С. Н. ТИХОНОВ

РАДИО-ТЕХНИКА ДЛЯ НАЧИНАЮЩИХ

РАДИОТЕХНИКА ДЛЯ НАЧИНАЮЩИХ

С. Н. ТИХОНОВ

РАДИОТЕХНИКА ДЛЯ НАЧИНАЮЩИХ

Ордена Трудового Красного Знамени
ВОЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МИНИСТЕРСТВА ОБОРОНЫ СССР
МОСКВА — 1976

6Ф2
Т46
УДК 621.396(023)

Тихонов С. Н.
Т46 Радиотехника для начинающих. М., Воениздат, 1976.
272 с. с ил.

Книга предназначена для изучающих основы радиотехники. Главное внимание в ней уделено объяснению физической сущности явлений, происходящих в электрических схемах. Основные законы радиотехники излагаются в популярной форме. Математический аппарат использован в объеме средней школы.

Иллюстрации и примеры, приведенные в книге, помогут читателям в изучении радиотехнической аппаратуры.

Книга рассчитана на многочисленный отряд военных и гражданских радиолюбителей и явится полезным пособием для читателей, желающих изучить основы радиотехники.

Т $\frac{30404\text{-}246}{068(02)\text{-}76}$ 104-76

6Ф2

© Воениздат, 1976

ВВЕДЕНИЕ

Родиной радио, этого величайшего достижения современной науки и техники, является Россия. Изобрел радио сын великого русского народа, выдающийся ученый Александр Степанович Попов. Это изобретение подвело итоги творческой работы ученых многих стран, и прежде всего Ломоносова, Фарадея, Максвелла, Герца.

Создатель Советского государства Владимир Ильич Ленин придавал большое значение радио и часто пользовался им, особенно в тех случаях, когда необходимо было срочно довести до сведения народа важные сообщения. Так, 7 ноября 1917 г. в 10 часов утра через радиостанцию крейсера «Аврора» было передано написанное В. И. Лениным обращение «К гражданам России», в котором сообщалось, что буржуазное Временное правительство свергнуто и власть перешла в руки Военно-революционного комитета.

В. И. Лениным подписано несколько важных декретов, сыгравших большую роль в развитии нашей отечественной радиотехники.

В 1945 г. Советским правительством принято постановление «Об ознаменовании 50-летия со дня изобретения радио А. С. Поповым».

7 мая теперь отмечается ежегодно по всей стране как всенародный праздник «День радио».

Изобретение радио ознаменовало собой начало новой эпохи в развитии науки и техники — эпохи радиоэлектроники. Сначала своего развития радиотехника занималась вопросами связи, затем вопросами радиовещания. За последнее время электроника вместе с физикой твердого тела, оптикой и другими науками нашла много совершенно новых областей применения.

В понятие радиоэлектроники в настоящее время входят связь, радиовещание, радиолокация, телевидение, радионавигация, радиотелемеханика, радиоастрономия, радиоспектроскопия, электронные математические машины и многие другие отрасли науки и техники.

Глава 1

ПОНЯТИЕ О РАДИОСВЯЗИ

Под радиосвязью следует понимать обмен информацией на расстоянии с помощью радиоволн.

Любая информация для передачи по линии радиосвязи предварительно преобразовывается в электрические сигналы, которые называют первичными электрическими сигналами.

В дальнейшем будем рассматривать только те способы преобразования информации в электрические сигналы, которые используются при телеграфной или телефонной связи.

Обмен информацией отправителя и получателя (абонента) по радио осуществляется по линии связи, которой служит поле электромагнитных волн.

Радиоволна представляет собой совокупность взаимосвязанных электрических и магнитных колебаний, распространяющихся в пространстве. Эти волны создаются антенной передатчика в пункте отправителя и воспринимаются антенной приемника в пункте получателя. Передающая антенна способна излучать в окружающее пространство электромагнитные волны, созданные только токами высокой частоты. Первичные электрические сигналы непосредственно передаваться по радиолинии не могут. Они являются управляющими сигналами и воздействуют на какой-либо из параметров (амплитуду, частоту, фазу) тока высокой частоты, питающего передающую антенну.

