, будет существовать всегда, а с теорией лучше не спорить.

В нашей первой книге «Азбука радиолюбителя» процесс заряда и разряда конденсатора мы изучали довольно подробно.

Однако какое отношение все это имеет к генераторам? Никакого, до тех пор пока мы не включили на нашей схеме тумблер, но прежде освежим в памяти кое-какие сведения о неоновой лампочке.

Она называется неоновой как раз потому, что ее колба внутри наполнена сильно разреженным инертным газом — неоном, который в «нормальном», неионизированном состоянии, электрический ток не проводит, а стало быть, представляет собой бесконечно большое сопротивление. Даже если к лампочке приложить некоторое небольшое постоянное напряжение, не приводящее к возникновению процесса ионизации газа, картина не изменится. Изменится она тогда, когда приложенное напряжение вызовет процесс ионизации, в результате чего через лампочку потечет электрический ток, а значит, ее сопротивление перестанет быть бесконечно большим и примет некоторое реальное значение.

Дальнейшее, даже ничтожное увеличение напряжения вызовет лавинообразное возрастание тока, сопровождающееся, во-первых, возникновением свечения неона и, во-вторых, очень резким падением внутреннего сопротивления лампочки. И если в цепь лампочки не включить защитное ограничительное сопротивление, произойдет короткое замыкание источника через лампочку, после чего источник придется ремонтировать, а лампочку — выбросить.

Итак, вернемся к нашей схеме и еще до включения источника замкнем тумблер, т. е. подключим лампочку параллельно конденсатору. Поскольку ее сопротивление в исходном состоянии бесконечно, можно считать, что даже замкнув тумблер, мы к конденсатору ровным счетом ничего не подключили.

Теперь включаем напряжение источника и наблюдаем за ростом напряжения на конденсаторе. В строгом соответствии с требованием теории, этот рост будет происходить по экспоненте от самого начала координат аж до точки *A* на нашем графике. Почему не дальше? Потому, что в точке *A* напряжение на конденсаторе достигнет величины 60 В, а это как раз и есть напряжение зажигания нашей неоновой лампочки, после которого внутри лампочки начнется уже описанный процесс, внутреннее сопротивление лампочки станет очень маленьким, и оно попросту замкнет накоротко конденсатор. Конденсатор, естественно, тут же полностью

разрядится через лампочку, напряжение на нем сразу же упадет до нуля, а весь этот скоротечный процесс найдет свое отображение на нашем графике отрезком  $AB$ .

Но одновременно с этим упадет до нуля и напряжение на лампочке. Она, естественно, погаснет, ее сопротивление снова возрастет до бесконечности, а поскольку напряжение источника от схемы никто не отключал, то конденсатор снова как ни в чем ни бывало начнет заряжаться по экспоненте, но теперь уже не от точки  $O$  до точки  $A$ , а от точки  $B$  до точки  $\Gamma$ , поскольку время не стоит на месте, а движется от точки  $O$  вправо по горизонтальной оси нашего графика.

И когда напряжение на конденсаторе снова дорастет до  $60\text{ В}$  (т. е. до точки  $\Gamma$  на графике), процесс полностью повторится. Он будет самостоятельно, без нашего участия, повторяться неограниченное число раз, оставляя на нашем графике след в виде кривой, внешне очень напоминающей зубья обыкновенной пилы. Может быть, именно поэтому переменное напряжение, самостоятельно генерируемое нашей простейшей схемой, и называли пилообразным напряжением.

Этот простейший генератор открывает собой целый ряд так называемых релаксационных генераторов, в числе которых очень распространенным и широко применяемым является блокинг-генератор. До появления и широкого внедрения специализированных микросхем он являлся, пожалуй, единственным задающим генератором в схемах кадровой и строчной разверток всех телевизоров и видеомониторов. Такое предпочтение отдавалось блокинг-генераторам из-за их способности легко синхронизироваться, т. е. устанавливать свою собственную частоту генерации в точности совпадающую с частотой внешних так называемых синхрои́мпульсов.

Типовые схемы блокинг-генераторов на транзисторе и ламповом триоде приведены на рис. 63. Ограничимся сказанным и не будем сейчас более подробно анализировать физику происходящих в этой схеме процессов, поскольку тема «телевидение» в программу этого курса (второй книги) не входит. А к блокинг-генераторам мы еще специально вернемся в следующей книге.

Зато с другим генератором импульсных (несиусоидальных) сигналов мы сейчас будем знакомиться очень подробно, поскольку с этим типом генераторов придется часто иметь дело в практической работе, в частности уже на одном из ближайших занятий.

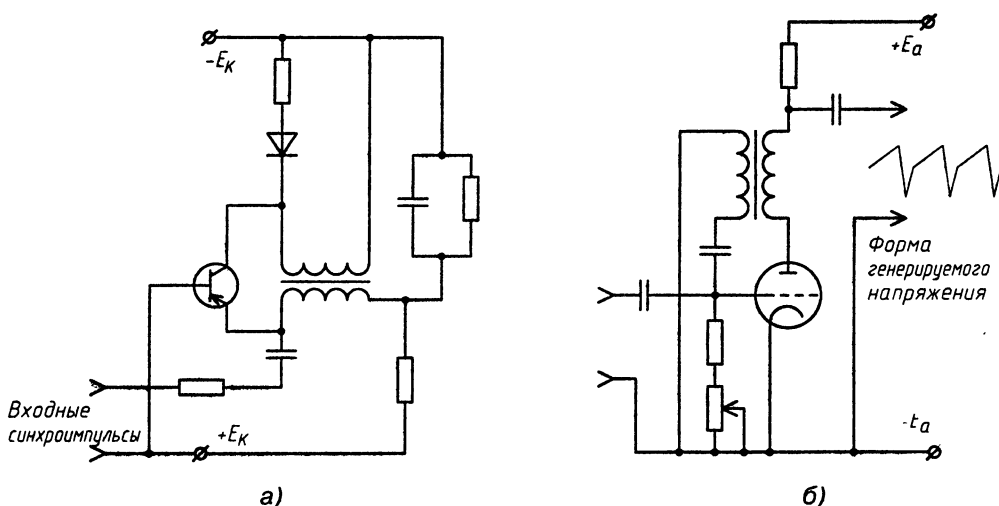


Рис. 63. Две схемы блокинг-генераторов:

а — на транзисторе; б — на ламповом триоде

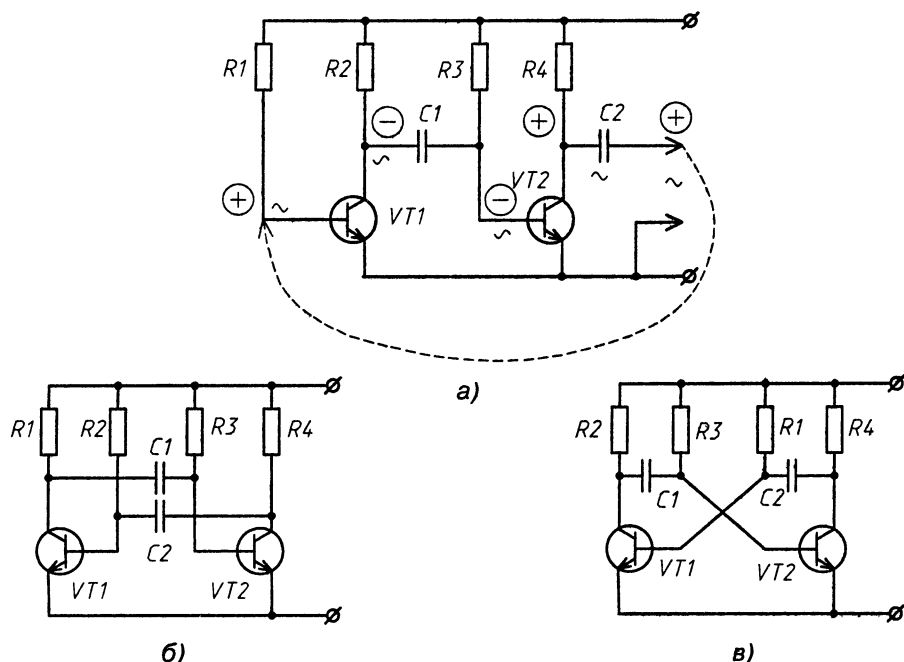


Рис. 64. Мультивибраторы:

а — схема превращения двухкаскадного усилителя в мультивибратор;  
 б, в — наиболее часто встречающиеся начертания схем симметричных мультивибраторов

Существует немало разновидностей этой схемы, но все они объединяются одним общим названием — мультивибраторы. А тот из них, которым мы сейчас займемся, имеет даже собственное имя: симметричный мультивибратор Абрахама-Блоха.

Но начнем с того, что внимательно присмотримся к схеме на рис. 64,а. Здесь нет ничего нового: это самый обыкновенный, если не сказать — простейший — двухкаскадный усилитель напряжения на транзисторах, работающих по схеме с общим эмиттером. О такой схеме включения мы знаем уже все, в том числе и то, что каждый такой каскад изменяет фазу подводимого сигнала ровно на  $180^\circ$ .

Этот факт сейчас особенно важен, поэтому возле каждой базы и каждого коллектора мы на рисунке изобразили это в виде маленьких синусоидок и дополнительно значками «+» и «-», которые соответствуют положительной и отрицательной фазе.

Усилитель как усилитель: слева — вход, справа — выход. Одна маленькая, но очень существенная деталь: фазы сигнала на входе и на выходе усилителя совпадают. И если мы теперь соединим между собой вход и выход усилителя, как это изображено на схеме пунктирной линией, то наш усилитель немедленно превратится в генератор с самовозбуждением, так как мы создали необходимые условия для этого.

Всякий процесс всегда начинается с чего-нибудь исходного, поэтому мы имеем право допустить, что в начальный момент оба транзистора находятся в некоем среднем состоянии, т. е. наполовину открыты.

Теперь по какой-то неизвестной нам внешней причине напряжение на базе первого транзистора стало совсем чуть-чуть более положительным.

Вслед за этим напряжение на первом коллекторе тут же стало более отрицательным, но уже не совсем чуть-чуть, а весьма заметным, поскольку каскад-то



у нас усилительный. Точно так же немедленно изменится и напряжение на базе второго транзистора, поскольку оно в точности повторяет и по амплитуде, и по фазе напряжение на коллекторе первого транзистора.

А это вызовет уже очень резкое увеличение положительного напряжения на коллекторе второго транзистора (второй-то каскад как-никак тоже усилительный!). А поскольку выход второго каскада у нас прямо связан со входом первого, то получается, что даже совсем ничтожное увеличение положительного напряжения на базе первого транзистора мгновенно вызовет соответствующую реакцию всей схемы. Какую именно? А очень простую: даже самое различное увеличение «плюса» на первой базе немедленно обернется дополнительным плюсом на той же базе, только гораздо большим по величине. Но такое увеличение плюса тут же приведет к появлению еще большего плюса на коллекторе второго транзистора, которое, в свою очередь, снова вернется на первую базу...

Короче говоря, огромный плюс на первой базе приведет первый транзистор в состояние полного насыщения, которому соответствует верхний загиб коллекторной характеристики. А при таком состоянии никакой транзистор уже не в состоянии ничего усиливать, сколько бы мы ни увеличивали дальше плюс на базе.

К этому моменту картина такая: ток через первый транзистор максимальный, значит, падение напряжения на резисторе нагрузки  $R_2$  тоже максимальное, вследствие чего напряжение на первом коллекторе близко к нулю, поэтому конденсатор  $C_1$  заряжен таким образом, что напряжение на его левой обкладке более отрицательное, чем на правой, соединенной с базой второго транзистора.

Но поскольку из-за насыщения первого транзистора процесс как бы приостановился, то и напряжение положительной обратной связи со второго транзистора на базу первого перестало поступать.

А что же конденсатор  $C_1$ ? Теперь причина для его подзарядки указанной полярности исчезла, и он начал помаленьку разряжаться.

Поскольку разряжаться он может только по цепи наименьшего сопротивления (т. е. в данном случае через переход база—эмиттер второго транзистора), то изменившееся на противоположное направление разрядного тока приведет к перемене полярности на базе второго транзистора, вследствие чего немедленно поменяется и фаза напряжения на выходе второго транзистора, которое вместо положительного теперь будет отрицательным (т. е. уменьшающимся по абсолютной величине).

Но поскольку это же напряжение приложено к базе левого транзистора, то и оно начнет стремительно уменьшаться. Так что транзисторы поменяются ролями: первый почти мгновенно окажется надежно запертым большим «минусом» на базе, а второй перейдет в состояние насыщения.

А дальше будет как в сказке про белого бычка. Процесс будет самостоятельно продолжаться без нашего участия. А как же с первопричиной? Не имеет никакого значения на какую величину и в каком направлении изменится напряжение на любом электроде любого из двух транзисторов, поскольку одного этого факта окажется вполне достаточно, чтобы «процесс пошел».

Какой же сигнал будет генерировать наш мультивибратор? Это тоже очень интересный вопрос, теперь уже очень легкий. Возьмем и нарисуем график зависимости коллекторного напряжения от времени для обоих транзисторов, как это сделано на рис. 65. Поскольку мы в самом начале договорились, что оба транзистора в исходном состоянии находятся в некотором «среднем» положении, будем считать, что и токи через них текут средние, и падения напряжения на коллекторных нагрузках средние, а значит, и напряжения на коллекторах тоже средние между максимальным напряжением источника питания и нулем. Этот наш с тобой уговор на графиках *а* и *б* отражен коротенькой горизонтальной черточкой в самом начале обеих кривых.

Но как только «процесс пошел», напряжение на коллекторе первого транзистора практически мгновенно (процесс-то как-никак носит лавинообразный характер!) станет почти равным нулю, а напряжение на втором коллекторе почти равным напряжению источника питания.

Дальше какое-то время никаких видимых изменений происходить не будет.

А не будет потому, что один из двух наших конденсаторов зарядился «на всю катушку» и так надежно запер соответствующий транзистор, что он не откроется до тех пор, пока напряжение на этом самом конденсаторе не уменьшится до такой величины, при котором напряжение на базе транзистора повысится до порога, при котором через транзистор потечет хотя бы ничтожный ток. А как только это произойдет, мгновенно произойдет лавинообразный процесс перезаряда обоих конденсаторов до максимальной величины, но уже противоположной полярности.

И опять наступит пауза, пока теперь уже другой конденсатор не разрядится настолько, чтобы уже через другой транзистор начал протекать малюсенький коллекторный ток. Длительность паузы будет определяться исключительно постоянной времени зарядно-разрядной цепочки, равной прямому произведению  $RC$  (разумеется, в соответствующей системе единиц!).

Значит, чем больше сопротивление резистора и больше емкость конденсатора, тем больше постоянная времени и, соответственно, длительность паузы, т. е. тем ниже частота собственных колебаний мультивибратора.

Это в свою очередь позволяет, изменяя величины  $R$  и  $C$ , в широких пределах изменять собственную частоту генерации мультивибратора. И, действительно, никакого труда не составляет сделать эту частоту, равной долям герца или сотням килогерц.

И, наконец, последнее. Чуть раньше мы сказали, что рассмотренный нами мультивибратор является симметричным. Посмотрим на форму кривой на графиках рис. 65, а и б.

Эта форма будет симметричной, если будут равны между собой сопротивления обоих резисторов и емкости обоих конденсаторов, а оба транзистора — одного и того же типа и притом с одинаковым коэффициентом усиления.

А если, к примеру, сопротивление одного из резисторов взять поменьше, а одну из емкостей чуть побольше? Тогда у двух  $RC$ -цепочек окажутся разные постоянные времени и длительности двух соседних пауз окажутся разными. Это неизбежно приведет к изменению формы генерируемого напряжения, которая станет такой, как показано на рис. 65, в. И если длительность одной паузы обозначить через  $T_1$ , а другой — через  $T_2$ , то отношение этих двух «Т» будет характеризовать один из важнейших параметров генерируемого импульсного напряжения — его скваж-

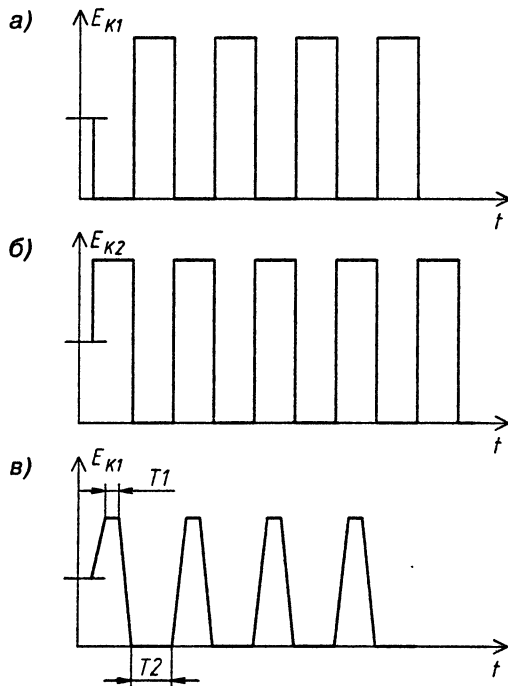
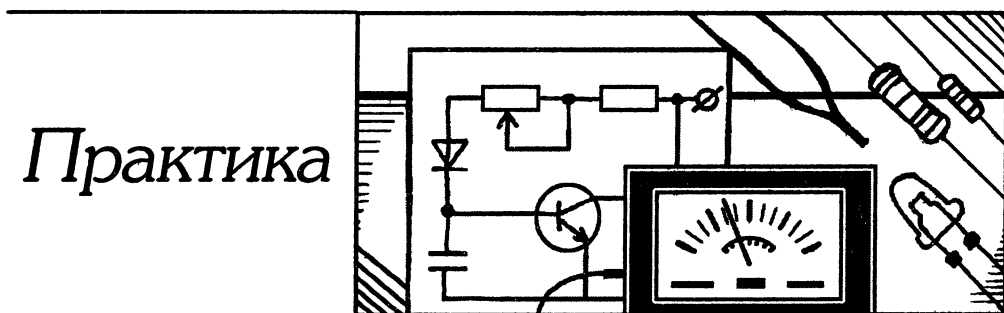


Рис. 65. Зависимость напряжения на коллекторах транзисторов от времени

ность, а если эта скважность будет равна единице (т. е. длительности пауз одинаковые), то про этот частный случай принято говорить, что схема генерирует *меандр*.

Осталось ответить на вопрос, что это за три разные схемы изображены на рис. 64. Здесь изображена одна и та же схема нашего симметричного мультивибратора. На всех схемах сохранена одинаковая нумерация всех схемных элементов, а приведены эти вроде бы разные схемы потому, что в дальнейшей нашей деятельности одинаково часто будут встречаться разные начертания одних и тех же схем.

На сегодня этого вполне достаточно, так что приступаем к очередной работе по оборудованию рабочего места.



В самое ближайшее время нам предстоит почти постоянно иметь дело с транзисторами и полупроводниковыми приборами, а для этого надо быть всегда уверенным, что любой транзистор или диод, который собираемся впаять в схему, как минимум исправен и имеет именно те параметры, которые необходимы для данной конкретной схемы.

Для этого необходимо иметь специальный прибор для проверки и измерения основных параметров диодов и транзисторов.

Сегодня такой прибор можно без труда приобрести в торговой сети, да и стоит он не так уж и дорого, но какой же уважающий себя радиолюбитель станет покупать прибор, который он в состоянии сделать своими руками? Так что прибор будем делать сами.

Прибор, естественно, не универсальный и всемогущий, но основные измерения на нем производить можно. Прежде всего с его помощью можно измерять прямые (до 20 мА) и обратные (до 200 мкА) токи диодов при напряжении 4 В. У биполярных транзисторов можно измерять токи коллектор—база, эмиттер—база и коллектор—эмиттер, а также коэффициент передачи до 200.

Кроме того, можно проверить любой транзистор на его способность работать в качестве генератора. Наконец, установив в приемные гнезда заведомо исправный транзистор любого типа с коэффициентом  $\beta$  не ниже 40, можно превратить наш прибор в звуковой генератор, дающий на выходе богатый гармониками сигнал широкого спектра с амплитудой до 30 В (при разомкнутом ключе SA5 или близкое к синусоидальному напряжение с амплитудой до 15 В (при замкнутом ключе SA5).

Полная схема прибора приведена на рис. 66. Как видно из схемы, он не имеет собственного источника питания, а рассчитан на подключение внешнего источника, в качестве которого можно использовать гальванические элементы (например,

батарейку КБСЛ от «плоского» карманного фонарика), либо питать его, когда потребуется, от универсального блока питания, которым рабочее место уже оборудовано, либо, наконец, соорудить небольшой маломощный выпрямитель.

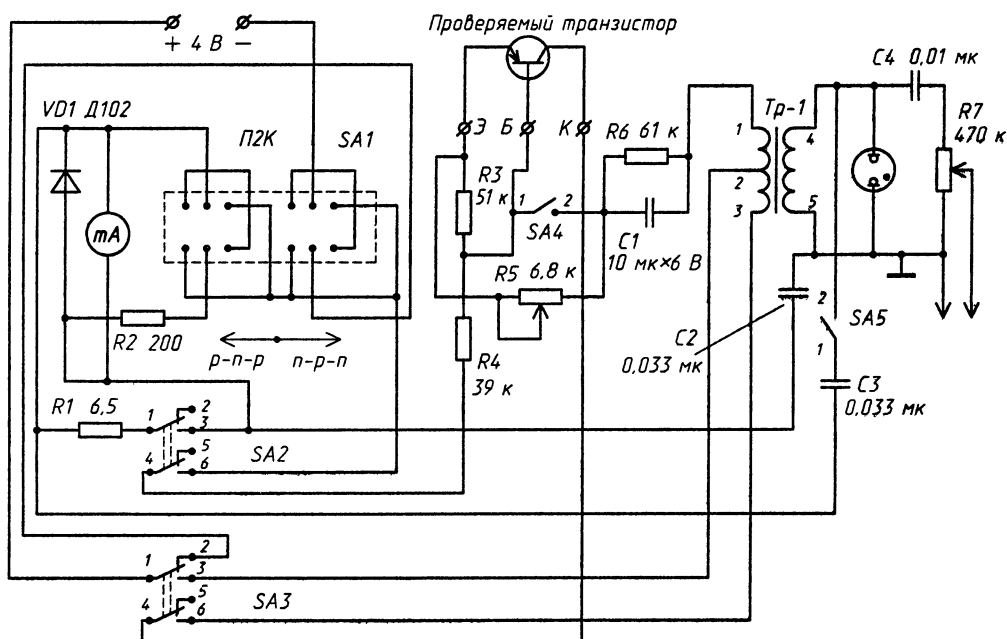


Рис. 66. Схема прибора для проверки полупроводниковых диодов и транзисторов

Наиболее сложную часть схемы составляет коммутация всех внутренних цепей, с помощью которой осуществляется переход от одного вида измерений к другому. Для ее реализации в схеме имеются пять независимых переключателей: SA1, SA2, SA3, SA4 и SA5. Переключатели эти выбраны разных типов, причем сделано это не случайно, а для удобства эксплуатации.

Эти переключатели показаны в живом виде на рис. 67, чтобы было легче ориентироваться при их приобретении. Переключатель SA1 выполнен на сдвоенном блоке типа П2К с зависимым переключением.

Это означает, что при нажатии на любую из двух кнопок она фиксируется в нажатом положении, а вторая кнопка возвращается в исходное, отжатое положение, и наоборот.

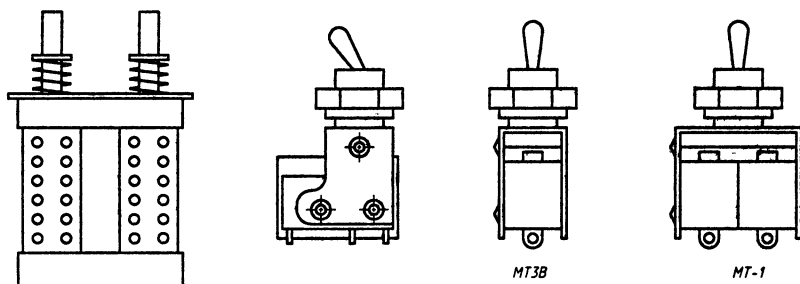


Рис. 67. Внешний вид переключателей, использованных в конструкции прибора

Сразу поясним, что для осуществления всей необходимой коммутации вполне достаточно и одной секции П2К, в чем можно без труда убедиться, анализируя схему. Но тогда зачем же иметь вторую секцию?

Этот переключатель коммутирует тип проводимости подключаемого транзистора: *p-p-p* или *n-p-n*.

В принципе можно применить одну секцию с независимым переключением, когда переключатель при нажатии фиксируется в утопленном положении, а при повторном нажатии — в отпущенном положении. Однако в этом случае приходится всегда думать, какому из этих положений соответствует тот или другой тип проводимости транзистора.

Применив П2К с двумя секциями, одну из них мы будем использовать как рабочую, а на долю второй секции останется лишь возвращать первую, рабочую кнопку в исходное отжатое состояние при нажатии на кнопку холостой секции. И в этом случае не надо каждый раз задумываться, поскольку на каждой из кнопок достаточно будет надписать, какому виду проводимости транзистора соответствует нажатая кнопка.

Таким образом, предлагается на выбор два совершенно равноценных варианта. Что касается рисунка печатной платы, то он пригоден для обоих вариантов без всяких изменений.

В качестве переключателей *SA2* и *SA3* использованы сдвоенные микротумблеры типа МТЗВ, а *SA4* и *SA5* — одиночные микротумблеры типа МТ1.

Основу прибора составляет головка (микроамперметр) с полным отклонением на всю шкалу при токе в 200 мкА. Ее внутреннее сопротивление равно 650 Ом. При другом значении внутреннего сопротивления необходимо будет изменить номинал резистора *R1* — его величина составляет 1% от величины внутреннего сопротивления головки.

Трансформатор *Tr1* намотан на Ш-образном магнитопроводе размером Ш9×10 и имеет следующие данные обмоток: первичная содержит 100 + 20 витков провода ПЭЛ-0,25, вторичная — 1600 витков провода ПЭВ или ПЭЛ 0,08.

Число витков вторичной обмотки совершенно не критично, в принципе ее вообще можно не наматывать. Она нужна только для того, чтобы с нее снимать переменное напряжение звуковой частоты, когда прибор используется в качестве генератора.

При указанном числе витков (1600) напряжение звуковой частоты получается 30 или 15 В в зависимости от положения переключателя *SA5*. Если подходит напряжение 3 и 1,5 В соответственно, то во вторичной обмотке достаточно будет намотать всего 160 витков и при этом можно будет увеличить диаметр провода до 0,15...0,2 мм.

Такую обмотку намотать будет несравненно легче. Правда, в этом случае не будет загораться индикаторная неоновая лампочка и ее можно будет вообще исключить, а на ее место поставить любой светодиод с включенным последовательно ограничительным резистором, величину которого понадобится подобрать опытным путем по «умеренному» свечению светодиода.

Как работает прибор и как им пользоваться? Режим проверки устанавливается переключателем *SA3*. Он имеет два положения, которые на лицевой панели надо будет пометить значками «=» и «~», что соответствует измерению постоянных токов диодов и транзисторов при положении «=», а в положении «~» — проверке в генераторном режиме (при замкнутом положении переключателя *SA4*).

При испытании диодов его выводы подсоединяют к входным разъемам (зажимам), помеченным буквами Э и К с соблюдением полярности диода. Для измерения прямого тока переключатель *SA2* должен быть замкнут, а для обратного тока — разомкнут.

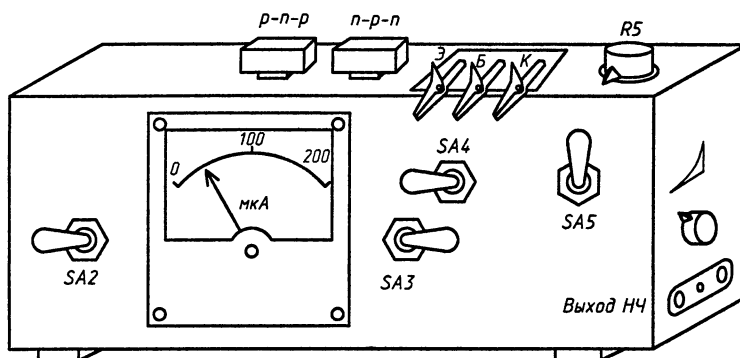


Рис. 68. Вариант внешнего вида прибора и расположения органов управления

Все транзисторы подключаются к входным зажимам (Э, Б, К) одинаково, независимо от типа проводимости, а переключатель *SA1* устанавливают в нужное положение. На принципиальной схеме показано, какое из его положений соответствует тому или другому типу проводимости.

Статический коэффициент передачи тока транзистора измеряется при замкнутом положении переключателя *SA2*. При этом резистор *R1* шунтирует измерительную головку, расширяя пределы измерения до 20 мА. Поскольку сопротивление резистора *R4* равно 39 кОм, а напряжение источника — 4 В, то для всех испытываемых транзисторов ток базы практически равен 0,1 мА, поэтому все оцифрованные деления шкалы прибора прямо показывают коэффициент передачи по току (до величины 200).

Чтобы проверить способность транзистора генерировать, переключатели должны находиться в положениях: *SA2* — разомкнут, *SA4* — замкнут, а *SA3* — в положении «~». Момент возникновения и срыва генерации определяется положением резистора *R5*, поэтому его ось должна быть выведена на лицевую или верхнюю панель прибора.

Конструкция прибора напрямую связана с тем, на каком из двух вариантов переключателя *SA1* ты остановишься. На рис. 68 приведен один из возможных вариантов, для которого на рис. 69 предлагается полностью готовый вариант печатной платы.

На этом варианте печатной платы нарисованы несколько подсказок, которые должны облегчить проводную, соединительную часть монтажа всего прибора. Чтобы не запутаться в выводах переключателей, на плате изображены якобы установленные переключатели *SA2*, *SA3*, *SA4* и *SA5*.

Что значит «якобы»? На самом деле они установлены на лицевой панели прибора, а все их выводы соединяются с соответствующими выводами на плате многочисленными монтажными проводниками. Расположение нарисованных на плате выводов всех четырех микротумблеров точно соответствует фактическому их расположению на «живых» тумблерах, а проставленные на печатной плате номера выводов тумблеров в точности соответствуют номерам этих выводов на принципиальной схеме, так что перепутать что-нибудь невозможно даже при большом желании (если, конечно, заранее не поставить перед собой именно такую цель). На всякий случай дополнительно информирую о том, что помимо обычных деталей — резисторов и конденсаторов на плате предусмотрены две проволочные перемычки, а еще четыре перемычки придется припаять сверху рабочей группы переключателя П2К.

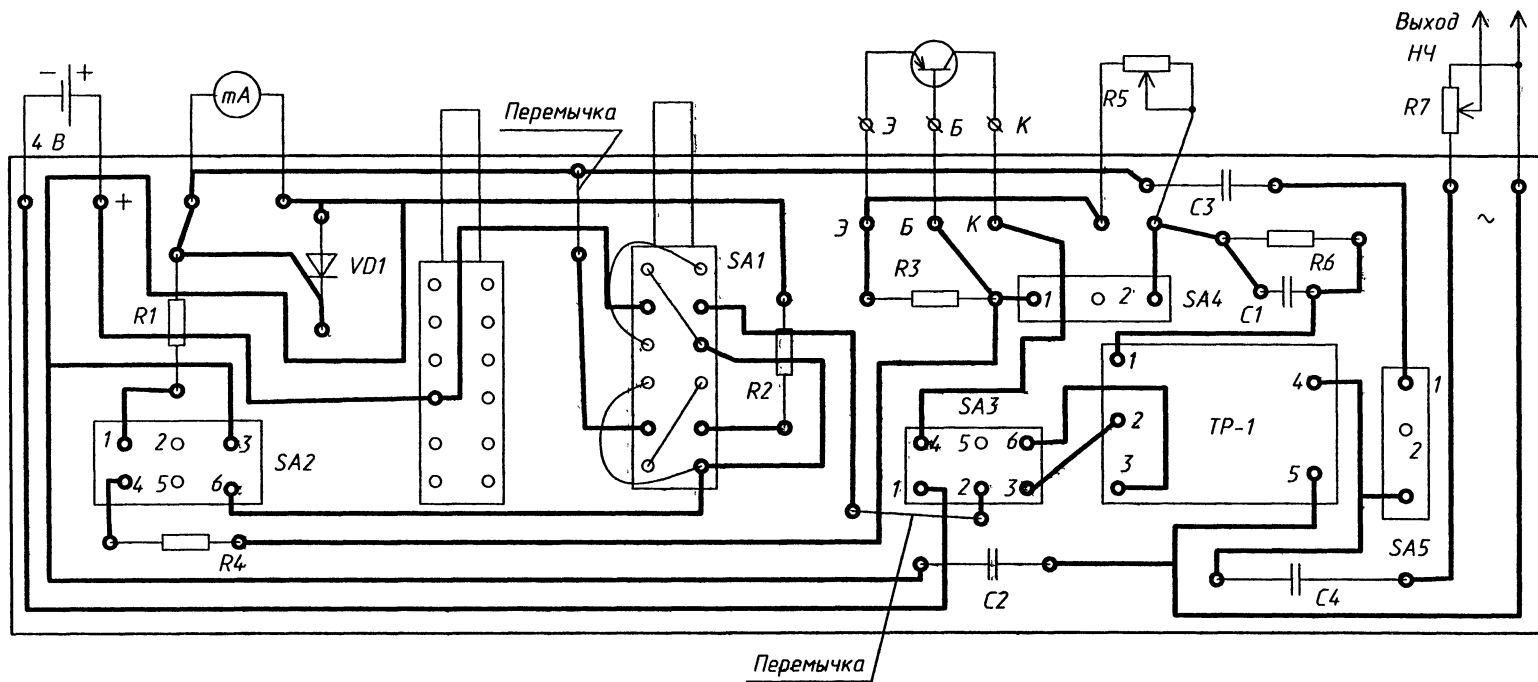


Рис. 69. Один из возможных вариантов печатной платы прибора

Переключатель *SA1* установлен на плате не «якобы», а на самом деле, при этом «рабочей» группой является только правая (на рисунке) группа, а левая нужна только для «сброса» рабочей группы в отжатое положение. Если же надумаем применить переключатель П2К с независимым переключением, то левая группа вообще не понадобится.

Реальный размер печатной платы — 150×45 мм. Что касается трансформатора, то если по габаритам он впишется в отведенное для него место, его можно поставить прямо на плату. Если же он получился побольше, это не страшно. Его можно закрепить в любом месте изнутри корпуса, а с платой его выводы соединить проводниками.

Также проводниками соединяются с платой выводы потенциометров *R5* и *R7*, выходные клеммы звукового сигнала, входные клеммы подключения транзисторов и выводы измерительной головки.

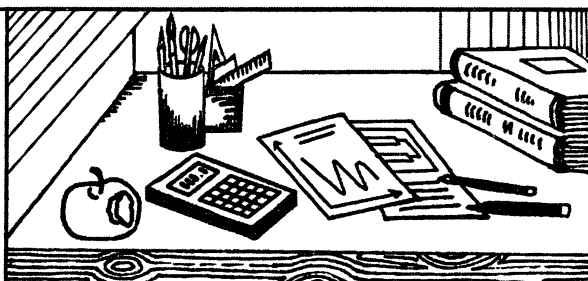
Что касается источника питания, то в случае применения гальванических элементов, они располагаются внутри корпуса прибора, а для подключения внешнего источника постоянного напряжения 4 В на заднюю стенку прибора надо будет вывести две клеммы с обязательным указанием полярности подключения.

О том, что и как на нем измерять, мы уже подробно обсудили.



# ЗАНЯТИЕ ДЕСЯТОЕ

## Теория



### Урок 1. УСТРОЙСТВО И РАБОТА ТИРИСТОРОВ. ЗНАКОМСТВО С МИКРОСХЕМОЙ

На двух предыдущих занятиях мы в самых общих чертах познакомились с устройством, принципом работы и назначением полупроводниковых приборов: диодов и транзисторов. В самых общих чертах это значит, что за пределами нашего внимания остался целый круг вопросов и проблем, очень важных и интересных, но на сегодняшнем уровне подготовки несколько преждевременных для более подробного изучения.

К этим вопросам и проблемам вернемся в самом ближайшем будущем, а сегодня лучше поговорим о других видах полупроводниковых приборов, тем более что среди них немало очень интересных и суперсовременных.

А начнем мы с одного смелого и необычного эксперимента. На первом уроке восьмого занятия мы в самом его начале применили военную хитрость: включили два полупроводниковых диода навстречу друг другу и в результате получили совершенно новый замечательный прибор под названием транзистор.

Пойдем по этому пути еще дальше и теперь включим навстречу друг другу... два транзистора разной проводимости. Но не последовательно, что мы уже делали и в результате чего получили каскодную схему, а именно навстречу, причем таким образом, как это изображено на рис. 70.

У нас опять получился новый полупроводниковый прибор под названием диодный тиристор. И этот тиристор обладает совершенно новыми и не менее замечательными свойствами, чем обычный диод или обычный транзистор.

Но прежде чем говорить об этих замечательных свойствах, коснемся его действительного устройства.

Технология изготовления тиристора ненамного отличается от технологии изготовления транзистора. Для получения транзистора в структуру основного полупроводника вплавляют или присоединяют другим способом два электрода с другим типом проводимости, в результате чего возникают два встречных перехода —  $p-n$  и  $n-p$ . И от того, какой вид проводимости окажется у крайних электродов, получается транзистор либо  $p-p-p$ , либо  $n-p-p$  структуры.

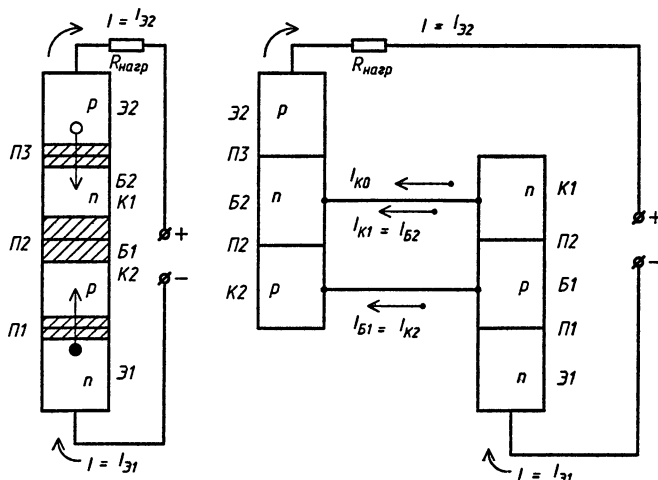


Рис. 70. Схематическое устройство диодного тиристора

Нетрудно сообразить, что у двух включенных навстречу транзисторов разной проводимости появляется еще один, дополнительный переход, поэтому структура диодного тиристора становится четырехслойной и трехпереходной и выглядит так:  $p-n-p-n$ .

Забавная картина при этом получается: переходы  $П1$  и  $П3$  по-прежнему остаются эмиттерными переходами каждого из отдельных транзисторов, а переход  $П2$  оказывается общим коллекторным переходом для обоих, несмотря на разный тип проводимости транзисторов.

Область базы  $Б1$  транзистора  $T1$  одновременно является коллекторной областью  $К2$  транзистора  $T2$  и, наоборот, область базы  $Б2$  транзистора  $T2$  служит коллекторной областью  $К1$  транзистора  $T1$ . Соответственно этому коллекторный ток транзистора  $T1$  является током баз транзистора  $T2$ , а коллекторный ток транзистора  $T2$  — базовым током транзистора  $T1$ .

Попробуем разобраться как же такой, с позволения сказать, «прибор» будет работать.

Физические процессы в диодном тиристере можно упрощенно представить себе следующим образом. Если бы был только один переход  $П2$ , работающий при обратном напряжении, то существовал бы лишь небольшой обратный ток, создаваемый перемещением через переход неосновных носителей, которых сравнительно мало. Но, как известно, в транзисторе может быть получен большой коллекторный ток, являющийся тем не менее обратным током коллекторного перехода, если в базу транзистора со стороны эмиттерного перехода инжектировать большое количество неосновных носителей. Однако нам все равно придется в этом разобраться, если мы хотим двигаться дальше.

Итак, чем больше прямое напряжение на эмиттерном переходе, тем больше этих самых неосновных носителей приходит к коллекторному переходу и тем больше становится ток коллектора. А напряжение на коллекторном переходе, наоборот, становится меньше, так как при большем токе уменьшается сопротивление коллекторного перехода и возрастает падение напряжения на коллекторной нагрузке. Через переходы  $П1$  и  $П3$ , работающие в прямом направлении, в области, примыкающие к переходу  $П2$ , инжектируются неосновные носители, уменьшающие сопротивление перехода  $П2$ , что сопровождается увеличением тока через переход и уменьшением падения напряжения на нем. Если все сказанное усвоено, остальное будет уже совсем просто.

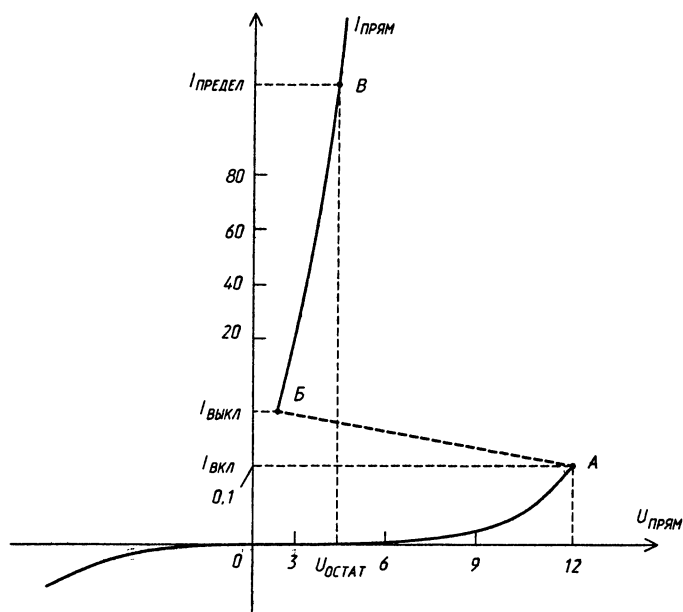


Рис. 71. Вольт-амперная характеристика диодного тиристора

При повышении напряжения на тиристоре сначала возникает небольшой ток, и растет он медленно, что соответствует участку  $0-A$  вольт-амперной характеристики, изображенной на рис. 71. Можно считать, что в этом режиме тиристор «заперт». Сопротивление перехода  $P2$  еще достаточно велико, а напряжения на переходах  $P1$  и  $P3$  еще очень малы, так как почти все напряжение падает на переходе  $P2$ . А при очень малых прямых напряжениях мал и прямой ток через  $p-n$  переход.

По мере увеличения приложенного к тиристору напряжения вследствие нелинейной вольтамперной характеристики прямого тока  $p-n$  перехода ток начинает возрастать все больше и больше. Но это означает, что все больше и больше неосновных носителей будет инжектироваться к переходу  $P2$ , его сопротивление уменьшится, что приведет к перераспределению напряжений на переходах. Снижается доля напряжения на переходе  $P2$  и быстрее начинают возрастать напряжения на переходах  $P1$  и  $P3$ .

Но это, в свою очередь, вызывает ускорение роста тока и увеличение инжекции неосновных носителей в область  $P2$ . В конце концов при напряжении порядка десятков (или нескольких десятков, а у отдельных типов — сотен) вольт, называемом напряжением включения (точка  $A$  на ВАХ), процесс приобретает лавинообразный характер. Ток резко, скачком возрастает (участок  $A-B$  на ВАХ), в результате возникает ситуация, очень напоминающая режим насыщения транзистора — большой коллекторный ток при малом напряжении на коллекторе. Конечная величина этого тока определяется лишь величиной сопротивления резистора, включенного в коллекторную цепь и напряжением источника.

Это ничего не напоминает? Когда мы проходили газонаполненные электронные приборы, там был прибор с похожими процессами — он назывался тиратроном. У них даже и названия схожие: тиратрон и тиристор, потому что внешне происходящие в них процессы очень схожи, хотя физика этих процессов совершенно различна. Но поскольку схожи происходящие процессы, то вполне логично, что схожи и области использования и тех и других приборов.

Ну, а как же ведет себя диодный (т. е. неуправляемый) тиристор в реальной схеме? А ведет себя он как обыкновенное электромагнитное реле. При медленном,

постепенном увеличении напряжения на обмотке реле увеличивается сила магнитного поля, но пока она недостаточна для срабатывания реле, ток через его разомкнутые контакты не протекает. А когда напряжение на обмотке достигает предела срабатывания, контакты замыкаются и в цепи устанавливается ток. В электромагнитном реле цепь обмотки и цепь внешнего тока разобщены. В тиристоре же обе эти цепи как бы совмещены.

Это значит, что при постепенном увеличении напряжения, приложенного к тиристору, ток через тиристор очень мал, что позволяет считать, что ток практически отсутствует, т. е. цепь якобы разорвана. А когда величина приложенного напряжения достигает значения срабатывания (его называют напряжением включения тиристора), происходит мгновенное резкое уменьшение его внутреннего сопротивления, что почти эквивалентно замыканию контактов электромеханического реле. Именно поэтому неуправляемый диодный тиристор часто сравнивают с обычным реле и используют его именно в релейных схемах.

А что, если от одной из базовых областей общего  $p-n$  перехода диодного тиристора сделать дополнительный, отдельный вывод? Оказывается, это уже сделали до нас, в результате чего был получен очередной новый полупроводниковый прибор, который назвали триодным тиристором, или иначе — тринистором.

Подавая через этот новый «вывод» прямое напряжение на переход, работающий в прямом направлении, можно тем самым регулировать порог «срабатывания» тринистора (нечто подобное мы уже проделывали с газонаполненным тиратроном, введя в него вторую, управляющую сетку). Чем больше будет ток через такой «управляющий» переход, тем ниже будет напряжение включения тринистора.

О том, как такое дополнительное управляющее напряжение влияет на работу тринистора, можно наглядно увидеть из семейства его характеристик на рис. 72. Из этих характеристик легко сделать следующий, может быть, не совсем ожидаемый вывод: при отсутствии тока в цепи управляющего электрода тринистор по характеристикам ничем не отличается от диодного тиристора, а при увеличении тока его характеристики постепенно приближаются к характеристике прямого тока самого обыкновенного диода.

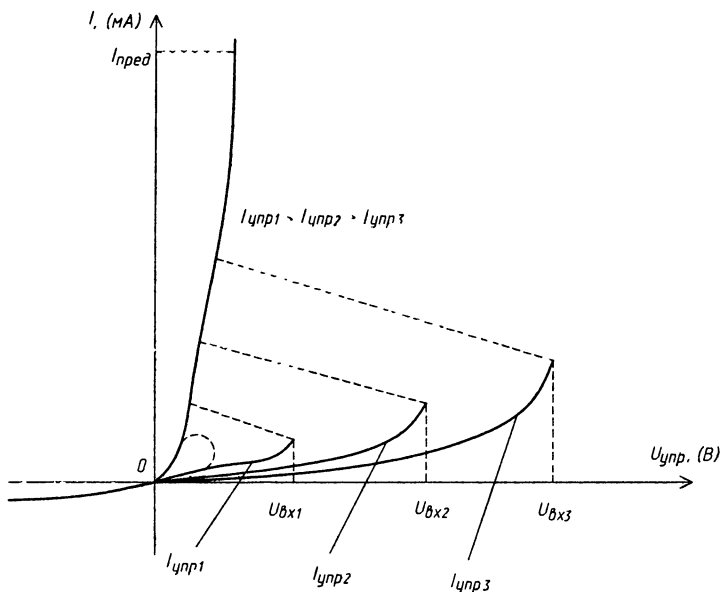


Рис. 72. Семейство вольт-амперных характеристик тринистора

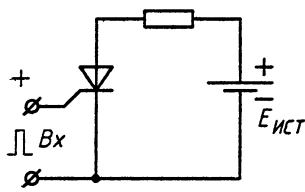


Рис. 73. Типовая схема включения триодного тиристора

Простейшая схема включения тристора с выводом от  $p$ -области показана на рис. 73. Тиристор «открывается» при подаче на управляющий электрод импульса положительной полярности, после чего остается «открытым» независимо ни от чего. «Закрыть» такой тристор можно только путем отключения напряжения источника питания или снижением этого напряжения до уровня ниже порога срабатывания (напряжения открывания).

Впрочем, в самое последнее время появились особые триисторы, «закрыть» которые после срабатывания можно подачей на тот же управляющий электрод короткого импульса обратной полярности.

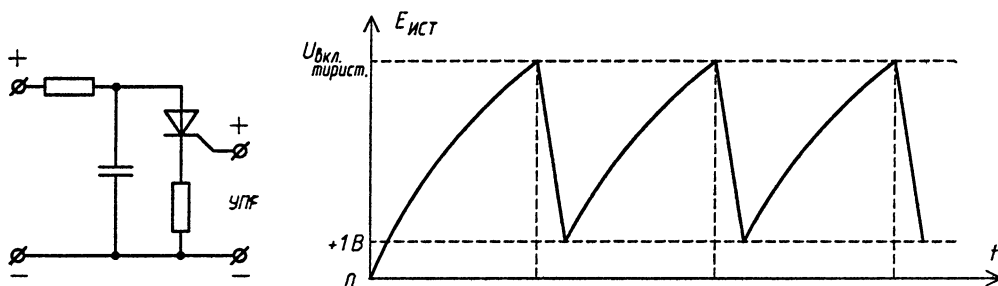


Рис. 74. Схема и форма напряжения генератора пилообразного напряжения на триисторе

Триисторы нашли самое широкое использование в различных схемах автоматики, телемеханике, очень хорошо они работают в схемах генераторов пилообразного тока и напряжения, разряжая конденсатор вместо неоновой лампочки. Схема такого простейшего генератора и график получаемого напряжения приведены на рис. 74.