Электромагнитные волны могут распространяться на очень большие расстояния (на тысячи, десятки тысяч и миллионы километров), поэтому ими воспользовались для «переноса» различной информации.

Поскольку электромагнитная волна выполняет функцию переносчика информации, то ее часто называют несущей волной (несущей частотой).

Для осуществления двусторонней радиосвязи между двумя пунктами на каждом из них должна находиться радиостанция, состоящая из передающего и приемного устройств. Под передающим устройством следует понимать передатчик и передающую антенну, под приемным устройством — приемник и приемную антенну.

В радиостанциях малой мощности передатчик и приемник, как правило, устанавливаются вместе. У них имеется одна общая антенна, которая при передаче подключается к передатчику, а при приеме — к приемнику.

На рис. 1 приведена принципиальная схема линии радиосвязи.

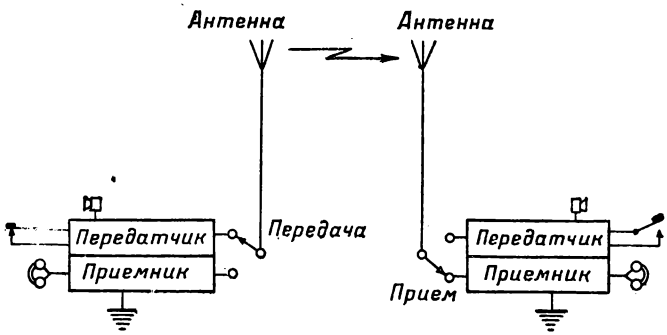


Рис. 1. Принципиальная схема линии радиосвязи

Чтобы получить в пространстве радиоволну, которая способна распространяться на большие расстояния, необходимо питать антенну током высокой частоты. Получением и использованием переменных токов высокой частоты и занимается радиотехника.

Рассмотрим в общих чертах назначение передатчика, антенны и приемника.

Передатчик предназначен для создания или, как принято говорить, генерирования переменных токов высокой частоты.

Энергия постоянного или переменного тока промышленной частоты в радиопередающем устройстве преобразуется в энергию переменного тока высокой частоты, представляющего собой синусоидальный ток (рис. 2) с амплитудой $I_{макс}$, периодом T и начальной фазой φ_0.

Интервал времени, за который происходит одно полное колебание тока, называется периодом T.

Мгновенное значение тока i (значение тока в данный момент времени) определяется из формулы

$$i = I_{макс} \sin\left(\frac{2\pi}{T} t + \varphi_0\right).$$

Вместо периода чаще пользуются обратной величиной — частотой $f = \frac{1}{T}$, измеряемой в герцах. Частота колебаний — это число колебаний в течение одной секунды (1 герц — это одно колебание в секунду).

Тогда

$$i = I_{макс} \sin(2\pi f t + \varphi_0) = I_{макс} \sin(\omega t + \varphi_0),$$

где $\omega = 2\pi f$ — угловая частота, измеряемая в рад/с.

Начальная фаза φ_0 определяется выражением

$$\varphi_0 = \frac{2\pi}{T} t_0 = \omega t_0,$$

где t_0 — отрезок времени, показанный на рис. 2.

В радиотехнике находят применение переменные токи с частотами от долей герца до нескольких тысяч миллиардов герц. Высокочастотными токами являются токи с частотами от несколь-

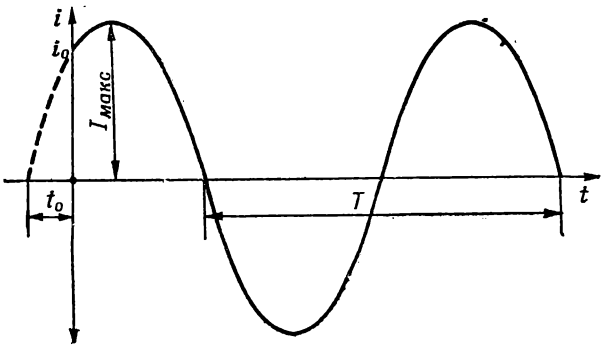


Рис. 2. Переменный синусоидальный ток

ких десятков тысяч герц и выше. Если эти токи будут протекать по антенне, то антенна начнет излучать радиоволны, следовательно, радиоволны возникают за счет электрической энергии токов высокой частоты. Частота колебания волны равна частоте колебаний тока в антенне.