Ну вот мы и познакомились почти со всеми видами современных полупроводниковых приборов, с некоторыми — поближе, с некоторыми — на уровне «шапочного знакомства». Но именно почти, потому что впереди у нас знакомство с еще одним едва ли не самым важным, самым современным и, безусловно, самым распространенным... даже не знаю, можно ли назвать его прибором? Скорее это сложнейшее самостоятельное законченное изделие на базе и на основе полупроводниковых технологий. Речь идет о микросхемах. Слово это уже прочно вошло в наш сегодняшний лексикон, оно никого не удивляет.

Итак, интегральная микросхема (ИМС) — микроэлектронное изделие, выполняющее определенную функцию преобразования и обработки сигнала и имеющее высокую плотность упаковки электрически соединенных элементов (или элементов и компонентов) и кристаллов, которые с точки зрения требований к испытанию, приемке, поставке и эксплуатации рассматриваются как единое целое.

Это только самое начало, так что читаем, усваиваем и запоминаем дальше.

Элемент интегральной микросхемы — часть интегральной микросхемы, реализующая функцию какого-либо электрорадиоэлемента, которая выполнена нераздельно от кристалла или подложки и не может быть выделена (опять же с точки зрения требований к испытаниям, приемке, поставке и эксплуатации) как самостоятельное изделие. А под понятием «электрорадиоэлементы» в данном случае под-

разумеют отдельные резисторы, конденсаторы, полупроводниковые диоды, транзисторы, тиристоры и пр.

Главная мысль состоит в том, что внутри микросхемы помимо чисто полупроводниковых элементов могут находиться и резисторы, и конденсаторы, и вообще что угодно из электрорадиокомпонентов. Если при этом они «выполнены нераздельно от кристалла или подложки и не могут быть...», ну и так далее, то считаются ее элементами, а если они существуют сами по себе и в микросхему просто вставлены (впаяны), то тогда они называются компонентами интегральной микросхемы.

Кристалл интегральной микросхемы — часть полупроводниковой пластины, в объеме и на поверхности которой сформированы элементы полупроводниковой микросхемы, межэлементные соединения и контактные площадки.

Подложка интегральной микросхемы — заготовка, предназначенная для нанесения на нее элементов гибридных и пленочных интегральных микросхем, межэлементных и межкомпонентных соединений, а также контактных площадок.

Теперь о том, какие именно бывают микросхемы.

Полупроводниковая ИМС — интегральная микросхема, все элементы которой, а также межэлементные соединения выполнены в объеме и на поверхности полупроводника.

Пленочная ИМС — интегральная микросхема, все элементы и межэлементные соединения которой выполнены в виде пленок.

Гибридная ИМС — интегральная микросхема, содержащая кроме элементов еще и компоненты и кристаллы. Частным случаем гибридной ИМС является многокристальная ИМС.

Аналоговая ИМС — микросхема, предназначенная для преобразования и обработки сигналов по закону непрерывной функции.

Цифровая ИМС — микросхема, предназначенная для преобразования и обработки сигналов, изменяющихся по закону дискретной функции.

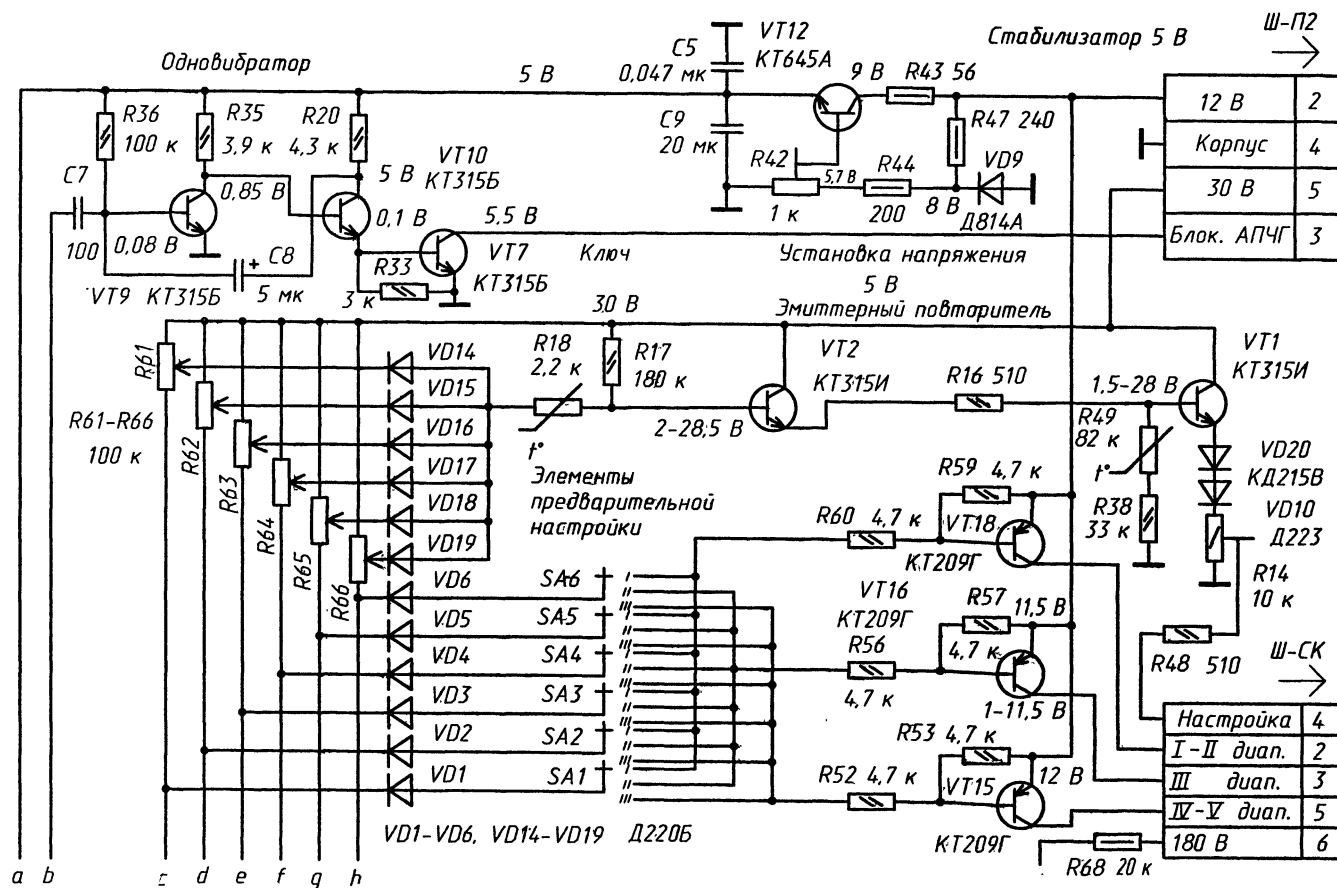
Теперь познакомимся с основными параметрами и характеристиками, характеризующими любую приличную микросхему. Тем более, что их не так уж и много. Например, параметров, имеющих размерность напряжения всего 36 (нет-нет, это не опечатка — их всего тридцать шесть), параметров, имеющих размерность тока, и того меньше, только 28. А параметров, имеющих размерность мощности, смешно сказать, всего только шесть.

Правда, кроме них есть еще 8 параметров, имеющих размерность частоты, 22 параметра — размерность времени, 12 параметров называются «относительными», а остальные 8 параметров вообще отнесены к «прочим параметрам».

Представим себе, что на заводе, где эти микросхемы производят, каждую из них, прежде чем отправить в магазин для продажи, проверяют на соответствие всем перечисленным параметрам без исключения. Так что наша микросхема на самом деле штука достаточно серьезная.

А теперь вопрос. Среди определений, мелькнула такая фраза: «Интегральная микросхема — это изделие с высокой объемной плотностью...» и т. д. Получается, что в одной единице объема (например, в одном кубическом сантиметре) содержится определенное количество дискретных элементов или компонентов.

Определенное количество — это сколько штук? Кубический сантиметр — это приблизительно емкость наперстка. Так сколько внутри наперстка можно разместить отдельных транзисторов, диодов, резисторов, конденсаторов? Десять? Сто? А может, если очень сильно постараться, то и тысяча влезет? Ну, скажем, не тысяча, а хотя бы полтысячи? При этом не забудем, что все эти детали надо не просто втиснуть в наперсток, а соединить между собой проводниками в определенные функциональные схемы и в нужных местах сделать от этих соединений выводы для подключения микросхемы к другим узлам и деталям аппарата или прибора, потому что любая микросхема на самом деле именно так и устроена.



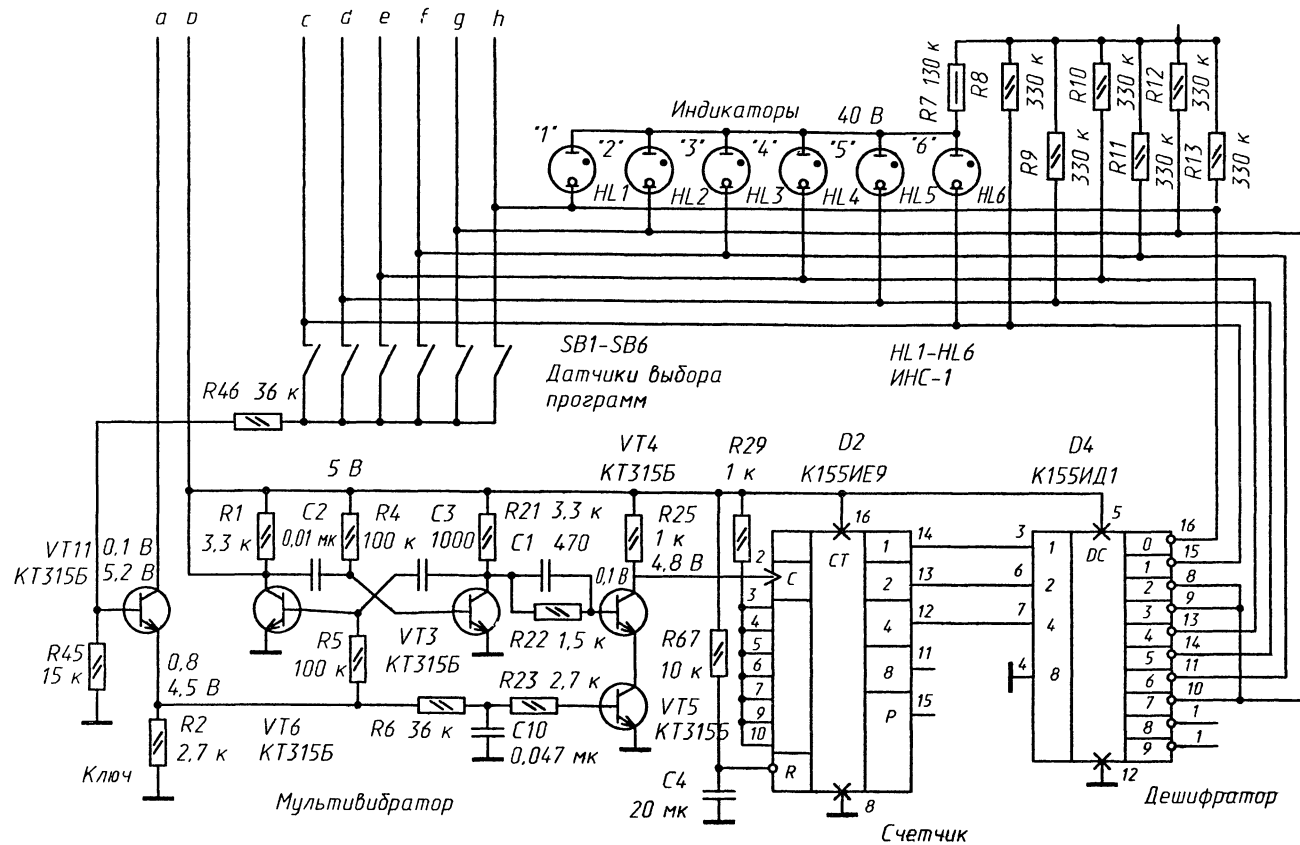


Рис. 75. Принципиальная схема селектора выбора программ промышленного телевизора



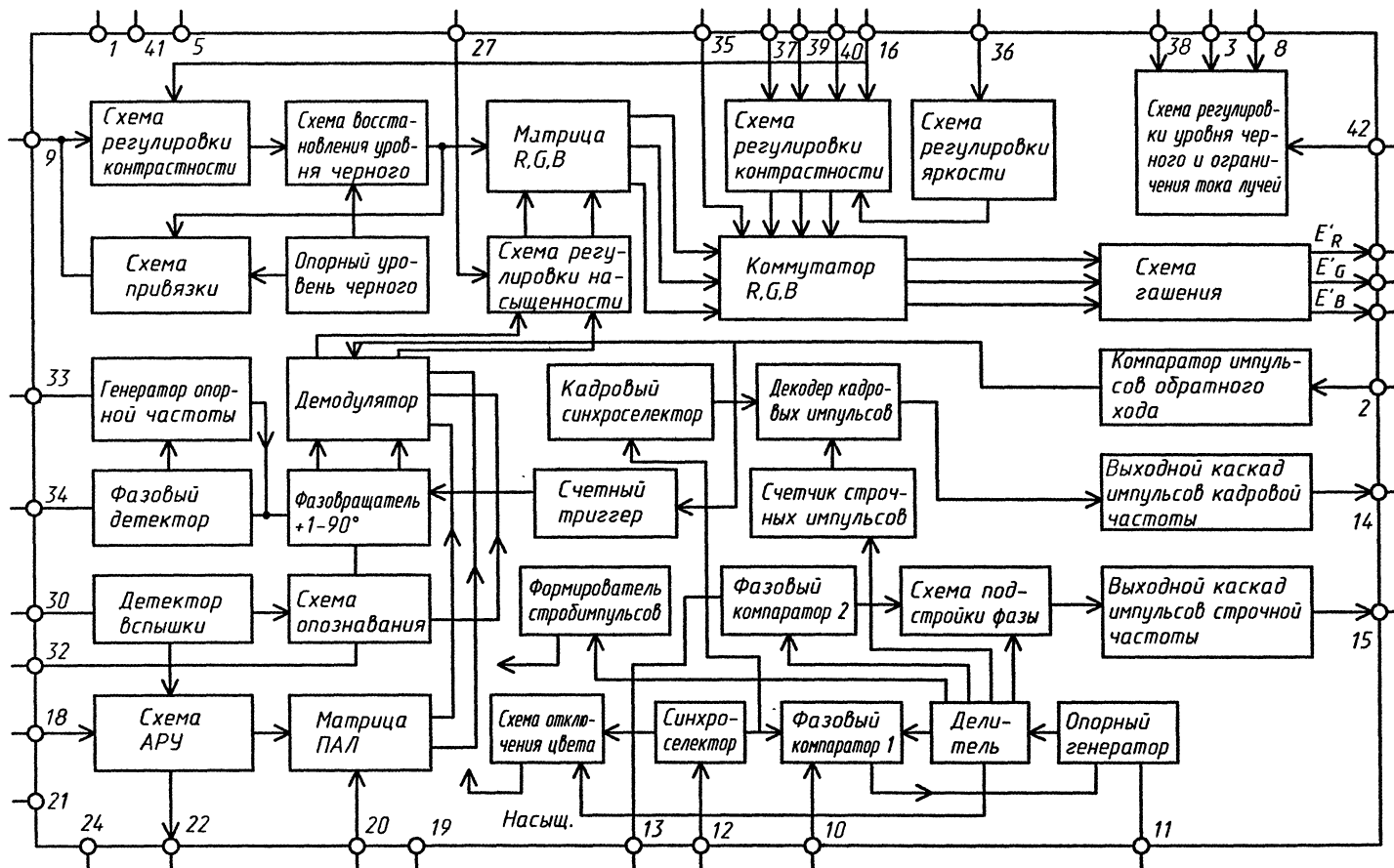


Рис. 76. Функциональная схема микросхемы видеопроцессора STV2-102A

На самом-то деле она устроена вовсе не так. Понятно, что все эти отдельные диоды, транзисторы и прочие элементы не запихнуты в наперсток, а размещены рядышком в одной плоскости на поверхности общего кристалла полупроводника. Поэтому и вопрос надо задать немного иначе: сколько именно таких отдельных элементов можно разместить не в одном кубическом сантиметре, а на поверхности пластинки площадью в один квадратный сантиметр при толщине самой пластины всего в несколько микрон?

Попробуем подойти к теме чуть-чуть с другой позиции. Зададимся вопросом: а вообще микросхема — это что такое? А ответ на этот вопрос начнем искать совсем в другом месте. Вспомним для начала 2-й урок 5-го занятия в этой книге. Вспомним — это значит перелистаем страницы назад, освежим в памяти текст и заодно остановимся на рис. 20.

На этом рисунке изображены функциональные схемы (или иначе — блок-схемы) различных радиоаппаратов, в том числе телевизора. Каждый прямоугольничек на этой схеме символизирует определенный участок полной принципиальной схемы, например УПЧ, детектор, генератор кадровой развертки, схема синхронизации и т. п. Из каких деталей составлен каждый из этих «кусочков», блок-схема не раскрывает. Ее задача показать только, какие в этом аппарате есть функциональные узлы, как они между собой связаны и каковы пути прохождения электрических сигналов между всеми этими прямоугольничками.

На самом деле каждый такой прямоугольник — это реальная часть схемы, в состав которой могут входить несколько транзисторов, диодов, конденсаторов, резисторов. Например, на одном из квадратиков блок-схемы телевизора написано: «Селектор выбора программ». А что на самом деле представляет из себя этот селектор? Ответ на этот вопрос мы найдем на рис. 75.

Этот селектор — целая самостоятельная и весьма сложная схема, по степени сложности и насыщенности отдельными компонентами не уступающая иному приемнику и магнитофону.

А теперь попробуем мысленно уменьшить эту полную схему в 100 раз (включая и реальные размеры всех входящих в нее радиокомпонентов) и «вклеить» эту микрофотографию внутрь квадратика размером 1×2 см, изображающего на блок-схеме селектор выбора программ.

Теперь таким же путем уменьшим мысленно содержимое каждого функционального узла и полученные микрофотографии вклеим во все квадратики блок-схемы телевизора. В результате этой огромной умственной работы мы получили гибрид из функциональной и полной принципиальной схемы телевизора, т. е. если смотреть на такую схему невооруженным глазом, никаких отдельных деталей мы на ней не увидим, а если вооружимся сильной лупой, то увидим, что каждый квадратик... ну, в общем, понятно.

Сколько места занял на листе бумаги этот схемный гибрид? Если грубо, где-то около 200 см<sup>2</sup>. А теперь попробуем эту новую схему опять же мысленно уменьшить еще в 100 раз. Ну если не получится в 100, то хотя бы в 50. Понятно, что это очень трудно, но все же.

Дело в том, что все, что на гибриде нарисовано, надо вместе со всеми потрохами запихнуть внутрь одной интегральной микросхемы, которая, кстати говоря, тоже называется гибридной.

Размеры обычной «стандартной» микросхемы, как правило, составляют (по площади) как раз несколько квадратных сантиметров. Посмотрим на рис. 76, на котором изображена функциональная схема (!) одной реальной микросхемы, в составе которой 34 (!) отдельные функциональные схемы различных усилителей, генераторов, селекторов, демодуляторов, счетчиков импульсов... Там на схеме все они обозначены, можно их прочесть.

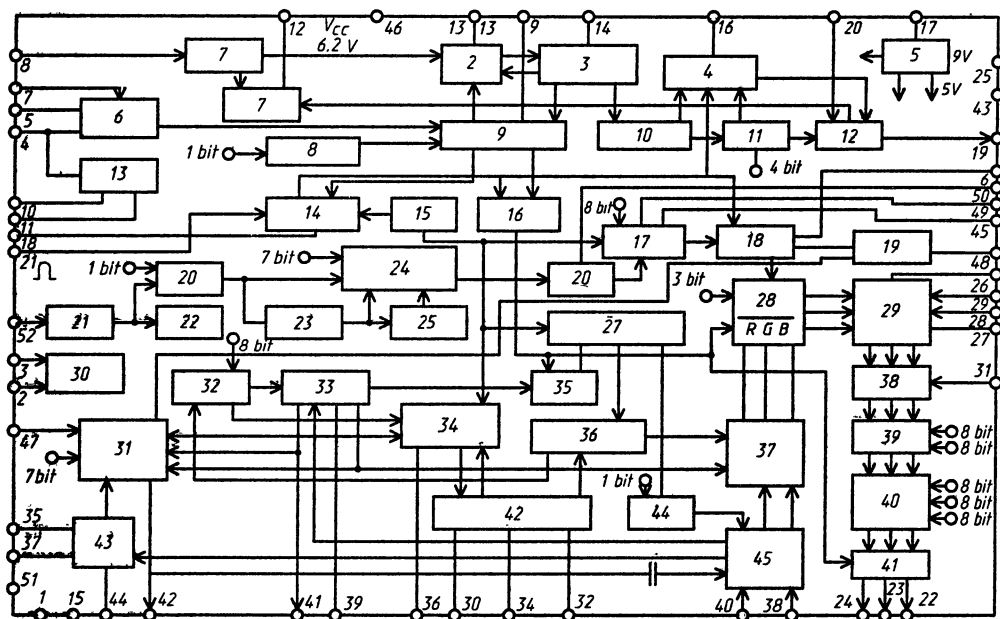


Рис. 77. Структурная схема микросхемы видеопроцессора AN560NK:

1 — селектор строчных синхроимпульсов; 2 — схема автоподстройки частоты и фазы; 3 — умножитель частоты строк; 4 — схема АПЧФ; 5 — узел опорных уровней; 6 — сепаратор кадровых синхроимпульсов; 7 — детектор «петли»; 8 — ключ 50/60 Гц; 9 — счетчик кадровых импульсов; 10 — счетчик строчных импульсов; 11 — схема центровки; 12 — выход синхроимпульса запуска; 13 — обостритель фронтов импульсов; 14 — формирователь SC; 15 — выделение импульсов «вспышки»; 16 — формирователь импульса гашения; 17 — регулировка яркости; 18 — корректор уровня черного; 19 — ключевая схема; 20 — ключ «S/NORV»; 21 — схема фиксации уровня; 22 — линия задержки Y; 23 — задержка t1; 24 — апертурная коррекция; 25 — задержка t2; 26 — повышение четкости; 27 — триггер ПАЛ; 28 — матрица RGB; 29 — ключевые схемы; 30 — контроллер; 31 — усилитель сигнала цветности; 32 — регулятор цветового тона; 33 — выключатель цвета; 34 — фильтр АПЧ; 35 — схема построения опознавания; 36 — расщепление фазы; 37 — демодуляторы; 38 — шумоподавление; 39 — RGB драйверы; 40 — регулировка уровня черного; 41 — схема гашения; 42 — опорный генератор; 43 — АРЦ; 44 — ключ ПАЛ/NTSC; 45 — буфер ПАЛ/NTSC

А называется все это вместе взятое структурной схемой микросхемы видеопроцессора STV2-102A.

Эта микросхема вовсе не самая сложная и насыщенная. Сравним ее с рис. 77, на котором изображена структурная схема другой микросхемы видеопроцессора AN5607NK.

Попробуем ответить на вопрос, что же такое на самом деле микросхема.



Интегральная микросхема (ИМС) — микроэлектронное изделие, выполняющее определенную функцию преобразования и обработки сигнала и имеющее высокую плотность упаковки электрически соединенных

элементов (или элементов и компонентов) и кристаллов, которые с точки зрения требований к испытаниям, приемке, поставке и эксплуатации рассматриваются как единое целое.

Все просто и понятно. А относительно того, сколько все же дискретных элементов (диодов, транзисторов, тиристоров и пр.) может находиться на  $1 \text{ см}^2$  поверхности кристалла микросхемы с высокой плотностью упаковки, то, хотя раз на раз не приходится, средняя цифра колеблется где-то в районе... 10000000 штук.

## Урок 2. ВИДЫ ИСКАЖЕНИЙ СИГНАЛОВ

У нас в руках небольшой карманный радиоприемник с питанием от двух малогабаритных батареек. Мы поймали хорошо слышимую радиостанцию, которая передает очень приятную музыку. Музыка и правда отличная, только слышно ее очень слабо. Мы поворачиваем регулятор громкости в сторону увеличения, громкость совсем чуть-чуть увеличивается, но качество звука при этом становится значительно хуже: к чистому музыкальному звучанию прибавилось какое-то мешающее похрипывание, особенно в наиболее громких местах.

Поворачиваем регулятор громкости до упора, однако громкость при этом больше не увеличивается, зато во много раз увеличиваются новые посторонние звуки, приемник теперь уже откровенно хрипит, хрюкает, визжит, скрипит и вообще издает такое количество каких-то звуков, что сквозь них с трудом прослушивается сама музыка.

Стоит снова уменьшить громкость, как все посторонние звуки сами собой исчезают, а музыка начинает звучать чисто и благородно. Но, правда, опять очень тихо. В чем здесь дело?

Вопрос очень интересный, но вместо того, чтобы получить готовый ответ, попробуем докопаться до истины. А для этого займемся, казалось бы, совершенно посторонним делом, не имеющим к нашей задаче никакого отношения, т. е. возьмем лист бумаги, карандаш или ручку и нарисуем на ней то, что изображено на рис. 78.

Теперь изучим этот рисунок.

Для начала возьмем второй чистый лист бумаги и прикроем им все изображения начиная с № 4. У нас остались три синусоиды в верхнем ряду и три синусоиды в нижнем.

Чем отличаются между собой эти синусоиды в обоих рядах? Совершенно верно: они отличаются друг от друга амплитудой. А периодом они различаются? Нет. А фазой? Тоже нет. Тогда может быть формой? И формой тоже не различаются.

Прекрасно! Значит, эти три синусоиды отличаются друг от друга только амплитудой. А теперь сравним между собой очень внимательно три синусоиды верхнего ряда и соответствующие три синусоиды нижнего: чем они различаются между собой?

Понятное дело, что между собой они ничем не различаются, они совершенно одинаковы.

А теперь представим себе, что все эти синусоиды это и есть та самая прекрасная музыка, которую мы поймали на свой приемник, а размер синусоиды, т. е. ее амплитуда, характеризуют громкость звучания этой музыки. При этом нижний ряд синусоид соответствует карманному приемнику, а верхний ряд — хорошему современному музыкальному центру. Что же касается высоты синусоиды, то они характеризуют максимальную выходную мощность как нашего приемника, так и музыкального центра, притом в одинаковом масштабе.

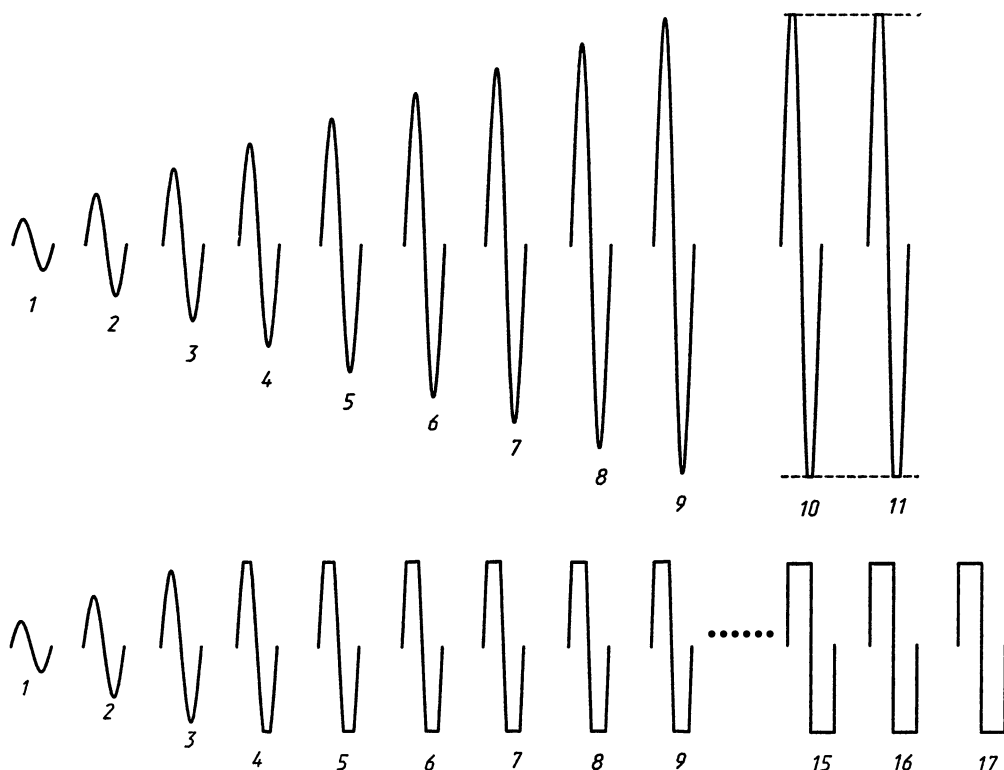


Рис. 78. Механизм возникновения нелинейных искажений сигнала

А что значит максимальная? А это значит, что выше этой мощности приемник воспроизвести просто не может, хоть ты тресни!

Теперь достаем наш теоретический карманный приемник, садимся рядом с музыкальным центром, настраиваем оба приемника на нашу музыкальную станцию и устанавливаем ручками громкости одинаковый уровень, соответствующий синусоиде № 1.

Оба приемника воспроизводят музыку отлично, без всяких помех и искажений, но оба — очень тихо. Просто еле слышно. Чуть-чуть увеличим громкость, до уровня синусоиды № 2. Качество музыки не изменилось, а громкость стала побольше. Прекрасно! Крутим ручку дальше, только понемногу, а не резко.

Громкость звучания обоих приемников (!) увеличивается одинаково при сохранении высокого качества звучания, но только до тех пор, пока уровень этой самой громкости не достигнет значения, соответствующего синусоиде № 3.

Теперь убираем второй лист бумаги, прикрывающий остальную часть рисунка, а регуляторы громкости в обоих приемниках повернем еще немного в сторону увеличения. У музыкального центра это приведет к ситуации, обозначенной синусоидой № 4, а у нашего карманного приемника — синусоидой...

Впрочем, с этой четвертой синусоидой что-то случилось. Во-первых, она не «выросла», а осталась такого же размера, что и предыдущая, третья. А во-вторых, что самое удивительное, она перестала быть синусоидой! То есть, она еще похожа на синусоиду, но у нее как бы отрезали обе верхушки. Тогда как с синусоидой у музыкального центра ничего подобного не произошло. Она продолжает преспокойно расти, не меняясь по форме.

И если будем дальше пытаться увеличить громкость, то это будет происходить только у музыкального центра, а у нашего приемника вместо увеличения громкости будут увеличиваться только искажения. Это станет ясно, если ответить на вопрос, чем различаются между собой все рисунки начиная с четвертого и кончая семнадцатым (а уж тем более двадцатым или сороковым).

А различаются они тем, что чем дальше вправо, тем все меньше форма сигнала становится похожей на исходную синусоиду. А вопли, визги и карканье нашего приемника все меньше становятся похожи на ту приятную музыку, которую он воспроизводил при малом уровне громкости.

Ну, а что же с музыкальным центром? Почему с ним такое не произошло? Посмотрим, что с ним произойдет при переходе от девятой синусоиды к десятой, а затем к одиннадцатой, пятнадцатой, двадцатой. Картина полностью повторилась, но, правда, на более высоком уровне. Но это и не удивительно, поскольку максимальная неискаженная (!) мощность у него в несколько раз больше, чем у нашего приемника. А выше этой своей максимальной мощности и музыкальный центр оказался слабак. Потому что эта самая мощность не зря названа максимальной. А значит, выше быть не может. Как мы уже уточнили, хоть ты тресни!

Ну хорошо, с тем, что уровень громкости в конце концов перестает увеличиваться, еще можно согласиться. Но откуда возникают новые, дополнительные визги и хрюканья, которых в самой музыке не было? Вот это вопрос исключительно важный и на нем необходимо остановиться для более детального рассмотрения.

Теория гласит, что любой негармоничный (читай — несинусоидальный) электрический сигнал — напряжение или ток с помощью математического аппарата можно разложить в так называемый ряд Фурье, представляющий собой алгебраическую сумму гармонических (синусоидальных и косинусоидальных) составляющих — гармоник, частоты которых в кратное число раз (в 2, 3, 4, 5 и т. д. раз) выше частоты основного сигнала, а амплитуды убывают с возрастанием порядкового номера гармоники. Первой гармоникой в таком ряду разложения считается гармоника с частотой самого периодического сигнала.

Из этого определения вытекает, что чисто синусоидальный сигнал никаких гармоник (кроме, разумеется, первой) в своем составе не имеет. Антиподом синусоиды принято считать сигнал П-образной формы, число гармоник которого теоретически бесконечно. Все остальные формы несинусоидальных сигналов так или иначе укладываются в эти пограничные рамки.

Хорошо известно, что в любой аппаратуре проходящий через нее электрический сигнал неизбежно претерпевает те или иные виды искажений. Все эти искажения обычно относят к одному из трех видов: линейные искажения (частотные и фазовые) и нелинейные искажения.

Первые два вида искажений, изменяя амплитуду и фазу сигнала, не влияют на его форму, тогда как третий вид искажений — нелинейные искажения вызывают изменение именно формы проходящего сигнала.

На практике это выглядит так, что в выходном сигнале после его прохождения через электрический тракт появляются новые частотные компоненты (составляющие), которых не было во входном сигнале.

Совершенно очевидно, что это и есть те самые высшие гармоники, которые возникли в процессе обработки сигнала за счет нелинейности характеристик активных схемных элементов (радиоламп, транзисторов, микросхем), которые и привели к искажению формы входного сигнала.

Если речь идет о низкочастотном (звуковом) спектре, то нелинейные искажения вызывают заметное на слух нарушение воспроизводимого аппаратурой звучания по сравнению с исходным (оригинальным). Эти искажения принимают форму раз-

личных хрипов, появления разных несвойственных данному инструменту или голосу призывков, снижению разборчивости речи и прозрачности музыкального содержания.

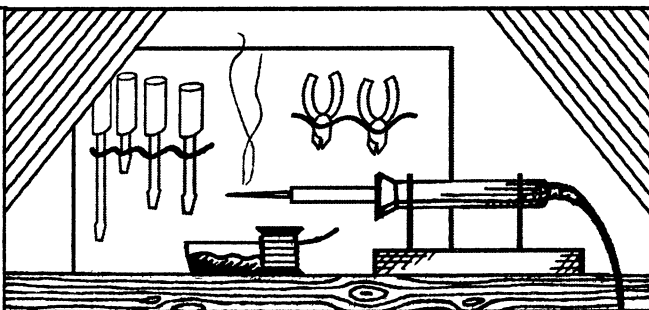
Оценка степени искажения сигнала за счет возникновения нелинейных искажений сводится к определению количественного соотношения между суммой амплитуд всех гармоник выше первой и амплитудой самой первой гармоники и выражается, как правило, в процентах.

Поэтому в паспорте любого приемника, магнитофона или телевизора мы обязательно найдем строчку с указанием величины максимальной неискаженной мощности при соответствующей этой мощности величине коэффициента нелинейных искажений (в процентах). У музыкального центра эта цифра вполне может быть порядка 0,1...0,5% при выходной мощности десятки ватт, тогда как у нашего «карманника» уже при мощности 0,25...0,5 Вт эти самые нелинейные искажения могут оказаться порядка 5...10%, что и объясняет его повышенную склонность к хрюканью и карканью при попытке превысить эту ограниченную неискаженную выходную мощность.

Так что теперь будем знать, что если приемник имеет неискаженную выходную мощность всего 1 Вт, то совершенно бесполезно заставлять его конкурировать по громкости с хорошим «Панасоником» или «Филипсом» — кроме эффекта жалкого хрюканья это все равно ни к чему не приведет, сколько бы мы не крутили вправо ручку громкости. Хоть до упора.

Вот поэтому, если идти по улице с орущим маломощным плеером, то издавать он будет только нечленораздельные звуки.

## Рабочее место



Сегодня мы продолжим оборудовать рабочее место очередным измерительным прибором. У нас за плечами уже солидный теоретический багаж и вполне достаточный практический опыт изготовления самостоятельных конструкций, а трудностей мы не боимся — мы их преодолеваем и попутно учимся на своих же собственных ошибках. Так что вперед, к новым творческим успехам !

Прибор этот называется генератором звуковых частот. Его принципиальная схема приведена на рис. 79. Абсолютно ничего нового, чего бы мы уже хорошо не знали, на этой схеме нет.

Первые два транзистора со всеми относящимися к ним деталями образуют генератор синусоидальных сигналов низкой (звуковой) частоты с использованием моста Вина, работу которого мы самым доскональным образом разбирали на втором уроке предыдущего 9-го занятия и схема которого приведена на рис. 61,б.

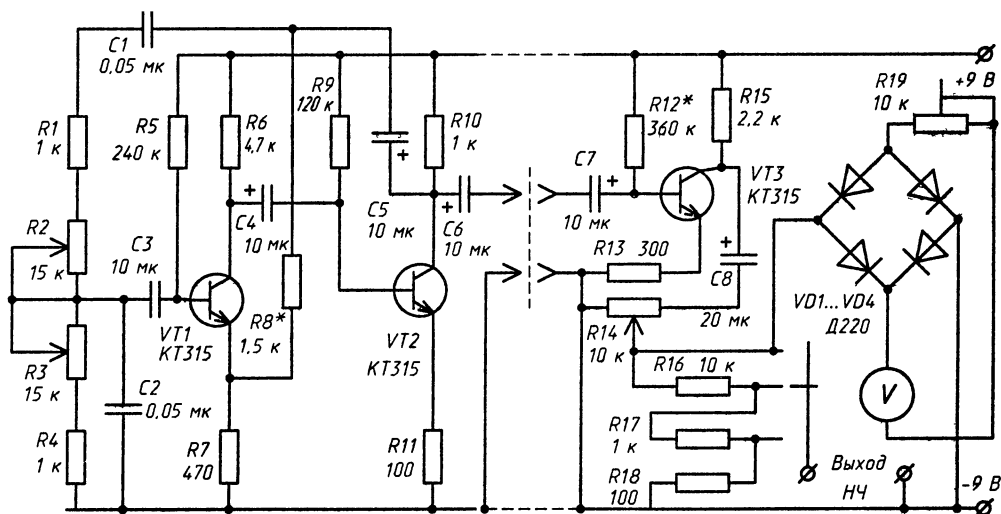


Рис. 79. Принципиальная схема генератора звуковой частоты

Генераторная часть прибора заканчивается левее вертикальной пунктирной линии, где изображен двухполюсный разъем. На самом деле в конструкции прибора такого разъема нет, а нарисован он на схеме для того, чтобы подчеркнуть, что оставшая часть прибора правее пунктирной линии, не обязательно должна быть точно такой, как на схеме. В частности, усилитель вполне может быть более мощным, например двухтактным, коммутатор пределов измерения может иметь другое число пределов (шкал), вольтметр может быть не аналоговым, а цифровым, и т. д.

В нашем варианте правая часть схемы также не нова. Однокаскадный резистивный усилитель на транзисторе по схеме с общим эмиттером нам хорошо знаком. Если есть сомнения, то вернемся назад и посмотрим рис. 50 и 56. Мостовая схема выпрямителя к вольтметру — это вообще тема первой книги («Азбука радиолюбителя»), так же, как и резистивный делитель (аттенюатор), предназначенный для десятикратного (в 10 раз) изменения уровня выходного сигнала.

Генератор с мостом Вина — схема исключительно надежная, устойчивая, многократно проверенная и широко используемая во многих генераторах промышленного производства, так что в этом смысле никакие трудности и сюрпризы нас не ожидают, если мы внимательно отнесемся к монтажу и не допустим грубых ошибок.

Одной из важных деталей является сдвоенный потенциометр  $R2R3$ , с помощью которого регулируется (изменяется) рабочая частота генератора. Сдвоенный (в отличие от спаренного) — это такой, оба резистора которого управляются одной общей осью. Сопротивление этих резисторов, вообще говоря, может быть и иным (например,  $2 \times 22$  кОм). Это отразится только на диапазоне генерируемых частот, который все равно придется устанавливать в процессе регулировки прибора.

Качество генерируемого сигнала (т. е. его форма и величина нелинейных искажений) существенно зависит от величины сопротивления резистора  $R8$ . Именно поэтому он на схеме помечен «звездочкой» (\*), что означает необходимость установления его величины опытным путем (т. е. подбором) в процессе регулировки.

Точно так же придется подобрать по минимальным искажениям и величину резистора  $R12$  в каскаде усилителя, поскольку она существенно зависит как от группы транзистора (буквенный индекс: например, KT315B или KT315 V), так и от конкретного экземпляра.



Все эти регулировочные работы возможно проводить только при наличии осциллографа. Поэтому придется поискать обладателей такого прибора среди друзей-радиолюбителей или обратиться за помощью в местный радиоклуб.

По уже установившейся традиции мы предлагаем готовый рисунок печатной платы (рис. 80) и одновременно призываем не обращать на него внимания, а составить рисунок печати самостоятельно. Во-первых, это интереснее, чем просто копировать чужую идею, а во-вторых, намного полезнее, поскольку обогащает личный практический опыт.

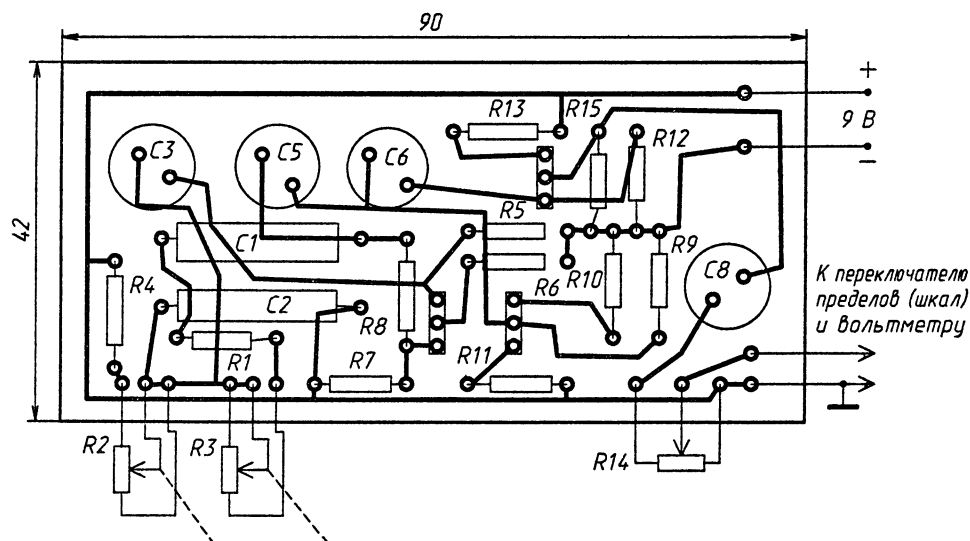


Рис. 80. Печатная плата генератора

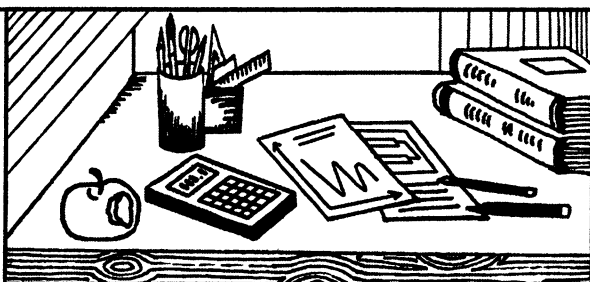
Что касается конструкции, то здесь вообще все зависит от того, какими деталями мы располагаем. Это в первую очередь относится к типу измерительной головки и к виду переключателя (кнопочный на базе П2К или галетный).

Важным элементом конструкции любого генератора (и этого в том числе) является шкала отсчета частот. В любом случае она должна быть крупной, удобочитаемой, с четкими рисками и разборчивой оцифровкой значений частоты. Ось регулирующих частоту потенциометров должна быть связана со стрелкой-указателем настолько жестко и надежно, чтобы полностью исключалась возможность их относительного смещения в процессе эксплуатации, иначе это неминуемо приведет к нарушению первоначальной градуировки шкалы.

Теперь еще раз внимательно осмотрим рабочее место, точно определим место, где новый прибор будет постоянно находиться, продумаем, как в этом случае наиболее удобно расположить органы управления на его передней (а может, верхней или боковой) панели и решим заранее вопрос с его питанием.

# ЗАНЯТИЕ ОДИННАДЦАТОЕ

## Теория



## Урок 1. МЕХАНИЧЕСКАЯ И ОПТИЧЕСКАЯ ЗАПИСЬ / ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ ЗВУКА

История так называемой механической звукозаписи начинает свое исчисление от 18 сентября 1888 года, когда американцу Томасу Альба Эдиссону был выдан патент № 15944 на изобретение под названием «Фонограф».

Фонограф Эдиссона представлял собой устройство, в котором носителем звукозаписи являлся особый цилиндр с нацарапанной на нем спиральной канавкой.

В процессе записи звука эту канавку наносил на вращающийся с постоянной скоростью цилиндр особый механический резец (он назывался рекордер), поперечные колебания которого в точности повторяли колебания воздуха, вызываемые источником звука.

В фонографе этот цилиндр вращался с такой же скоростью, что и при записи, а поперечные колебания с канавки считывала специальная головка, острая стальная игла которой была жестко связана с подвижной мембраной. Колебания мембраны возбуждали воздушные колебания в особом резонаторе, выполненном в форме рупора, из расширяющейся части которого и исходил звук.

На рис. 81 приведена конструкция фонографа, представленная в патенте самим Эдиссоном.

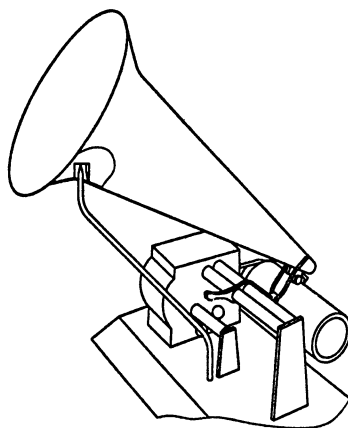


Рис. 81. Конструкция первого в мире аппарата звукозаписи (фонографа Эдиссона)

За сто с лишним лет, прошедших с тех пор, фонограф претерпел множество чисто конструктивных усовершенствований, однако ни идея, ни принцип механической записи и воспроизведения не претерпели никаких изменений. «Звуковой цилиндр» давно заменили плоские винилитовые диски — грампластинки, вместо пружинного привода с заводной ручкой вращение диска осуществляют электродвигатели со сложными системами поддержания постоянства скорости вращения, считывание фонограммы производится с помощью высокочувствительных магнито- и пьезоэлектрических воспроизводящих головок, внутри спиральной канавки несущая информация записывается раздельно на ее внутренней и наружной боковых поверхностях, обеспечивая передачу стереофонической записи, быстро изнашивающуюся стальную иглу заменили практически вечные иглы из корунда и сапфира.

В современных проигрывателях грампластинок (электрофонах) записанный на диске сигнал, прежде чем превратиться в звук, проходит несколько стадий превращения сначала из механических колебаний иглы в электрический низкочастотный сигнал, который затем подвергается значительному усилению по напряжению и по мощности, частотной коррекции и только после этого снова преобразуется в механические (звуковые) колебания при помощи электромеханических преобразователей самого различного вида и конструкций (головные телефоны, встроенные одиночные громкоговорители или мощные «звуковые колонки»).

Но, несмотря на все эти усовершенствования, сделавшие современные системы механической грамзаписи не имеющими ничего общего с первым фонографом Эдиссона, принцип механической записи звука остался неизменным и не претерпел никаких изменений.

Конец безраздельному господству эдиссоновской системы положило изобретение лазерно-цифрового принципа записи/воспроизведения информации на специальные так называемые компакт-диски, и сейчас мы подробнее познакомимся с этой новой системой.

Если для воспроизведения грамзаписи использовались устройства, объединяемые общим названием электрофон (граммофон, проигрыватель), то устройства для воспроизведения с компакт-дисков получили название в виде краткой аббревиатуры CD.

Коммерческое название «CD-плеер» образовано из английской аббревиатуры CD, представляющей первые буквы термина «компакт-диск». Среди пользователей этого вида продукции нет единогласия в вопросе о том, что следует подразумевать под понятием «компакт». Некоторые считают, что это относится к геометрическим размерам носителя — диска диаметром в 12 см и толщиной всего в 1,2 мм. Другие относят это определение к плотности записи и объему хранимой информации. Для обычных односторонних и однослойных компакт-дисков она составляет 0,6...0,65 гигабайт (Гбайт), а для двусторонних четырехслойных дисков (типа DVD) — 9,4 Гбайт. Скорее всего, и те и другие по-своему правы, тем более, что отдельные фирмы освоили и уже начали серийный выпуск плееров, работающих как от 12-сантиметровых, так и от самых новейших 8-сантиметровых дисков.

CD-плееры — детище элементной базы новейшего поколения. Их создание оказалось бы вообще невозможным без наличия сложнейших многофункциональных микропроцессоров и системных контроллеров, а также маломощных полупроводниковых оптических лазеров.

При кажущейся внешней простоте CD-плеер представляет собой сложнейшую электронно-оптико-механическую систему высокой, если не сказать — прецизионной точности, оперирующей с механическими перемещениями, измеряемыми

микронами, и электрическими сигналами, частоты которых выдерживаются с точностью до пятого знака после запятой, а в ряде узлов — с точностью до фазы.

По общей идеологии процесса переноса аудиоинформации от микрофона в студии к звукоизлучателю слушателя CD-плеер сродни обычной грамзаписи. И в том и в другом случае первичный сигнал, соответствующим образом преобразованный в чисто механические изменения структуры носителя, последовательно «укладывается» вдоль спиралевидной звуковой дорожки на вращающемся диске носителя.

Процессы, происходящие при записи информации на диск, и процессы, происходящие при считывании информации, по существу взаимнообратны (как бы зеркальны). Впрочем, на этом сходство грампластинки и компакт-диска и заканчивается.

На грампластинке в механической аналоговой форме записывается электрическая версия акустических колебаний и в такой же форме воспроизводится электрофоном. В случае с компакт-диском электрическая версия исходной аудиоинформации еще до записи на диск преобразуется в сложный по своему составу цифровой код, содержащий помимо собственно аудиоинформации целый ряд других цифровых кодов так называемой служебной информации, призванной обеспечить работоспособность многочисленных рабочих узлов CD-плеера. И только после этого сформированный «комплексный» сигнал в цифровой форме записывается на рабочую поверхность диска в виде чисто механических изменений рабочей (несущей информацию) поверхности диска.

При обратном процессе «считывания» информации в CD-плеере происходит сложный процесс разделения всего потока информации на «рабочую» и «служебную», переработка полезной информации из цифровой формы в аналоговую и только после этого восстановленная электрическая версия исходного сигнала передается на стандартный УНЧ для воспроизведения.

То, что мы прочли в двух предыдущих абзацах, на самом деле не дает никакого представления о фактической сложности преобразований, происходящих в реальном CD-плеере. А поскольку мы решили всерьез познакомиться со схемотехникой и особенностями конструкции CD-плееров, начнем с простого перечисления его основных узлов и их функционального назначения.

Для начала то, что попроще, а именно: какие функции в отличие от проигрывателя обычных грампластинок обеспечивает CD-плеер, используя сигналы одной только служебной информации.

1. Одновременную загрузку нескольких компакт-дисков, воспроизведение которых возможно в любой последовательности с помощью команд с пульта управления или автоматически по заранее введенной программе.

2. Возможность работы с дисками разных диаметров (12 или 8 см).

3. Выведение на дисплей оглавления диска в процессе его загрузки.

4. Выведение на дисплей информации о порядковом номере записи на диске и длительности звучания.

5. Автоматическое начало воспроизведения сразу после загрузки.

6. Быстрый поиск нужной фонограммы в ускоренном режиме вперед и назад.

7. Воспроизведение фонограмм в любой последовательности.

8. Возможность многократного повтора одной фонограммы.

9. Предварительное программирование последовательности воспроизведения отдельных фонограмм.

10. Наличие встроенной системы автоматического самоконтроля и тестирования основных узлов CD-плеера с выдачей результатов проверки в форме цифробуквенных кодов на собственный дисплей.

Знакомясь с этим отнюдь не исчерпывающим списком, надо ясно представлять, какие схемные и конструктивные узлы и детали стоят за каждым из этих пунктов. Между тем помимо чисто «сервисных» функций, перечисленных выше, служебная информация «руководит» механическим управлением считывающей лазерной головки, включающим в себя постоянное слежение за размером и формой светового пучка на поверхности рабочего слоя диска и его фокусировкой, удержанием светового пучка на информационной дорожке, радиальным перемещением головки по мере вращения диска и т. п.

А еще служебная информация не дает считывающей головке соскочить со считываемой дорожки при случайных сотрясениях и ударах, а ежели такое случается, то немедленно возвращает головку на прежнее место, не допуская при этом потери даже ничтожной части информации. И это, повторимся, только результаты «работы» сигналов вспомогательной, служебной информации.

Что же касается последовательности процессов обработки основной аудиоинформации, она в достаточно сокращенном варианте приводится ниже.

1. Считывание информации с диска оптической лазерной головкой.
2. Преобразование модулированного оптического сигнала в электрический.
3. Усиление, первичная обработка, фильтрация сигнала и формирование прямоугольных импульсов.
4. Выделение синхрои́мпульсов из общей смеси сигналов.
5. Демодуляция сигнала.
6. Восстановление искусственно введенного при записи нарушения последовательности записываемых байтов информации (так называемого перемежения) — деперемежение байтов.
7. Декодирование информации при помощи перекрестного контроля так называемой избыточности — специально вводимых в процессе записи вспомогательных элементов информации.
8. Интерполяция и коррекция возникающих ошибок.
9. Цифровая фильтрация сигнала.
10. Демультимплексирование сигнала.
11. Обратное цифро-аналоговое преобразование сигнала.
12. Обработка и фильтрация аналогового сигнала от остатков цифровой информации.
13. Передача готового сигнала в тракт звуковоспроизведения.

И здесь, как и в случае со служебной информацией, за каждым пунктом приведенного перечня скрывается целый комплекс электрических активных и пассивных преобразователей и «переработчиков» сигнала, реализованных в многофункциональных процессорах и контроллерах, декодирующих микросборках, диодных матрицах и т. п.

В CD-плеерах разных фирм основу электрической части составляют, как правило, от трех до пяти микросхем высокой степени интеграции. При этом чаще всего на основной плате располагаются микросхемы процессора сервосигналов, обеспечивающих позиционирование и перемещение лазерной считывающей головки, цифрового сигнального процессора и быстродействующие усилители мощности для управления приводами электродвигателей и соленоидами фокусировки и трекинга.

Здесь, возможно, будет уместным пояснить, что под термином «трекинг» (а более точно — радиальный трекинг) понимается процесс слежения за движением сфокусированного лазерного пучка по информационной дорожке компакт-диска.

В отличие от аудиоплеера CD-плееры довольно редко используются как «носимые», предусматривающие питание от гальванических элементов и работающие на головные телефоны. Гораздо чаще CD-плееры входят в состав высококлассных

радиокомплексов, музыкальных центров, автомагнитол или реализуются в виде самостоятельного проигрывателя лазерных дисков с питанием от силовой сети.

Отчасти это объясняется тем, что портативные «носимые» CD-плееры (к примеру, модель SL-SX500 фирмы Panasonic) при полезной выходной мощности на головных телефонах в несколько милливольт требуют для своей работы источник питания с напряжением не ниже 4,5 В и при этом потребляют мощность порядка 6 Вт. Кроме того, просто нерентабельно использовать такую сложную, высококлассную и сравнительно дорогую технику для слушания музыки «на ходу» или стоя в переполненном вагоне метро.

Чтобы уточнить, что подразумевается под термином «высококлассная», достаточно привести данные электрического тракта автомобильного CD-плеера CDX-P620S фирмы Pioneer:

Диапазон воспроизводимых частот, Гц .....	5 ...20000
Динамический диапазон, дБ .....	90
Отношение сигнал/шум, дБ .....	92
Коэффициент гармоник, % .....	0,005
Степень разделения стереоканалов, дБ .....	75
Коэффициент детонации .....	ниже пределов восприятия

Не сомневаюсь, что физический смысл каждого из приведенных параметров тебе понятен, поскольку все это мы уже проходили.

Наиболее характерной и специфичной составной частью CD-плееров, резко отличающей этот вид БРА от всех остальных видов, безусловно является узел полупроводникового считывающего лазера. Не имея возможности детально и подробно рассмотреть работу этого механизма, все же попробуем сделать это хотя бы в общих чертах.

Однако для понимания физики его работы и сущности самого процесса считывания информации совершенно необходимо хотя бы в двух словах познакомиться как с идеей нанесения информации на диск, так и с конструкцией (или точнее структурой) самого компакт-диска.

В наиболее простом варианте (однослойная односторонняя запись) компакт-диск представляет собой круглую пластину диаметром 12 см, толщиной 1,2 мм с центровым отверстием диаметром 15 мм для установки на дисковод плеера. Вокруг этого центрального отверстия имеется небольшая «мертвая зона» шириной в 9 мм для прижима диска к дисководу. В отличие от грампластинки запись и воспроизведение информации начинаются от центра диска и заканчиваются на его периферии. Рабочая часть диска ограничена изнутри и снаружи так называемыми зонами вводной (ширина 4 мм) и выводной (ширина 1 мм) дорожек.

Собственно носителем информации служит исключительно тонкий металлический (как правило, алюминиевый) светоотражающий слой, в котором в процессе записи записывающий лазер выжигает круглые отверстия, диаметр которых равен диаметру сфокусированного луча — приблизительно 0,8 микрон (мкм). Глубина отверстий составляет около 0,13 мкм.

Но поскольку в процессе записи диск непрерывно вращается, выжигаемые лазерным лучом отверстия из круглых превращаются в эллиптические, а в промежутках между двумя соседними импульсами лазера поверхность отражающего слоя остается неповрежденной.

По принятой терминологии прожженные лазером эллипсы называют питами, а неповрежденные и потому отражающие считывающий лазерный луч участки между двумя соседними питами — флэтами.

Сменяющие друг друга питы и флэты располагаются друг за другом вдоль спиральных канавок, составляющих информационное поле компакт-диска. Схемати-

ческий чертеж стандартного компакт-диска и его торцевой разрез показаны на рис. 82.

В CD-плейере происходит следующее: после установки считывающего лазера точно над началом вводной дорожки (этот процесс называется начальным позиционированием лазера) и началом вращения диска падающий на пластину сфокусированный лазерный луч отражается от флэтов и не отражается от питов. В результате отраженный от диска луч оказывается промодулированным по интенсивности импульсным сигналом, несущим точную информацию о соотношении длин соседних питов и флэтов, а именно в этих соотношениях и заключена полная информация в цифровой форме.

Вся дальнейшая информация поступает на обработку в электронную часть CD-плейера, а из электронной части соответствующая служебная информация поступает на участки схемы, узлы и блоки, отвечающие за состояние фокусировки лазерного луча, обеспечение правильного трекинга и текущего позиционирования самого лазера.

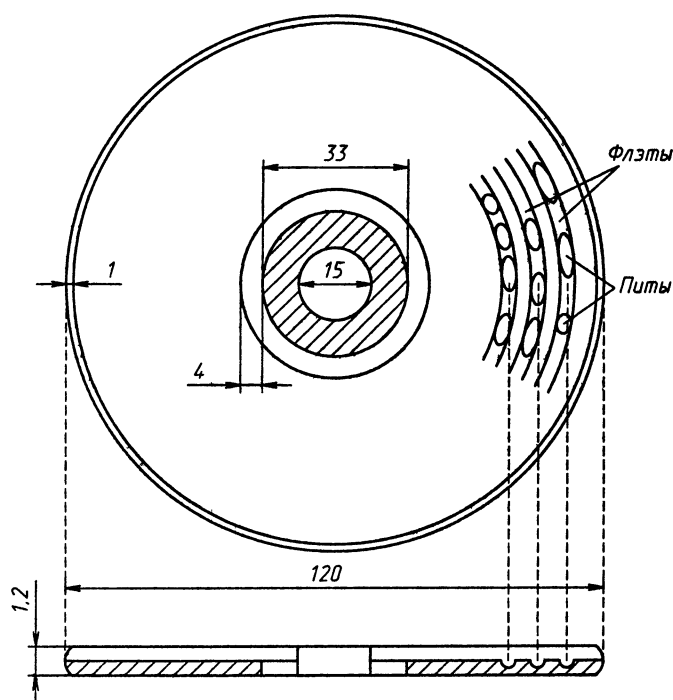


Рис. 82. Схематическое устройство компакт-диска

Особо следует сказать о механизме вращения компакт-диска. Если в системе грамзаписи скорость вращения диска остается неизменной, а линейная скорость прохождения дорожки под иглой звукоснимателя, напротив, непрерывно изменяется, уменьшаясь от начала пластинки к ее концу, что, кстати говоря, практически никак не отражается на параметрах воспроизведения записи, то в CD-плейере картина прямо противоположная.

Поскольку специфике цифровой записи-воспроизведения предпочтительней неизменная скорость смены элементов информации (питов и флэтов), приходится делать переменной скорость вращения компакт-диска. Эту работу берут на себя процессор и контроллер особой системы управления двигателем дисковода. Эта

же система управляет вращением и реверсированием двигателя при исполнении команд поиска и группирования по заданной программе последовательности воспроизведения, а также выборке отдельных музыкальных записей.

Все это распрекрасно и замечательно, но куда же за всеми этими питами, флэтами, процессорами, контроллерами и прочими трекингами девалась сама звуковая информация? Где, в конце концов, слова и музыка?

А никуда она не девалась. Она незримо присутствует в этом сложнейшем потоке цифровой информации в виде одного из информационных блоков и преспокойно дожидается своей очереди, когда отдельная микросхема с помощью цифроаналогового преобразователя (ЦАП) осуществит обратное преобразование нескончаемого потока цифр в привычные для нас с тобой синусоиды, которые затем будут обработаны в самом обыкновенном УНЧ и воспроизведены в виде звуков через акустические системы, о которых мы отдельно поговорим на втором уроке после небольшого перерыва.

Что же касается более подробного знакомства с механизмом такого преобразования, то мы сможем вернуться к этому не раньше, чем познакомимся с общим принципом цифровой обработки информации. А это еще впереди.

## Урок 2. КОЕ-ЧТО ОБ ЭЛЕКТРОАКУСТИКЕ

Электроакустика как неотъемлемая часть радиовещания является довольно самостоятельной и специфичной областью, занимающей место посредине между «чистой» акустикой (как разделом физики) и радиоэлектроникой. Это приводит к тому, что электроакустика оперирует понятиями и единицами измерения, присущими только ей, поэтому для успешного понимания дальнейшего изложения совершенно необходимо с этими понятиями познакомиться, чтобы исключить весьма распространенную путаницу в терминологии.

Громкоговоритель (или акустическая система) — АС.

Это отнюдь не то, что на радио жаргоне называют «динамиком». Это — пассивный электроакустический преобразователь, предназначенный для излучения звука в окружающее пространство.

Громкоговоритель (или АС) обязательно содержит одну или несколько излучающих головок (это как раз и есть жаргонный «динамик»), корпус (или футляр), а также (необязательно) специальные конструкционные материалы и элементы, предназначенные для улучшения качества звучания. В зависимости от конструкции футляра и наличия вспомогательных элементов все громкоговорители и АС делятся на четыре категории: открытого типа; закрытого типа (или компрессионные); с фазоинверторами; с пассивным излучателем.

Головка громкоговорителя представляет собой электромагнитно-механический прибор, преобразующий чисто электрические колебания «звукового диапазона» в чисто механические колебания воздушной среды — звуковые волны. Чтобы быть абсолютно точным, надо добавить, что помимо электромагнитных головок существуют и другие типы преобразователей: конденсаторные, пьезоэлектрические, электростатические (так называемые блаттхалеры), однако в современной БРА массового пользования они встречаются крайне редко.

По способу образования звуковых волн принято подразделять головки громкоговорителей на диффузорные и мембранно-рупорные, однако последние в массовой БРА практически не используются: их основное назначение — озвучивание больших открытых пространств (площадей, стадионов и т. п.)



Что касается применяемых в БРА диффузорных головок, то в зависимости от диапазона воспроизводимых частот их принято разделять на низкочастотные (от 25...30 Гц до 2...4 кГц), среднечастотные (от 200 Гц до 5...8 кГц), высокочастотные (от 3 до 30 кГц) и широкополосные (от 30...40 Гц до 16...20 кГц).

В абсолютном большинстве монофонической БРА настольного и переносного типа сегодня применяется одна или две широкополосные головки электромагнитного типа. В некоторых более дорогих моделях они дополняются малогабаритными высокочастотными головками небольшой мощности, которые нередко размещают на специальном кронштейне непосредственно перед диффузором основного широкополосного излучателя.

В стереофонической аппаратуре класса Hi-Fi (Hi-END) в качестве излучателей звука, как правило, применяются две консольные акустические системы, содержащие каждая от 2 до 6 (и более) головок с разной полосой пропускания, а также так называемые пассивные излучатели, о которых мы поговорим чуть позже.

Одна из разновидностей стереофонии — квадрофония требует наличия не двух, а четырех разнесенных в пространстве АС.

Любой громкоговоритель (АС) характеризуется, как минимум, шестью основными показателями, с которыми имеет смысл познакомиться подробнее.

Под *чувствительностью* электроакустического преобразователя понимают величину реального звукового давления, которое он создает в точке на расстоянии 1 м по оси излучения при подведении к его электрическому входу переменного напряжения звуковой частоты величиной 1 В.

Из этого определения вытекает, что чувствительность громкоговорителя (АС) не связана с частотой подводимого сигнала, а поэтому для разных частот может иметь разные значения. Это позволяет, изменяя частоту сигнала, построить кривую зависимости реального звукового давления от частоты сигнала или, иначе, частотную характеристику звукового давления (отдачи).

Наряду с этим параметром существует понятие стандартное звуковое давление (СЗД), отличающееся тем, что ко входу громкоговорителя подводят звуковой сигнал не 1 В, а величиной 0,1 Вт, что исключает зависимость параметра от величины полного сопротивления (импеданса) громкоговорителя. В качестве варианта СЗД документами МЭК (Международная электротехническая комиссия) допускается производить измерение при подведении к громкоговорителю электрической мощности не 0,1 Вт, а 1,0 Вт, что бывает необходимо при испытании мощных АС. Чтобы различать между собой эти два способа испытаний, параметр, определяемый по методике МЭК, называют в отличие от СЗД характеристической чувствительностью (ХЧ). Все эти три параметра оцениваются в специальных «акустических» единицах измерения — Па (Паскаль).

Степень широкополосности громкоговорителя (АС) характеризует другой показатель — *диапазон воспроизводимых частот*. Оценка по этому параметру производится путем анализа реальной характеристики СЗД или ХЧ громкоговорителя, а не прямым измерением, и при этом результат оценки напрямую зависит от принятого (или установленного стандартом) другого важнейшего показателя — неравномерности частотной характеристики в пределах рабочего диапазона частот.

Поэтому правильнее говорить о диапазоне воспроизводимых частот при заданной неравномерности. Чтобы эти тонкости стали более осязаемыми, на рис. 83 приведена характеристика СЗД некоего отвлеченного громкоговорителя, снятая по звуковому давлению в диапазоне от 16 Гц до 32 кГц. По оси абсцисс величина звукового давления выражена в относительных логарифмических единицах — дБ (децибеллах). В этих же единицах обычно выражается и степень допустимой неравномерности характеристики СЗД.

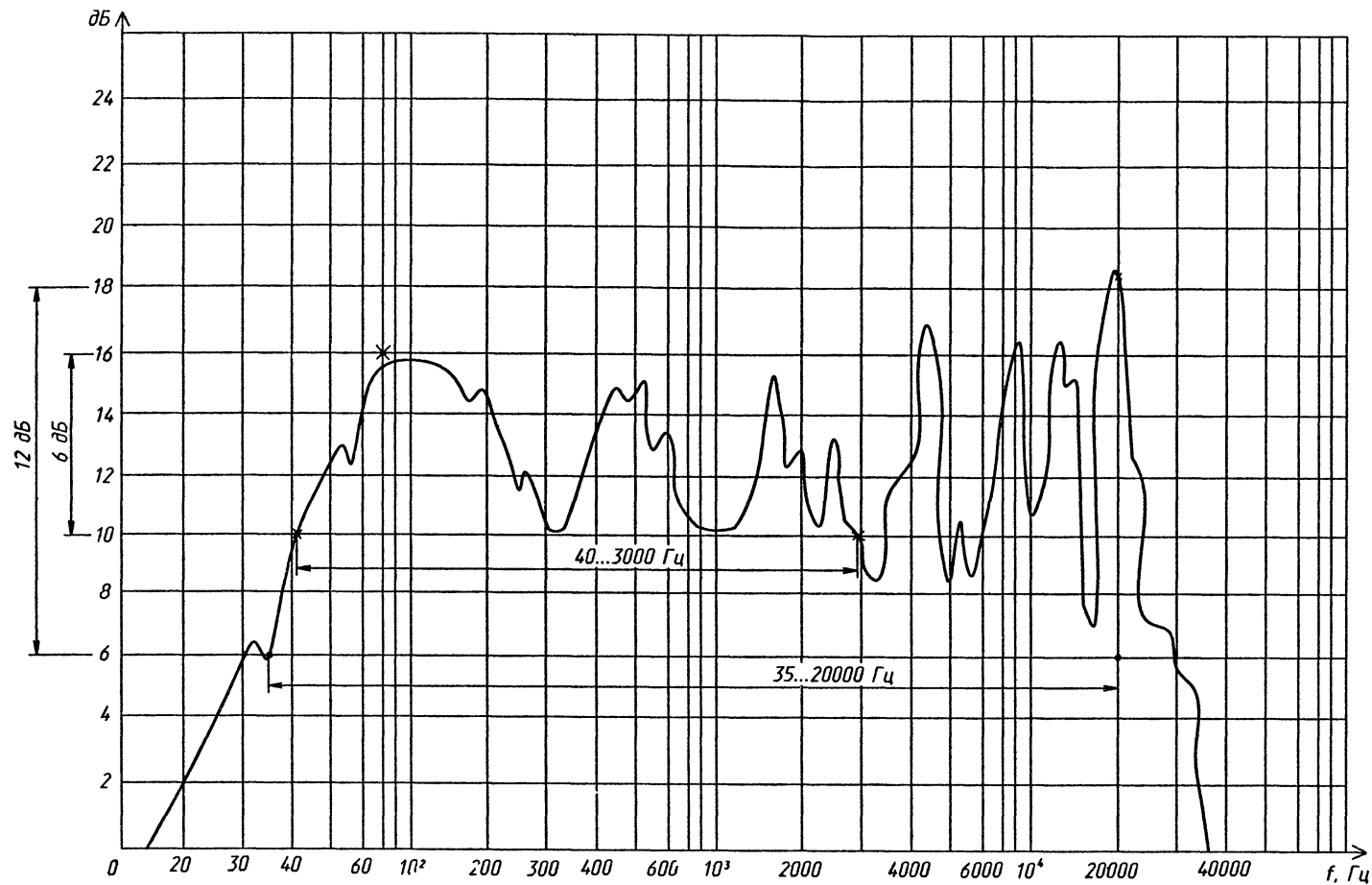


Рис. 83. Взаимозапись понятий «полоса воспроизводимых частот» и «неравномерность частотной характеристики»

Из графика ясно видно, что если допустимую неравномерность принять равной 12 дБ, то рабочая полоса воспроизводимых частот составит 35...20000 Гц, а при допустимой неравномерности в 6 дБ полоса воспроизведения сузится до размеров 40...3000 Гц. Как видим, разница получилась огромная, и «широкополосный» громкоговоритель сразу превратился в «низкочастотный».

Специфика этой проблемы всегда состояла в том, что любой реальный громкоговоритель в силу особенностей конструкции обладает целым рядом механических резонансов, обуславливающих появление глубоких «выбросов» и «впадин» на характеристике излучения.

Такие выбросы и впадины, сильно увеличивая значение неравномерности, на самом деле незначительно влияли на реальную, воспринимаемую «на слух» полосу воспроизводимых частот, что, собственно говоря, хорошо видно и из приведенного рисунка. Поэтому ГОСТами на проведение акустических испытаний, с одной стороны, допускалось оценивать полосу воспроизводимых частот при достаточно большой величине неравномерности (порядка 12...16 дБ), а с другой стороны, разрешалось не принимать во внимание наибольший выброс и наибольшую впадину. Этот прием впоследствии стал называться «нормализацией» (или неким усреднением) реальной характеристики излучения.

При оценке номинальной мощности излучателя наблюдается такая же взаимосвязь с возникающими искажениями звука, что и в предыдущем случае. Другими словами, номинальную выходную мощность нельзя однозначно определить или установить, не увязав ее с величиной нелинейных искажений, создаваемых самим излучателем.

Физика процесса состоит в том, что при достаточно малых амплитудах колебания диффузора и подвижной системы, включающей звуковую катушку, последняя совершает линейные колебания внутри магнитного зазора, что обеспечивает относительно линейный характер зависимости формы звуковых колебаний от формы подводимых к катушке электрических колебаний.

По мере увеличения подводимого электрического сигнала увеличивается мощность излучения звука, но одновременно за счет увеличения амплитуды колебаний звуковой катушки она с какого-то момента начинает выходить за пределы внутреннего магнитного зазора, возникает так называемый краевой эффект, в результате которого имевшаяся линейная зависимость нарушается, что и приводит к появлению нелинейных искажений.

Величина этих искажений стремительно возрастает по мере увеличения подводимого сигнала, что приводит к совершенно недопустимым (на слух) искажениям звука. Поэтому ГОСТом максимальная величина мощности громкоговорителя (равно как и излучающей головки) определяется значением максимально допустимых нелинейных искажений.

Входным элементом электродинамической головки является цилиндрическая звуковая катушка (однослойная или многослойная), намотанная медным (иногда алюминиевым) проводом на бумажном каркасе и помещенная в рабочий зазор магнитной системы. Такая катушка обладает одновременно активным сопротивлением, обусловленным сопротивлением медного провода и не зависящим от подводимого сигнала, и реактивным (индуктивным) сопротивлением, которое, напротив, увеличивается с увеличением частоты подводимого сигнала.

Поэтому ГОСТ определяет входное сопротивление головки как сумму активной и реактивной составляющих полного сопротивления, измеренного на частоте 1000 Гц.

Для излучателей отечественного производства установлены несколько стандартных значений полного сопротивления: 4,0; 8,0; 16,0 и 50,0 Ом. В аппаратуре

импортного производства иногда могут встречаться излучатели с другими значениями полного сопротивления.

Немного раньше было сказано, что в зависимости от оформления АС их подразделяют на четыре группы. Рассмотрим теперь каждую из них подробнее.

### СИСТЕМЫ ОТКРЫТОГО ТИПА

Прежде всего ознакомимся с такими понятиями, как акустическое короткое замыкание и отражательная доска, без чего будет трудно понять принцип конструирования любых АС.

Диффузорная излучающая головка издает звук путем создания механических колебаний частиц воздуха, расположенных перед диффузором. Диффузор работает наподобие поршня, создавая перед собой попеременное то относительное уплотнение воздуха, то его относительное разрежение. Столб воздуха перед диффузором (а стало быть, и интенсивность воспроизводимых звуков) был бы значительно более плотным, если бы не одно «но».

Дело в том, что при движении диффузора вперед перед ним создается сжатие воздуха, но одновременно с этим с тыльной стороны диффузора создается равное по величине разрежение. Естественно, что слой сжатого воздуха непосредственно перед диффузором вместо того, чтобы передавать сжатие дальше, устремляется в область разрежения, огибая края диффузора и нейтрализуя избыточное давление перед диффузором. Происходит так называемое акустическое короткое замыкание, резко снижающее эффективность работы излучателя.

Для борьбы с этим злом необходимо как-то изолировать преддиффузорное пространство от задиффузорного.

Идеальным решением проблемы было бы размещение излучателя на абсолютно жесткой плоскости неограниченной площади с отверстием, равным диаметру диффузора. И хотя такое решение абсолютно нереально, оно тем не менее предопределило путь, по которому пошли конструкторы АС.

Одиночный излучатель стали размещать на доске ограниченного размера, в центре которой вырезалось отверстие, равное диаметру диффузора. Надо отметить, что звуковые волны, как и любые другие, характеризуются длиной волны, поэтому эффект акустического короткого замыкания (АКЗ) сказывается по-разному для звуков разной высоты тона. Больше всего от АКЗ страдают самые длинные волны.

По мере укорочения длины волны эффект АКЗ ослабевает, поэтому излучатель, работающий без отражательной доски, в первую очередь теряет более низкие частоты, тогда как на наиболее высоких частотах излучаемого диапазона эффектом АКЗ можно даже пренебречь.

Отсюда понятно стремление конструкторов максимально увеличивать размер отражательной доски. И тут им на помощь пришло «спасительное» решение. Оказалось, что края отражательной доски можно, образно говоря, «загнуть» в сторону тыльной стороны диффузора, заменив большую плоскую доску прямоугольным ящиком без задней стенки. Такая замена как бы сохраняла площадь отражательной доски, существенно уменьшая внешние размеры конструкции. Так появились акустические системы открытого типа.

Эти системы обеспечивали вполне удовлетворительное воспроизведение самых нижних частот звукового диапазона, не снижая «отдачи» звуковой головки, но тем не менее оставались достаточно громоздкими. Для снижения размеров футляра напрашивалось очень простое на первый взгляд решение: закрыть наглухо открытый сзади футляр, полностью изолировав пространства спереди и позади диффузора, что будет эквивалентно отражательной доске неограниченных размеров.

Однако на деле это оказалось не так. Дело в том, что, закрыв наглухо футляр, мы тем самым создаем герметичный цилиндр, в котором диффузор излучателя выполняет роль поршня. И если в открытой системе движение диффузора вперед никак не препятствовало созданию равного разрежения позади него, то в герметичном цилиндре движению диффузора вперед будет энергично препятствовать создаваемое им же разрежение в цилиндре. Иными словами, для раскачивания диффузора до той же амплитуды в закрытой системе к головке потребуется подводить значительно большую электрическую мощность, т. е. КПД закрытой системы значительно ниже КПД открытой системы.

И тем не менее закрытые АС (иначе их называют «компрессионными») не только нашли широчайшее распространение, но на сегодня в массовой БРА почти полностью вытеснили системы открытого типа. Последние сохранились в основном в аппаратуре самого высокого класса с преимущественно ламповыми УСЗЧ.

С появлением мощных транзисторов для оконечных каскадов полупроводниковых УСЗЧ, обеспечивающих неискаженную выходную мощность усилителя в десятки и даже сотни ватт при исключительно высоком КПД усилителя, сделали несущественным главный недостаток компрессионных АС — их низкий КПД. В то же время компрессионные АС имеют ряд неоспоримых преимуществ перед системами открытого типа.

1. Полностью исключено акустическое короткое замыкание между фронтальной и тыльной сторонами диффузора громкоговорителя, что увеличивает относительную (но не абсолютную!) отдачу на крайних низших частотах и, следовательно, уменьшает общую неравномерность частотной характеристики за счет этой части спектра.

2. За счет того, что диффузор работает как поршень в закрытом цилиндре, резко возрастает сопротивление внутреннего объема воздуха в футляре, что приводит к быстрому затуханию свободных колебаний диффузора, а это эквивалентно увеличению фактора демпфирования.

3. За счет относительного улучшения излучения нижних частот (см. п. 1) удается существенно уменьшить габариты футляра при сохранении качества звучания в басовом регистре.

Что касается двух других систем — с фазоинверторами и пассивными излучателями, то прежде чем переходить к их описанию, следует остановиться на следующих соображениях. Для достоверного воспроизведения звука АС должна обеспечивать достаточную мощность во всей полосе воспроизводимых частот звукового спектра — практически от 16...20 Гц вплоть до 20...22 кГц.

С этими параметрами напрямую связан выбор типов и количества громкоговорителей, способных решить эту задачу. Здесь нам снова потребуется небольшое отступление в область теории, без чего многое из дальнейшего может оказаться непонятным. Начнем с физики работы громкоговорителя. Для эффективного излучения самых низких частот диффузор громкоговорителя должен иметь максимально возможную излучающую поверхность (площадь конуса), предельно мягкую подвеску (эластичный гофр и небольшую упругость подвеса), что влечет за собой достаточно большую инерционность всей системы. Впрочем, на низших частотах диапазона это практически не сказывается отрицательно на качестве звучания басовых инструментов.

Для эффективного воспроизведения высших частот диапазона (начиная с 8...10 кГц) требования к громкоговорителю меняются на прямо противоположные. Диффузор может быть очень небольшого размера, но обязательно жестким: очень часто для достижения этой цели бумажный диффузор пропитывают бакелитовым лаком, а у наиболее дорогих моделей (преимущественно западных фирм) делают из пластмассы или легкого дюрала. Подвеска катушки делается весьма жесткой и максимально безынерционной.

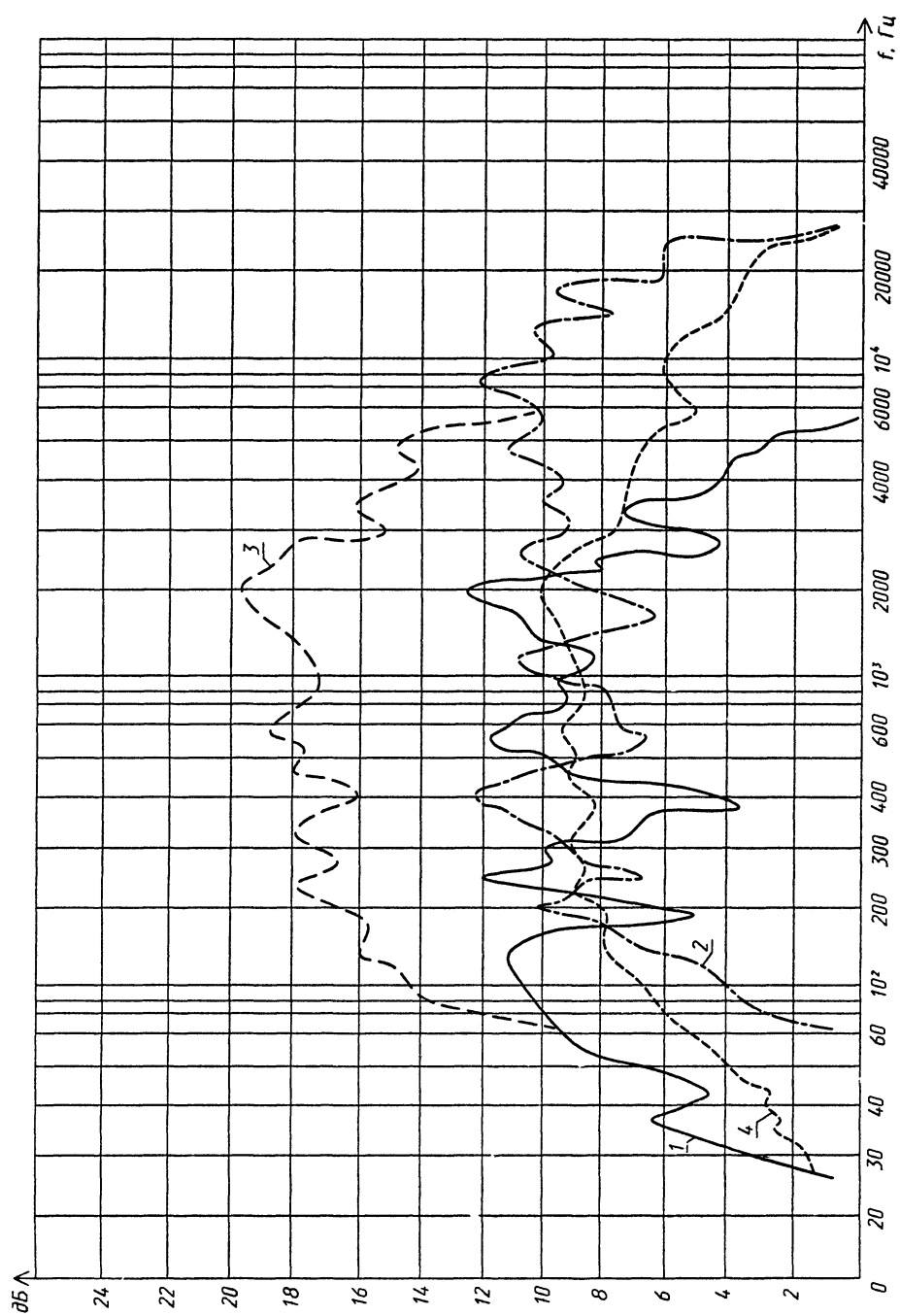


Рис. 84. Снижение суммарной неравномерности АЧХ  
путем совместного использования нескольких излучающих головок

Даже уже сказанного достаточно, чтобы понять, что для эффективного излучения широкого спектра частот одним громкоговорителем не обойтись. И действительно, абсолютное большинство широкополосных акустических систем состоит из трех и более разных излучателей.

Почему из трех, а не из двух? Потому что хороший низкочастотный громкоговоритель с низкой частотой собственного механического резонанса эффективно излучает лишь частоты не выше 4...6 кГц, а высокочастотные головки начинают работать с частот 8...10 кГц, поэтому средний участок рабочего диапазона попадает в «зону провала».

Чтобы этот участок заполнить, обычно в состав системы включают третий, так называемый широкополосный громкоговоритель средней мощности (3...5 Вт), к относительно большому диффузору которого приклеен небольшой жесткий конус для улучшения излучения высоких частот. И хотя мера эта в известной мере паллиативная, все же удается достичь полосы частот у таких громкоговорителей в пределах от 60...80 Гц до 10...12 кГц с приемлемой степенью неравномерности. Слова «с приемлемой степенью неравномерности» снова возвращают нас к прямой зависимости реальной полосы воспроизведения АС от степени этой самой неравномерности. И тут выясняется, что степень неравномерности СЗД отдельной излучающей головки, которая не может быть изменена никакими ухищрениями, сравнительно легко поддается корректировке (в сторону уменьшения) с помощью ряда специальных мер в процессе конструирования АС третьего и четвертого типов.

Первая из этих мер — соответствующий подбор типов излучающих головок, формирующих полный спектр. На рис. 84 кривая 1 представляет собой кривую СЗД некоего гипотетического низкочастотного излучателя, а кривая 2 — среднечастотного. Излучатели подобраны так, чтобы «выбросы» одного по возможности совпадали со «впадинами» другого. Кривая 3 является суммой кривых 1 и 2.

Для большей наглядности эта кривая уменьшена по высоте в два раза и преобразована в кривую 4. Даже визуально становится очевидным, насколько суммарная характеристика СЗД двух грамотно подобранных громкоговорителей равномернее характеристики каждого из них отдельно.

Впрочем, такое идеальное сочетание характеристик двух разнотипных излучателей встречается не часто, однако установлено, что увеличение числа разных типов головок в одной АС заметно нивелирует общую кривую СЗД всей системы. Именно поэтому в дорогих импортных АС число отдельных головок нередко приближается к десяти.

Для борьбы с другими остаточными выбросами и провалами существует немало различных способов. Так, для устранения отражений звуковых волн от противоположных внутренних стенок самого футляра широко применяется оклейка стенок звукопоглощающими материалами или специальными «рассеивающими» отражателями либо даже заполнение внутреннего пространства футляра специальной ватой.

Для ликвидации очень глубокой впадины на какой-то одной частоте внутри футляра может быть помещен специальный трубчатый резонатор, настроенный точно на эту частоту.

Совсем иной принцип положен в основу работы так называемых акустических фазоинверторов и систем с пассивным излучателем. Оба эти метода применимы только для АС компрессионного (закрытого) типа и преследуют цель устранения недостатков, присущих именно этим системам.

Физически фазоинвертор представляет собой открытую с двух сторон трубу-резонатор, настроенную на частоту, незначительно отличающуюся от собственной резонансной частоты головки низкочастотного излучателя (в пределах 2/3 октавы). Нередко фазоинвертор выполняют не в виде трубы, а в форме прямоугольного ко-

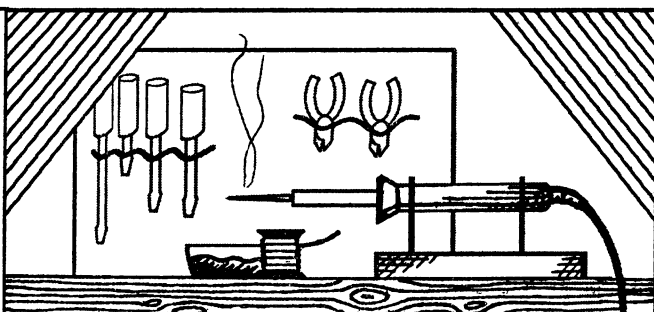
роба. Инвертор, как правило (но не обязательно), размещают на передней панели АС ниже низкочастотного излучателя, «врезая» его в соответствующее отверстие (или щель) на передней панели.

Физика работы, а особенно методика математического расчета фазоинвертора, достаточно сложны для подробного анализа на нашем с тобой уровне, поэтому ограничимся лишь констатацией того, что за счет определенного сдвига фаз звуковых волн внутри футляра АС удастся существенно повысить отдачу АС на самых низких частотах рабочего диапазона.

Недостатком фазоинвертора является определенная трудность (а иногда и невозможность) его настройки на оптимальную резонансную частоту, поэтому альтернативой ФИ явились системы с так называемыми пассивными излучателями (ПИ). В этих системах роль ФИ выполняет дополнительный низкочастотный излучатель, лишенный магнитной системы и звуковой катушки. При работе основного низкочастотного излучателя диффузор ПИ приходит в «индуцированное» возбуждение на собственной резонансной частоте, изменять которую значительно легче, чем резонансную частоту трубы ФИ.

В заключение отметим, что системы с фазоинверторами и пассивными излучателями, как правило, применяются только в наиболее дорогих (преимущественно зарубежных) моделях Hi-Fi (Hi-END) — аппаратуры и обеспечивают реальную полосу звуковоспроизведения 25...22000 Гц при неравномерности в несколько единиц децибелл.

## Рабочее место



На рабочем столе есть настольная лампа. Самая обыкновенная, на устойчивой массивной подставке с собственным выключателем или «переноска» с удобной прищепкой. Ну и, разумеется, с ввернутой в патрон лампочкой мощностью... 40 Вт? 60? 75? Может, все 100? Какой мощности должна быть лампочка в настольной лампе у радиолюбителя?

40 Вт, конечно, явно маловато, особенно при осуществлении монтажных работ. 60 или 75 — пожалуй, достаточно для большинства случаев. Но когда приходится без лупы читать номинал на резисторе типа УЛМ, 100 Вт было бы в самый раз.

Но ведь не будешь же каждый раз ввинчивать, вывинчивать разные лампочки для каждого случая. Конечно же нет. Да и нет в этом никакой необходимости, если оборудовать настольную лампу очень простым приспособлением — регулятором напряжения на тиристоре.

Что такое тиристор и как он работает, мы уже знаем. Остается только собрать простенькую схему, изображенную на рис. 85. Два левых (входных) контакта предназначены для включения в осветительную сеть при помощи обычной вилки, к двум правым подключается непосредственно настольная лампа.



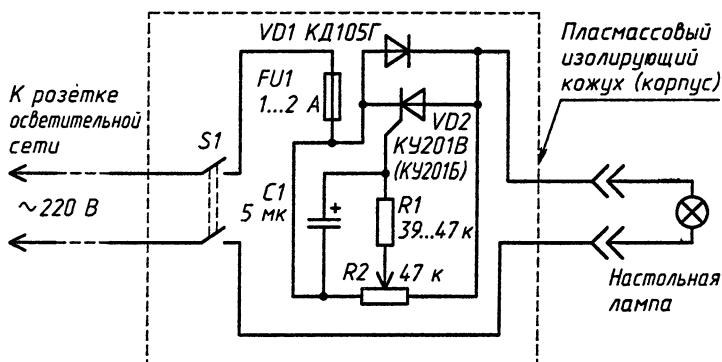


Рис. 85. Схема тиристорного регулятора яркости для настольной лампы

Схема настолько проста, что уже не представляет никаких трудностей. Однако новыми окажутся повышенные требования к технике безопасности, потому что практически все элементы схемы прямо (гальванически) связаны с силовой сетью напряжением 220 В и могут представлять прямую угрозу для жизни.

Основной смысл рекомендаций по монтажу регулятора сводится к одному: должна быть однозначно и на 100% исключена всякая возможность прикосновения к любой детали регулятора после завершения монтажа и установки регулятора на его постоянное место. Таким местом может быть либо корпус (основание) настольной лампы, либо специальная розетка для подключения лампы непосредственно на верхней или боковой плоскости стола.

Невозможно заранее порекомендовать ни рисунок печатной платы, ни размеры коробочки, внутри которой будут размещены все детали регулятора, не зная, какими именно будут эти детали. Лучше всего начать с подбора всех деталей, затем на их основе скомпоновать конструкцию (по возможности максимально компактную), а уже под эту конструкцию выбрать подходящего размера и объема обязательно пластмассовую коробочку (например, обыкновенную мыльницу).

Что за детали использованы в схеме? Начнем с регулятора яркости. Возможны два принципиально разных решения. Можно применить потенциометр с так называемым выключателем сети, и тогда отпадает необходимость в отдельном выключателе на самой настольной лампе. Такими потенциометрами являются ТК и ТКД. Они должны быть с линейной зависимостью (кривая «А»). Особое внимание обратим на декоративную ручку, которая будет надета на ось потенциометра. Диаметр этой ручки со стороны отверстия (основания) обязательно должен существенно превосходить диаметр шайбы и гайки, используемых для крепления потенциометра к корпусу коробочки, чтобы до них было невозможно случайно прикоснуться!

Если же мы решим оставить «штатный» выключатель на самой лампе, тогда можно применить практически любой другой тип потенциометра (но также обязательно с кривой «А»).

Теперь тиристор. Если мы откроем любой справочник по полупроводниковым приборам, то в разделе незапираемые тиристоры найдем не менее полутора сотен разных типов, так что выбор достаточно обширен и в определенной мере произволен. Хотя и здесь есть вполне логичные ограничения. Например, нет никакого смысла применять тиристор, напряжение открывания которого 300, 600 или 1000 В. Такой тиристор просто не откроется при напряжении сети 220 В.

На схеме указан тиристор типа КУ201 с напряжением включения 50 В, но вполне можно использовать, к примеру, тиристор типа КУ101Б с таким же напряже-

нием. Важно лишь, чтобы максимально допустимый ток через него был не меньше тока, протекающего через лампочку. А он легко определяется по величине мощности лампочки. Например, для лампочки мощностью 100 Вт при напряжении сети 220 В номинальный ток составит  $100 : 220 = 0,45$  А. На такой же ток должен быть рассчитан и диод *VD1* при допустимом обратном напряжении не менее 250 В. Таким же во избежание случайностей лучше выбрать и рабочее напряжение для конденсатора *C1*. Номинальный ток предохранителя должен быть не меньше 1 А и не больше 2 А.

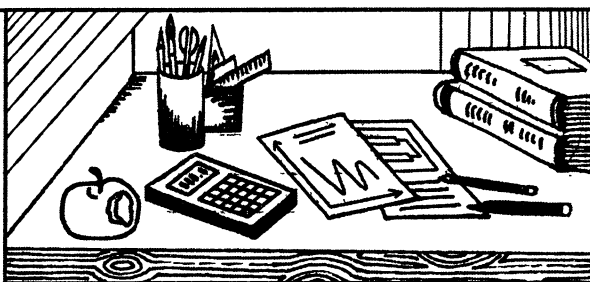
Вот, пожалуй, и все, что касается описания схемы и конструкции. А в заключение еще и еще раз о технике безопасности:



*Категорически запрещается производить какие-либо монтажные, ремонтные или регулировочные работы с открытым и включенным в сеть регулятором напряжения!*

# ЗАНЯТИЕ ДВЕНАДЦАТОЕ

## Теория



## Урок 1. МАГНИТНАЯ ЗВУКОЗАПИСЬ

Магнитный способ записи/воспроизведения, названный так по сущности физического процесса, появился почти на полвека позже изобретения Эдиссона, однако не сумел вытеснить старый, механический способ. Оба они просуществовали фактически до нынешнего времени, хотя в самые последние годы в связи с появлением лазерной звукозаписи грампластинки стали сдавать позиции.

Как говорит само название, процессы записи и воспроизведения информации напрямую связаны с какой-то формой магнитного воздействия на носитель информации. Это действительно так, причем сам носитель информации определился не сразу, а прошел несколько экспериментальных стадий.

Исторически самым первым таким носителем была обыкновенная стальная струнная проволока, которая в процессе записи равномерно (т. е. с постоянной скоростью) перематывалась с одной катушки на другую и одновременно подвергалась воздействию переменного магнитного поля, создаваемого в специальной катушке переменным электрическим током звуковой частоты, который, собственно, и содержал информацию, подлежащую записи.

При воспроизведении осуществлялась зеркальная операция: намагниченная соответствующим образом в процессе записи проволока протягивалась с той же скоростью мимо аналогичной катушки, наводя в ней ЭДС, которая изменялась по тому же закону, что и электрический ток в катушке записи.

Эта первая техника была весьма несовершенна, качество звучания было существенно хуже, чем при грамзаписи, однако новая система обладала одним неоспоримым преимуществом перед грамзаписью: информацию на магнитный носитель можно было многократно записывать и стирать, причем делать это мог сам потребитель в домашних условиях.

Новая система, как и положено, совершенствовалась постепенно. Первый шаг был сделан, и начался долгий путь. Работы шли параллельно по трем направлениям: проводились глубокие научно-теоретические исследования с целью опреде-

лить оптимальные параметры всей системы, шли интенсивные поиски оптимального носителя и, наконец, совершенствовалась сама записывающая и воспроизводящая техника.

Результатом этих работ стали первые промышленные магнитофоны (так были названы эти новые аппараты), выпуск которых был освоен практически одновременно в нескольких странах. Это были громоздкие, тяжелые установки с двумя или тремя разными электродвигателями, тремя разными головками для записи, воспроизведения и стирания старых записей. Запись осуществлялась не на проволоку, а на специальную «магнитную» ленту.

Лента представляла собой негорючую пластмассовую основу толщиной порядка 50 микрон и шириной 6,25 мм, на одну сторону которой был нанесен рабочий слой из порошкообразного магнитного материала — окисла железа со связующим наполнителем (лаком). Она наматывалась на специальные бобины диаметром в 20...25 см (!) и протягивалась мимо записывающей или считывающей головки со скоростью в 770 (!) мм/сек.

Это составляет  $\frac{3}{4}$  м каждую секунду, поэтому для получасовой записи надо было израсходовать без малого 1,5 км (!) ленты. При такой скорости протяжения лента очень быстро изнашивала (стирала) головки, а при ускоренной перемотке скорость движения ленты достигала 30 км/час (!), что приводило к существенному растяжению ленты и частым обрывам. Поэтому неотъемлемым компонентом каждого магнитофона была баночка со специальным клеем для склейки порванной ленты.

Все эти недостатки первых магнитофонов по существу и определили пути их совершенствования. Но чтобы понять и оценить трудности, стоявшие на этом пути, нам придется немного углубиться в физику процесса магнитной звукозаписи.

Из общего курса физики известно, что существует ряд материалов, которые поддаются намагничиванию. Что это значит? Это значит, что изначально не проявляющие магнитных свойств материалы после воздействия на них магнитного поля сохраняют следы этого воздействия и после прекращения воздействия поля, т. е. как бы становятся сами носителями остаточного магнетизма, который может сохраняться достаточно долго.

Но из этого следует, что намагниченный материал, в свою очередь, приобретает способность создавать собственное магнитное поле. В этом мы можем убедиться на элементарном опыте. Возьмем обыкновенный гвоздь и поднесем его к небольшой швейной иголке. Никакого взаимодействия между ними не будет, поскольку гвоздь немагнитный.

Затем приложим гвоздь к любому сильному постоянному магниту, после чего повторим опыт с иголкой. Теперь гвоздь притянет иголку, потому что от прикосновения с сильным магнитом он сам намагнитился. Отсюда вытекает важный вывод: обыкновенный гвоздь можно использовать в качестве переносчика магнитного поля.

В технике магнитной записи роль такого гвоздя выполняют мельчайшие крупинки окисла железа (или другого магнитного материала), обладающие свойством намагничиваться и сохранять намагниченное состояние достаточно длительное время. Эти крупинки вместе со связующим материалом (клеем, лаком и т. п.) наносятся очень тонким слоем (в несколько микрон) на основу из эластичного синтетического материала, в качестве которого сегодня используется преимущественно лавсан.

При записи магнитная лента протягивается мимо рабочей щели специальной головки записи (ГЗ). Эта рабочая щель представляет собой воздушный зазор в магнитопроводе, на котором намотана катушка ГЗ.

При подведении к катушке переменного напряжения звуковой частоты в рабочем зазоре головки создается переменное магнитное поле, в точности повторяющее характер переменного напряжения, возбудившего это магнитное поле.

Но поскольку поле это непрерывно меняется, а лента непрерывно движется, в любой отдельный момент времени напротив щели оказывается новый участок магнитной ленты, на который успевает записаться именно тот уровень магнитного поля, который был создан звуковым сигналом в момент прохождения мимо щели данного отрезка ленты. В результате на ленте оказывается записанной последовательность уровней намагниченности, которая и представляет собой магнитную версию записываемого звукового сигнала.

При воспроизведении происходит обратное действие. Записанная лента с такой же скоростью протягивается мимо аналогичной щели такой же точно головки воспроизведения (ГВ), наводя в ее катушке переменную ЭДС, в точности соответствующую уровням намагниченности ленты, т. е. по существу повторяющую характер переменного напряжения исходного звукового сигнала.

Такова в общих чертах физика процесса. Если возникает необходимость стереть запись, ленту протягивают мимо щели третьей, специальной головки стирания (ГС), на обмотку которой подается значительно большее по величине синусоидальное переменное напряжение ультразвуковой частоты (60...120 кГц). Созданное этим напряжением переменное магнитное поле полностью размагничивает ленту, делая ее пригодной для новой записи.

Теперь очень важно постараться понять, уяснить и запомнить, что существует твердая взаимосвязь между четырьмя составляющими, которые определяют качественные показатели любой системы магнитной звукозаписи. Эти составляющие следующие:

1. Размер зерен (т. е. крупинок) магнитного материала на ленте.
2. Ширина рабочей щели записывающей и воспроизводящей головок.
3. Скорость протяжения ленты в рабочем режиме.
4. Полоса эффективно передаваемых частот записываемого и воспроизводимого сигнала.

Попробуем разобраться в этом, не затрагивая слишком глубоко теоретические исследования в этой области и, возможно (с точки зрения академической науки), не совсем корректно. Представим, что мы хотим записать синусоидальный сигнал с частотой в 10 кГц. Этот сигнал создает в магнитном зазоре записывающей головки переменное магнитное поле, которое изменяется в течение секунды 10 000 раз.

Чтобы записать без искажений каждое из этих изменений, нужен, как минимум, хотя бы один дискретный элемент, переносящий такую магнитную информацию. Будем считать таким элементом одну крупницу окисла железа на магнитной ленте. Зададимся минимальным размером такой крупницы — 10 микрон, что, вообще говоря, не слишком далеко от реального значения. И такой же ширины будем для простоты считать зазор в записывающей головке.

Скорость протяжения ленты примем такой, чтобы за время одного полного периода мимо зазора в головке прошла одна крупница. И какая же это скорость? Это можно легко подсчитать. Если частота сигнала у нас 10 кГц, значит, за 1 с мимо головки должно проскочить друг за другом 10 000 крупниц каждая длиной 10 мкм, а общая длина этой цепочки (а, стало быть, и ленты) составит, как нетрудно сообразить, 100 000 мкм, или 100 мм. Значит, минимальная скорость у нас будет 100 мм/сек.

Ну что ж, устанавливаем ленту на магнитофон, включаем в режим записи, записываем синусоидальный сигнал с частотой 10 кГц, перематываем пленку назад, включаем ее на воспроизведение и слышим... ровный слабый шум. Никакого даже намека на сигнал в 10 кГц.

В чем дело? Может, не работает запись? Ничего подобного, на пленке действительно записано то, что и должно быть записано, т. е.... ничего! Как же так? Ведь на каждой отдельной крупнице должна быть записана по крайней мере одна синусоида, разве не так?

Конечно, так. Она и записана. Вернее, записано ее среднее значение за период. И точно такое же среднее значение будет записано на следующей крупнице, и на последующей, и на всех остальных, следовательно, и на всей ленте ничего, кроме этого среднего значения не окажется. А постоянный ровный шум, который мы слышали при воспроизведении, как раз и передает информацию об этом среднем значении.

И какой же из этого следует вывод? А вывод следует довольно печальный. Если мы хотим достоверно, без искажений передать с помощью магнитной записи одну синусоиду (с любой частотой), то должны по отдельности (!) записать на каждой крупнице каждую фазу этой синусоиды.

И сколько же таких отдельных фаз надо записать? Ответ известен: чем больше, тем лучше, тем ближе воспроизводимый сигнал будет к исходному, а значит, тем меньше будут искажения сигнала.

Ну а все-таки более конкретно — сколько именно? Для начала возьмем хотя бы двадцать. Что это будет означать на практике? На практике это будет означать, что за время, эквивалентное одной синусоиде, мимо рабочей щели записывающей головки должно проскочить в 20 раз больше отдельных крупниц, а для этого нужно в 20 раз увеличить скорость протяжения ленты, т. е. с 10 см/с довести ее ни мало ни много до 2 м/с!

Но неужели нет никаких других путей? Есть, конечно, и притом несколько. Во-первых, можно в 2 раза уменьшить максимальную частоту записываемого сигнала — вместо 10 кГц ограничиться пятью. Тогда и скорость протяжения ленты уменьшится вдвое.

Также вдвое можно уменьшить скорость ленты, если размер одного зерна и соответственно ширину магнитного зазора в головке записи взять не 10, а 5 микрон. Вот теперь должна стать понятной прямая зависимость между теми четырьмя составляющими, с которых мы начали наш анализ.

Еще раз подчеркнем, что рассмотренная схема слишком упрощена и не совсем корректна, поскольку не учитывает целый ряд других важнейших факторов, однако общее представление о процессе она все же дает, а именно эту задачу мы перед собой и ставили.

Теперь будет понятно, что дальнейшее развитие систем магнитной звукозаписи шло по нескольким направлениям. Поскольку главной целью этих работ было повышение качества и верности воспроизведения, напрямую связанной с расширением полосы воспроизводимых частот и снижением уровня искажений, то для достижения этой цели оставалось только уменьшение размера отдельных зерен носителя, уменьшение ширины магнитного зазора в записывающей и воспроизводящей головках и как результат — предельно возможное снижение скорости протяжения ленты.

Все эти пути последовательно реализовывались по мере совершенствования технологий, и это очень наглядно видно из следующих сравнений.

Начнем с ширины рабочего зазора в головках. У первых промышленных магнитофонов она составляла 20...25 мкм, поэтому даже для очень скромной полосы пропускания, не превышающей 8 кГц при существенном уровне искажений, скорость протяжения ленты приходилось выбирать равной 770 мм/с.

В 1960 г. фирма «Филипс» создала головки, в которых вместо обычного листового магнитопровода был применен феррит. Это позволило, во-первых, резко увеличить срок службы головок (до 50 000 часов!), а во-вторых, уменьшить ширину магнитного зазора до 8...10 мкм. В результате стало возможно либо уменьшить скорость протяжения ленты при той же полосе пропускания, либо увеличить полосу пропускания при сохранении скорости.

Следующим шагом в совершенствовании головок стало изобретение фирмой «Телефункен» альсиферовых сердечников, позволивших уменьшить ширину рабо-

чего зазора головок до 2,5 мкм. Дальнейшее уменьшение этой величины представлялось практически невозможным при использовании этих материалов. Поэтому настоящей сенсацией оказалась разработка японской фирмой «Акаи» головок из монокристалла феррита со стеклянным покрытием при использовании особой вакуумной технологии, позволившая уменьшить ширину магнитного зазора до одного микрона!

Таким образом за сравнительно короткий промежуток времени этот параметр магнитной звукозаписи улучшился в 25 раз!

На основе этих достижений последовательно уменьшалась скорость протяжения ленты, происходившая следующими «шагами»: 76,2 см/с; 38,1 см/с; 19,05 см/с; 9,53 см/с; 4,76 см/с.

Как видно, и скорость протяжения ленты удалось уменьшить в 16 раз. Также существенно улучшалось и качество магнитных лент. На смену порошкообразным окислам железа, размеры микрочастиц которых колебались в пределах 1...5 мкм, пришли носители на базе двуокиси хрома.

Двуокись хрома получают гидротермическим способом из трехокиси хрома в вакуумной камере при температуре в 373 °С и давлении в 3000 (!) атмосфер. Полученная таким образом двуокись хрома представляет собой кристаллическое вещество с идеально одинаковыми кристаллами, размеры которых в 5–6 раз меньше «крупинок» окислов железа, т. е. составляют доли микрона.

Серийный выпуск магнитных лент с рабочим слоем из двуокиси хрома начался в 1970 г., и именно эти ленты сделали возможной запись на ленту не только звуковой информации, но и видеозапись.

На этом мы можем ограничить наше знакомство с общей теорией и этапами развития магнитной звукозаписи и перейти к знакомству с реальной аппаратурой звукозаписи.

Конструкция, схемотехнические решения и элементная база любого современного магнитофона целиком и полностью определяются его функциональными возможностями, которые, в свою очередь, напрямую связаны с его назначением и уровнем параметров. Ниже приводится перечень основных потребительских функций, присущих современным кассетным магнитофонам:

- наличие функций воспроизведения и записи от основных внешних источников НЧ сигнала (микрофон, тюнер, трансляционная линия, НЧ выход телевизора, другой магнитофон и т. п.);
- наличие ускоренной перемотки ленты в обоих направлениях;
- наличие автостопа по окончании ленты;
- возможность записи и воспроизведения на 4-х независимых дорожках в режиме моно- и двусторонней записи стерео на двух парах дорожек;
- наличие функции «автореверс»;
- наличие встроенного микрофона (или 2-х микрофонов для стереозаписи);
- наличие индикатора уровня сигнала при записи;
- наличие счетчика положения ленты;
- возможность контроля качества осуществляемой записи на слух непосредственно в процессе записи («аудиомониторинг»);
- наличие переключателя «тип ленты» для трех основных видов применяемых носителей (Normal, CrO<sub>2</sub>, Metal);
- наличие автоматической установки уровня сигнала при записи;
- возможность «наложения» второго сигнала (функция «караоке»);
- наличие системы автопоиска и произвольного выбора фонограмм при воспроизведении;

- возможность приостановки процесса записи или воспроизведения нажатием кнопки «пауза»;
- система защиты от непреднамеренного стирания или записи на кассету, предназначенную только для воспроизведения;
- наличие систем шумопонижения при записи и воспроизведении;
- автоматическая загрузка и выгрузка кассеты в кассетоприемник.

Таков далеко не полный перечень функциональных возможностей современных кассетных магнитофонов для так называемой однокассетной дека. Если же магнитофон (или магнитола) оборудованы двумя деками, к перечисленным функциям добавляются возможность независимой работы каждой из двух дек, перезапись магнитограмм с одной кассеты на другую, одновременный пуск (синхростарт) обеих дек в процессе перезаписи, возможность ускоренной перезаписи.

А при использовании магнитофона в составе радиокomплексов и музыкальных центров к его функциям добавляется автоматическое переключение источников сигнала записи или воспроизведения, контроль и индикация наличия кассеты в кассетоприемнике и др.

Если кассетный магнитофон используется преимущественно в качестве диктофона (для записи лекций, при интервьюировании), то к его основным функциям добавляются возможность применения микрокассет, понижение скорости движения ленты до 2,4 и 1,2 см/с, функция «тонсенсор», т. е. автоматическое мгновенное включение записи при появлении звукового сигнала и приостановка ленты при продолжительности паузы сверх установленной длительности. Эта функция позволяет существенно снизить расход ленты и увеличивает продолжительность непрерывной записи.

Какими же методами и техническими решениями реализуются все перечисленные функции? Здесь надо различать два направления: первое можно назвать механическим, связанным с конструированием и совершенствованием кинематической схемы магнитофона, и второе — электронным, элементы которого обеспечивают прием, обработку и транспортировку всех электрических сигналов и координацию работы всех систем и механизмов автоматики и сервиса.

Таблица 6

НОРМЫ ГОСТов НА ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ КАССЕТНЫХ МАГНИТОФОНОВ

Параметр	Нормы для разных групп сложности				
	высшая	1	2	3	4
Отклонение скорости магнитной ленты от номинальной, %	±1,5	±1,5	±2,0	±2,0	±2,0
Коэффициент детонации, %, не более	0,12	0,15	0,2	0,3	0,4
Диапазон воспроизводимых частот, Гц, не уже:					
для стационарных моделей	31,5... 20000	31,5... 20000	40... 14000	40... 12000	—
для переносных моделей	—	—	63... 12500	63... 10000	63... 10000
Коэффициент гармоник, %, не более	2,0	2,5	3,0	4,0	5,0
Относительный уровень шумов и помех, дБ:					
для стационарных моделей	-56	-56	-54	-48	—
для переносных моделей	—	—	-50	-48	-46



Кинематические схемы кассетных магнитофонов за многие годы эволюции к сегодняшнему дню достигли такой степени совершенства, что ожидать их существенного изменения в ближайшее время нет оснований. Скорее всего, есть основания полагать, что в обозримом будущем кассетные магнитофоны начнут отмирать как морально устаревший вид изделий БРА, постепенно заменяясь, безусловно, более перспективными CD-плеерами, особенно после того, как будут освоены и запущены в массовое производство плееры, допускающие одновременно с функцией воспроизведения и функцию записи на компакт-диски.

Что же касается качественных показателей существующих сегодня кассетных магнитофонов, то они характеризуются нормами ГОСТ, приведенными в табл. 6.

В заключение следует еще раз подчеркнуть, что приведенное знакомство с магнитной системой звукозаписи является, безусловно, очень общим, если не сказать поверхностным. В ходе этого знакомства вообще не были затронуты такие важнейшие составляющие магнитной записи, как высокочастотное подмагничивание ленты, обязательная коррекция АЧХ каналов записи и воспроизведения, современные системы шумоподавления, расположение звуковых дорожек на магнитной ленте при двухканальной стерео- или четырехканальной монозаписи и пр.

Это объясняется тем, что наш сегодняшний уровень подготовки просто не позволяет заниматься самостоятельным конструированием магнитофона, а отсутствие специальной аппаратуры — даже просто квалифицированной регулировкой готового промышленного аппарата.

Поэтому более подробное знакомство с реальными магнитофонами мы отложим до лучших времен, если нам доведется снова встретиться в третьей, заключительной книге этой серии.

## Урок 2. ОБЩАЯ МЕТОДИКА ЭЛЕКТРО- И РАДИОИЗМЕРЕНИЙ

Этот урок мы начнем не совсем обычно: не с теоретических положений, а с очень простенькой конкретной работы.

Имеется элементарный транзисторный усилительный каскад, схема которого изображена на рис. 86. На схеме указаны номиналы резисторов, входящих в каскад, а также величины напряжений на электродах транзистора и источника питания. Схема полностью исправна, усилитель нормально работает. Нужно только убедиться в том, что фактические напряжения полностью соответствуют указанным на схеме.

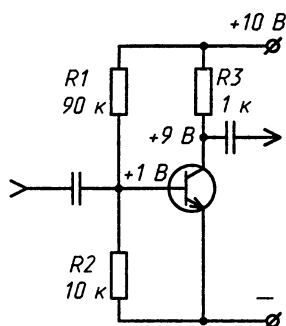


Рис. 86. Схема простого усилительного каскада на биполярном транзисторе

Дело это пустяковое. Берем стоящий на полке тестер, устанавливаем переключатель шкал на позицию «10 В» и подключаем щупы прибора к выводам источника питания. Стрелка прибора отклоняется полностью на всю шкалу, подтверждая, что напряжение источника точно равно 10 В.

Затем переносим «плюсовой» щуп прибора на вывод коллектора и обнаруживаем, что напряжение на коллекторе не 9 В, а чуть поменьше, точнее, 8,92 В. Ну что ж, такой разброс, вообще говоря,

вполне возможен. Но настоящий сюрприз ожидает нас, когда мы переключим шкалы тестера на позицию «1 В» и приложим плюсовой щуп к выводу базы. Вместо ожидаемого 1 В тестер покажет всего лишь... 0,52 В.

Увы, это несомненный факт. Мы сейчас будем самым доскональным образом разбираться в этом конкретном случае.

Начнем со смешного на первый взгляд вопроса: «Что значит измерить напряжение?» Отложим на минуту дальнейшее чтение и попытаемся самостоятельно, а главное вразумительно ответить на этот вопрос. Ответ, вероятно, будет звучать примерно так: «Нужно взять прибор, рассчитанный на измерение именно такого вида напряжений, выбрать шкалу, соответствующую ожидаемой величине измеряемого напряжения, подсоединить щупы прибора к измеряемой цепи и по отклонению стрелки «считать» со шкалы соответствующее показание».

Ответ абсолютно правильный.

«А какой именно прибор нужно взять?»

Вместо ответа возьмем так называемый по старинной привычке ламповый вольтметр и с его помощью еще раз измерим режим транзистора в нашей простенькой схеме. Установим шкалу вольтметра на позицию «10 В» и произведем те же самые замеры. Прибор покажет ровно 10 В на выходе источника питания и ровно 9 В на коллекторе транзистора. Переключим шкалу прибора на позицию «1 В» и подключим щуп к базе транзистора. Стрелка прибора отклонится до правого крайнего оцифрованного деления, подтверждая, что на базе транзистора напряжение действительно равно точно 1 В.

Где же все-таки истина? А истина очень проста и состоит в следующем: ПРЕЖДЕ (!) чем начинать что-либо измерять, надо совершенно однозначно представлять себе:

1. Что именно (какую величину, какой параметр) ты собираешься измерять.
2. Могут ли в момент измерения в измеряемой цепи присутствовать другие сигналы, и если «да», то каким именно образом они смогут повлиять на результат измерения.
3. Вносит ли сам измерительный прибор какие-либо изменения в измеряемую цепь (или схему), и если «да», то каков характер этих изменений и как эти изменения непосредственно отразятся на конечном результате измерения.
4. Какой именно тип прибора следует выбрать для измерения, чтобы с учетом влияния пунктов «2» и «3» конечная погрешность измерения оказалась минимально возможной.
5. Как наиболее правильно и точно оценить реальную погрешность измерения, которая абсолютно неизбежна при любом измерении любого электрического параметра прибором любого типа.

А теперь, усвоив эти азбучные истины, вернемся к нашей проблеме и посмотрим внимательно на рис. 87, на котором изображена схема вольтметра постоянного напряжения, входящая в наш тестер. Она настолько проста, что не требует комментария, за исключением одного замечания. Полное сопротивление самого прибора на шкале в 10 В составляет 100 кОм, а на шкале в 1 В — 10 кОм. Это и понятно, потому что при полном отклонении стрелки прибора как на одной, так и на любой другой шкале величина тока через измерительную головку должна оставаться неизменной и составлять в нашем случае 100 мкА.

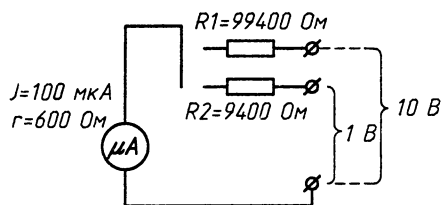


Рис. 87. Принципиальная схема двухпредельного вольтметра постоянного напряжения

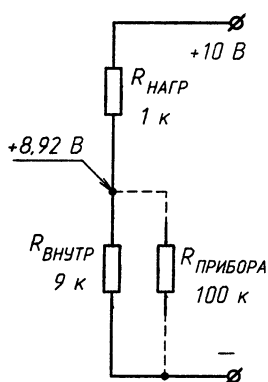


Рис. 88. Эквивалентная схема коллекторной цепи после подключения тестера

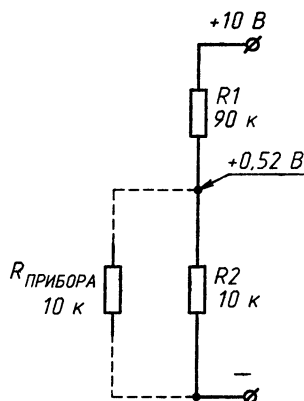


Рис. 89. Эквивалентная схема базовой цепи после подключения тестера

А это возможно лишь в том случае, если с повышением приложенного напряжения одновременно и пропорционально будет возрастать и величина добавочного сопротивления, включенного последовательно с измерительной головкой. В результате оказывается возможным ввести в обращение очень важный показатель, характеризующий любой вольтметр. Он определяет внутреннее сопротивление прибора при измерении на любой шкале и выражается отношением  $\text{кОм/В}$  (или  $\text{МОм/В}$ ). В нашем случае этот показатель для тестера составляет  $10 \text{ кОм/В}$ .

Это далеко не лучший показатель, но и не самый худший. Но он совершенно однозначно определяет допустимые границы использования данного прибора при осуществлении измерений.

Посмотрим, что же все-таки произошло, когда мы подключили тестер к коллектору транзистора, установив переключатель на шкалу «10 В». Этим своим действием мы нарушили схему усилителя. Если до нашего вмешательства коллекторная цепь состояла из двух последовательно соединенных сопротивлений (сопротивления нагрузки в  $1 \text{ кОм}$  и внутреннего сопротивления транзистора в  $9 \text{ кОм}$ ), обуславливавших при напряжении источника  $10 \text{ В}$  ток в цепи, точно равный  $1 \text{ мА}$ , то теперь параллельно внутреннему сопротивлению транзистора оказалось подключенным внутреннее сопротивление прибора, и эквивалентная схема коллекторной цепи усилителя стала выглядеть, как на рис. 88.

В результате изменилось полное сопротивление коллекторной цепи, а поскольку напряжение источника осталось неизменным, то, естественно, изменился (возрос) и общий ток в коллекторной цепи, что привело к перераспределению падений напряжения на резисторе нагрузки и самом транзисторе.

Но поскольку внутреннее сопротивление прибора на шкале в  $10 \text{ В}$  более чем в  $10$  раз превышало внутреннее сопротивление транзистора, шунтирующее действие прибора оказалось незначительным, а потому мало отразилось на результате измерения ( $8,92$  вместо  $9,0 \text{ В}$ ). Ошибка составила всего  $1\%$ .

Совсем иной оказалась картина, когда мы стали измерять напряжение на базе. Эквивалентная схема базовой цепи после подключения вольтметра изображена на рис. 89. Поэтому, как и следовало ожидать, результат измерения был предопределен заранее неграмотным выбором средства измерения.

Остается добавить, что если бы мы вздумали таким же образом измерить напряжение на затворе полевого транзистора, тестер показал бы полное отсутствие какого бы то ни было напряжения, что неминуемо привело бы нас к ЛОЖНОМУ ЗАКЛЮЧЕНИЮ о наличии в схеме неисправности.

Проведя этот маленький эксперимент, мы видим, что в технике электро-, а особенно радиоизмерений порой бывает необходимо учитывать и принимать во внимание множество обстоятельств, кажущихся на первый взгляд несущественными, игнорирование которых может привести не только к количественной ошибке, но и к неверным выводам и заключениям, как в нашем примере (особенно с полевыми транзисторами).

К этому можно добавить, что если бы нам пришлось в приведенной схеме измерять не постоянные, а переменные напряжения на электродах транзистора, да к тому же не на звуковых, а на радиочастотах, то в дополнение к уже известным трудностям пришлось бы заранее предвидеть, как скажутся на результатах измерения внесенные прибором дополнительные емкость и индуктивность самого прибора, длина соединительных проводов между прибором и объектом измерения, выбор точки заземления как прибора, так и объекта измерения и т. п. И все эти частные вопросы не только учесть, но и оценить количественно, чтобы внести соответствующие коррективы в показания прибора при оценке результата измерения.

Теперь после этого небольшого, но поучительного эксперимента вполне можно перейти и к основной теме урока.

А начнем мы с наиболее важного общего вопроса — с метрологической терминологии, без знания которой очень трудно изучать специальную учебную и справочную литературу и использовать свои знания в практике измерений.

Итак, начнем с самых азов, т. е. самых простых понятий.

**ИЗМЕРЕНИЕ** — нахождение численного значения физической величины путем использования специальных технических средств и специальных методик.

**ПРЯМОЕ ИЗМЕРЕНИЕ** — измерение, при котором техническое средство сразу и непосредственно определяет величину именно данного параметра.

**КОСВЕННОЕ ИЗМЕРЕНИЕ** — измерение, при котором техническое средство производит прямое измерение, а результат измерения оценивается как известная функция измеряемого параметра от итога прямого измерения.

Классический пример косвенного измерения — измерение напряжения с помощью тестера.

На самом деле измерительная головка тестера реагирует только на величину тока, протекающего через подвижную рамку и вызывающего поворот рамки на тот или иной угол. А конструкторы прибора, исходя из известной функциональной зависимости между величинами тока и напряжения (закон Ома), градуируют шкалу прибора, присваивая каждому углу поворота рамки (и жестко связанной с рамкой стрелкой-указателем) то или иное значение напряжения (в тех или иных единицах измерения).

**СРЕДСТВО ИЗМЕРЕНИЯ** — техническое средство, специально предназначенное для проведения метрологических операций и обладающее нормированными метрологическими свойствами.

**ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ПРИБОР** — средство измерений, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации (т. е. сигнала, содержащего количественную информацию) об измеряемой физической величине в форме, доступной для непосредственного восприятия оператором.

**ЕДИНИЦА ИЗМЕРЕНИЯ** — количественное выражение той или иной физической величины, размер и размерность которой узаконены международными соглашениями для соответствующей системы единиц в качестве основной меры. Другие единицы этой физической величины могут образовываться из основной единицы кратным или дробным преобразованием.

## ПРИСТАВКИ ДЛЯ ОБОЗНАЧЕНИЯ КРАТНЫХ И ДРОБНЫХ ЕДИНИЦ

Соотношение с основной единицей	Обозначение лат./рус.	Наименование	Соотношение с основной единицей	Обозначение лат./рус.	Наименование
$10^{18}$	Е (Э)	экса	$10^{-1}$	d (д)	деци
$10^{15}$	Р (П)	пета	$10^{-2}$	с (с)	санتي
$10^{12}$	Т (Т)	тера	$10^{-3}$	м (м)	милли
$10^9$	Г (Г)	гига	$10^{-6}$	μ (мк)	микро
$10^6$	М (М)	мега	$10^{-9}$	п (н)	нано
$10^3$	к (к)	кило	$10^{-12}$	р (п)	пико
$10^2$	h (г)	гекто	$10^{-15}$	f (ф)	фемто
$10^1$	da (да)	дека	$10^{-18}$	a (а)	атто

На всякий случай, если возникнет необходимость, можно воспользоваться табл. 7, где эти кратные и дробные единицы названы поименно.

**ЭТАЛОН ЕДИНИЦЫ** — средство измерений (или комплекс таких средств), обеспечивающий хранение и воспроизводство данной физической величины с целью передачи ее размера образцовым и рабочим средствам измерений.

**ОБРАЗЦОВОЕ СРЕДСТВО** измерения — мера, измерительный прибор или измерительный преобразователь, утвержденные в установленном порядке в качестве образцовых, предназначенные для проверки по ним других средств измерений.

**РАБОЧЕЕ СРЕДСТВО** измерения — средство, предназначенное для практического использования, не связанного с передачей размера единиц.

**РЕЗУЛЬТАТ ИЗМЕРЕНИЯ** — значение величины, найденное путем ее измерения и определяемое по показаниям средств измерения.

**ПОКАЗАНИЕ** средства измерения — значение измеряемой величины, определяемое по отсчетному устройству средства измерения и выраженное в принятых единицах этой величины.

**ОТСЧЕТ** — число, отсчитанное по отсчетному устройству средства измерения либо полученное путем счета последовательных отметок (рисок) или сигналов.

Такова первая порция так называемых общих вопросов электрорадиоизмерений, за которой сразу же последуют и другие, не менее важные.

И одним из важнейших понятий является понятие (а точнее — два разных понятия), которые никогда не следует путать и которые, к сожалению, чаще всего как раз и путают.

**ОБЪЕКТОМ ИССЛЕДОВАНИЙ** являются конкретные предметы, устройства, схемы, механизмы, характеризующиеся теми или иными физическими величинами.

**ОБЪЕКТОМ ЭЛЕКТРОРАДИОИЗМЕРЕНИЙ** являются значения физических величин, характеризующих объект исследований. К примеру, объектом исследования может являться конденсатор, а объектом измерения — величина его емкости, тангенс угла потерь, величина утечки и т. п.

Познакомимся со следующей таблицей и убедимся, что для каждого вида измерений промышленностью выпускаются узкоспециализированные приборы, назначение которых всегда отражается в самом наименовании прибора (табл. 8).

**ГРУППЫ ПРИБОРОВ ОТЕЧЕСТВЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА,  
ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ ИЗМЕРЕНИЙ**

Обозначение подгруппы	Полное наименование подгруппы
А	Приборы для измерения тока
В	Приборы для измерения напряжения
Е	Приборы для измерения параметров компонентов и цепей с сосредоточенными постоянными
М	Приборы для измерения мощности
Р	Приборы для измерения параметров элементов с распределенными постоянными
Ч	Приборы для измерения частоты и времени
Ф	Приборы для измерения разности фаз и группового времени запаздывания
С	Приборы для наблюдения, измерения и исследования форм сигналов и спектра
Х	Приборы для наблюдения и исследования характеристик радиоустройств
И	Приборы для измерения импульсных сигналов и процессов
П	Приборы для измерения напряженности поля и уровня помех
У	Измерительные усилители
Г	Измерительные генераторы
Д	Аттенюаторы и приборы для измерения ослабления сигналов
К	Комплексные измерительные установки
Л	Приборы общего применения для измерения параметров электронных ламп и полупроводниковых приборов
Ш	Приборы для измерения электрических и магнитных свойств материалов
Я	Блоки измерительных приборов
Э	Измерительные устройства коаксиальных и волноводных трактов
Б	Источники питания для измерений и радиоизмерительных приборов

Помимо отнесения того или иного прибора к одной из перечисленных подгрупп, все приборы принято подразделять на показывающие и регистрирующие, приборы непосредственной оценки и приборы сравнения.

По устройству и компонентам конструкции приборы подразделяют на электро-механические и электронные.

В свою очередь электро-механические приборы делятся на магнитоэлектрические, в условном обозначении которых добавлена буква М, электромагнитные (буква Э), электростатические (С), электродинамические (Д). В приборах для измерения переменных токов и напряжений (выпрямительной системы — буква Ц) используется встроенный выпрямитель и измерительный механизм магнитоэлектрической системы, в приборах термоэлектрических (Т) — термopара и магнитоэлектрический измеритель.

## УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ НЕКОТОРЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

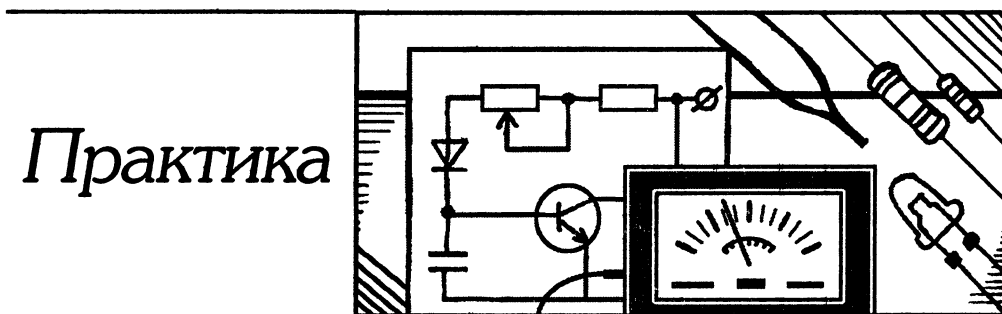
№ п/п	Символ по МЭК-51	Наименование	Условное обозначение	№ п/п	Символ по МЭК-51	Наименование	Условное обозначение
1	В-1	Постоянный ток	—	13	F-3	Магнитоэлектрический прибор с подвижным магнитом	
2	В-2	Переменный ток					
3	В-3	Постоянный и переменный ток		14	F-5	Электромагнитный прибор	
4	С-2	Измерительная цепь изолирована от корпуса и испытана напряжением, превышающим 500 В, например 2 кВ		15	F-8	Электродинамический прибор	
				16	F-9	Ферродинамический прибор	
5	С-1	Измерительная цепь изолирована от корпуса и испытана напряжением 500 В		17	F-15	Биметаллический прибор	
6	С-3	Прибор испытанию прочности изоляции не подлежит		18	F-16	Электростатический прибор	
7	С-7	Прибор или вспомогательная часть под высоким напряжением		19	F-20	Электронный преобразователь в измерительной цепи	
8	Д-1	Прибор применять при вертикальном положении шкалы		20	F-22	Выпрямитель	
9	Д-2	Прибор применять при горизонтальном положении шкалы		21	F-27	Электростатический экран	
10	Д-3	Прибор применять при наклонном положении шкалы (например, под углом 60°) относительно горизонтальной плоскости		22	F-28	Магнитный экран	
				23	F-29	Астатический прибор	<i>ast</i>
				24	F-32	Корректор	
11	Д-7	Обозначение, указывающее на ориентирование прибора во внешнем магнитном поле	<i>N</i>	25	F-33	Внимание! См. дополнительные указания в паспорте и инструкции по эксплуатации	
12	F-1	Магнитоэлектрический прибор с подвижной рамкой		26	F-37	Стальной лист толщиной x (в миллиметрах)	<i>Fe<sub>x</sub></i>

Для того, чтобы пользователю прибора было легче ориентироваться в его виде, устройстве и специфических особенностях, ГОСТом разработана и применяется специальная символика, чаще всего наносимая на шкалу считывающего устройства. В табл. 9 приведены наиболее употребимые и часто встречающиеся обозначения такого рода.

Мы лишь слегка приоткрыли завесу тайны над таким понятием, как общие вопросы электрорадиоизмерений и при этом даже не упомянули такие его разделы, как классы точности средств измерения, оценка результатов измерения, погрешности измерения и погрешности средств измерения, т. е. самих измерительных приборов и многое другое.

К сожалению, объем, а главное — назначение этой книги не предусматривает всеобъемлющего изучения всего курса метрологии, поэтому придется немного подождать. В следующей книге мы вернемся к этой теме на уже более высоком уровне, когда нам придется непосредственно работать с различными измерительными приборами при настройке и регулировке созданных нами аппаратов и конструкций.

Мы прощаемся, поскольку это наше последнее теоретическое занятие во второй книге. Напоследок предлагаю еще одну самостоятельную практическую работу — трехтональный музыкальный звонок. Надо же, в конце концов, сделать хоть что-нибудь «для дома, для семьи»!



В конструкции, которую предлагается сделать, нет ничего незнакомого. Основу схемы составляют три одинаковых симметричных мультивибратора, генерирующих три разные частоты в звуковом диапазоне.

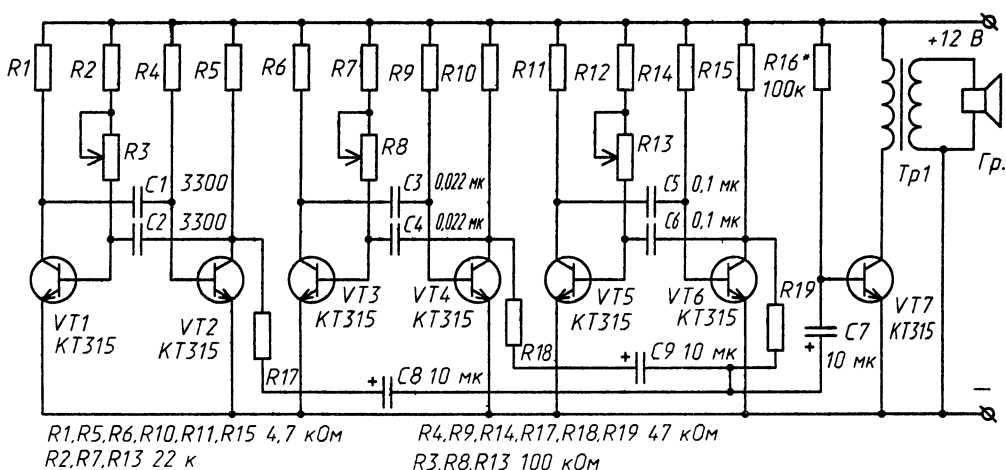


Рис. 90. Принципиальная схема трехтонального музыкального звонка



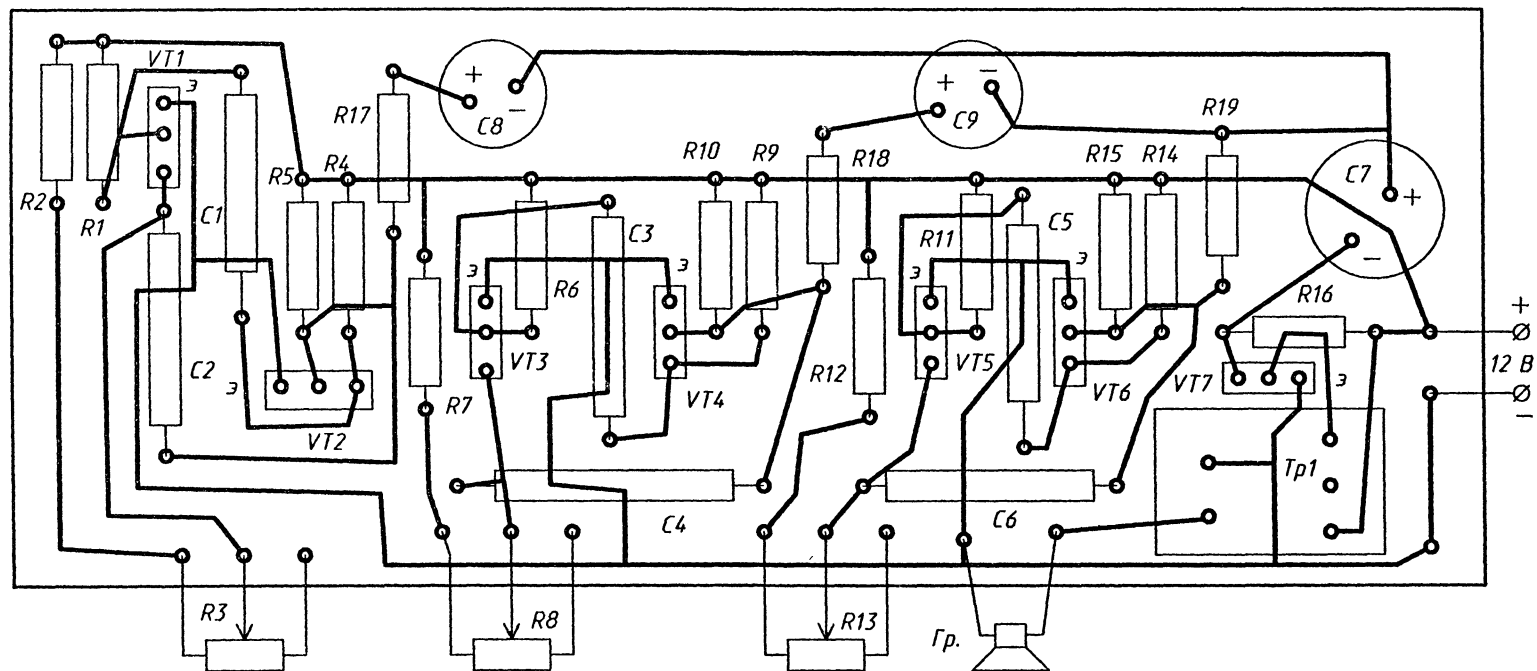


Рис. 91. Рисунок печатной платы музыкального звонка

Частота каждого мультивибратора может изменяться в значительных пределах с помощью выведенных наружу переменных резисторов.

Сигналы всех трех генераторов через «развязывающие» резисторы подаются на вход общего усилителя мощности, собранного на транзисторе *VT7* по схеме с трансформаторным выходом и нагруженного на громкоговоритель.

Схема питается от источника постоянного напряжения величиной 12 В, в качестве которого можно использовать простой выпрямитель по мостовой схеме, описание которого приводилось ранее.

Принципиальная схема звонка приведена на рис. 90, а рисунок печатной платы — на рис. 91, но лучше этот рисунок сделать самостоятельно. Во-первых, это гораздо интереснее, а во-вторых, гораздо полезнее.

Схема настолько примитивна, что при отсутствии ошибок в монтаже просто не может не заработать при первом же включении. Вся регулировка состоит в том, чтобы при помощи трех ручек управления подобрать наиболее приятный и благозвучный аккорд. Преимущество выведенных наружу ручек управления состоит в том, что в любой момент можно изменить звучание и мелодию звонка, если она не нравится или через какое-то время надоела.

При желании в схему можно ввести и общий регулятор громкости, если в этом возникнет потребность. Как это сделать, ясно и без дополнительных пояснений.

Выбор всех деталей, включая типы транзисторов, абсолютно не критичен, за исключением, пожалуй, выходного трансформатора. Его лучше всего использовать от любого карманного транзисторного приемника прежних лет выпуска, лучше всего вместе с тем громкоговорителем, на который он был рассчитан.

Оформление звонка, разумеется, целиком зависит от фантазии и возможностей.

До встречи в третьей, заключительной книге!

## ЛИТЕРАТУРА

1. Жеребцов И. П. Основы электроники.— Л., «Энергия». 1974.
2. Краткий справочник конструктора РЭА. Под ред. Варламова Р. Г.— М., «Сов. Радио». 1973.
3. Беклемишев А. В. Меры и величины физических единиц.— М., Изд. физико-математической литературы. 1963.
4. Гендин Г. С. Все о радиолампах.— М., «Горячая линия–Телекомп». 2002.
5. Куликов Г. В. Ремонт магнитол и СД плееров.— М., Солон-Р, ДМК-Пресс. 2001.

**ИЗДАТЕЛЬСТВО «РАДИОСОФТ»**

<http://www.radiosoft.ru> e-mail: [info@radiosoft.ru](mailto:info@radiosoft.ru)

**Отдел реализации**

тел./факс: (095) 177-4720 e-mail: [real@radiosoft.ru](mailto:real@radiosoft.ru)

**Адрес и телефон для заявок на книги по почте:**

111578 Москва, а/я 1 «Пост-Пресс»,  
тел: (095) 307-0661, 307-0621 e-mail: [postpres@dol.ru](mailto:postpres@dol.ru)

**Геннадий Семенович Гендин**  
**ШКОЛА РАДИОЛЮБИТЕЛЯ**

Ответственный за выпуск  
Ведущий редактор  
Технический редактор  
Компьютерная верстка  
Оформление  
Корректор

Халоян А.А.  
Толмачева М.Б.  
Нефедова М.Ю.  
Розанова О.В.  
Абдрашитова Л.К.  
Кришталь И.В.

Сдано в набор 12.01.2003. Подписано в печать 21.03.2003.  
Формат 70х100/16. Гарнитура "Прагматика". Бумага газетная.  
Печать высокая. Печ. л. 13,0. Тираж 3 000 экз. Заказ 2073.

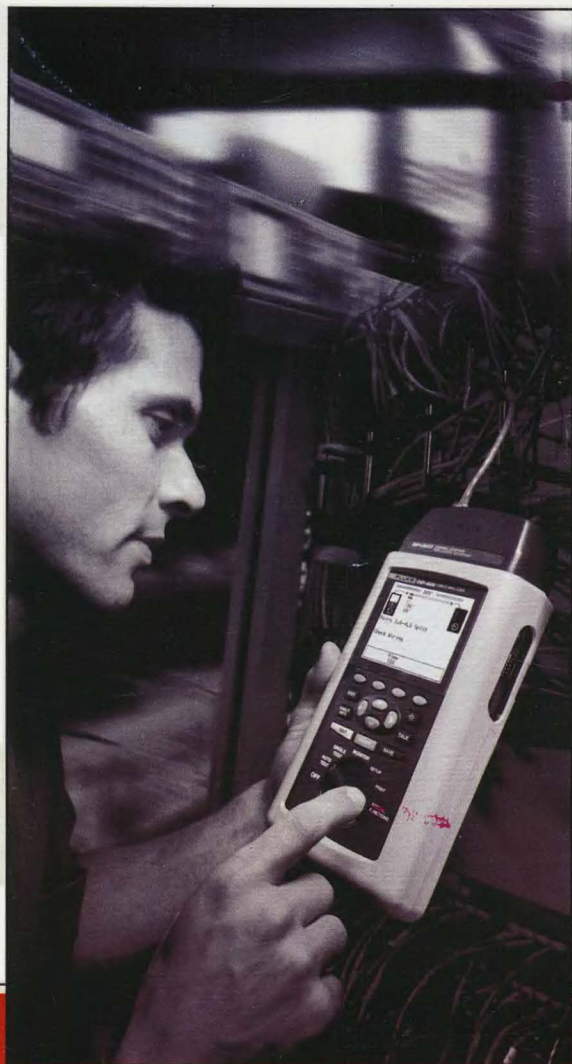
Издательское предприятие РадиоСофт  
109125, Москва, ул. Саратовская, 6/2  
Лицензия ЛР № 065866 от 30.04.98

ОАО «Владимирская книжная типография»  
600000, г. Владимир, Октябрьский проспект, д. 7  
Качество печати соответствует качеству предоставленных диапозитивов

ISBN 5-93037-113-X



9 785930 371130 >



**ОПТОВАЯ  
БАЗА  
КОМПЛЕКТАЦИИ**

**ЭЛЕКТРОННЫХ  
КОМПОНЕНТОВ  
и ПРИБОРОВ**

**для  
РОЗНИЧНОЙ ТОРГОВЛИ  
и ПРОИЗВОДСТВА**

**(095) 973-7073  
(многоканальный)  
www.chipdip.ru**

г. Москва, ул. Гиляровского, 39  
Тел/факс: (095)973-70-73 (многоканальный)  
факс: (095)971-31-45

**ЧИП  
И ДИП  
ИНДУСТРИЯ**

РОССИЯ 129110 г. Москва, а/я 996, e-mail: sales@chipdip.ru

ВСЕ ТОВАРЫ В РОЗНИЦУ В МАГАЗИНАХ

**ЧИП И ДИП**

www.chipdip.ru

Адреса магазинов Чип и Дип:

Центральный (без выходных): г. Москва, ул. Беговая, д. 2 • г. Москва, ул. Земляной Вал, д. 34 • г. Москва, ул. Гиляровского, д. 39  
• г. Москва, ул. Ив. Франко, д. 40, к. 1, стр. 2 • г. С.-Петербург, Кронверкский проспект, д. 73, тел.: (812) 232-83-06, 232-59-87,  
e-mail: platan@mail.wplus.net • г. Ярославль, пр. Ленина, д. 8а, тел.: (0852) 30-15-68, e-mail: chip-dip@yaroslavl.ru

Единая справочная служба магазинов Чип и Дип:  
Тел.: (095) 973-73-79 (многоканальный) e-mail: sales@chipdip.ru