Антенна служит для излучения радиоволн в пространство при передаче или для улавливания энергии радиоволн из пространства при приеме.

Распространяются волны со скоростью света, равной 300 000 км/с. Так как частота колебаний волны равна частоте колебаний тока в антенне, то за время, равное одному периоду T переменного тока в антенне, электромагнитные волны пройдут путь

$$\lambda = cT = \frac{c}{f},$$

где λ — длина волны, м;

c — скорость света, м/с;

T — период переменного тока, с;

$f = \frac{1}{T}$ — частота колебаний переменного тока.

Длина волны — это путь, проходимый электромагнитным полем в пространстве в течение одного периода тока излучателя. Радиоволны тем длиннее, чем меньше частота переменного тока в антенне.

Приемник служит для выделения, усиления и преобразования энергии принятой радиоволны, которая приводит в действие оконечный прибор (телефон, громкоговоритель, буквопечатающий аппарат, электронно-лучевую трубку и т. д.).

В передатчиках предусмотрено управление колебаниями токов высокой частоты как при передаче радиограмм (радиотелеграфная передача), так и при передаче речи (радиотелефонная передача).

В простейшем виде для радиотелеграфной передачи используется телеграфный ключ. При нажатии ключа происходит излучение электромагнитных колебаний антенной. При отжатии ключа электромагнитные колебания не излучаются. Процесс управления колебаниями высокой частоты передатчика с помощью телеграфного ключа называется *манипуляцией*. Кратковременное нажатие ключа условно воспринимается в виде точки, более продолжительное — в виде тире.

В телеграфной азбуке каждая буква алфавита обозначается комбинацией точек и тире. Передача радиограммы сводится к передаче серии сигналов в виде точек и тире.

Передача речи осуществляется при помощи микрофона. При этой передаче переменный ток высокой частоты поступает в антенну непрерывно, при этом величина тока, его частота или фаза изменяются в соответствии со звуковыми колебаниями, воздействующими на микрофон.

Изменение характера колебаний тока высокой частоты называется *модуляцией*.

При импульсной радиосвязи, когда ток поступает в антенну не непрерывно, а в виде повторяющихся кратковременных импульсов, используют амплитудную импульсную модуляцию (АИМ); широтную импульсную модуляцию (ШИМ), в процессе которой происходит изменение ширины импульсов, т. е. их длительности; фазовую импульсную модуляцию (ФИМ), в процессе которой изменяется фазовый сдвиг, т. е. временное положение импульсов, и частотную импульсную модуляцию (ЧИМ), в процессе которой происходит изменение частоты импульсов.

Итак, передатчик вырабатывает токи высокой частоты для питания антенны. При помощи антенны в окружающем пространстве создаются радиоволны. На пути своего распространения радиоволны пересекают приемную антенну и наводят в ней электродвижущую силу. Эта э. д. с. создает в антенне приемника ток, изменяющийся по тому же закону, по которому изменяется ток в антенне передатчика.

Так как одновременно работает много передающих радиостанций и радиоволны каждой из них наводят в приемной антенне э. д. с. своей частоты, то первое назначение приемника состоит в том, чтобы выделить сигналы интересующей нас передающей станции.

В зависимости от мощности передатчика и расстояния между передатчиком и приемником величина э. д. с., наведенной в прием-

ной антенне, меняется в очень широких пределах. Обычно выделенная э. д. с. имеет небольшую величину, измеряемую миллионными долями вольта. Практически использовать такую э. д. с. для

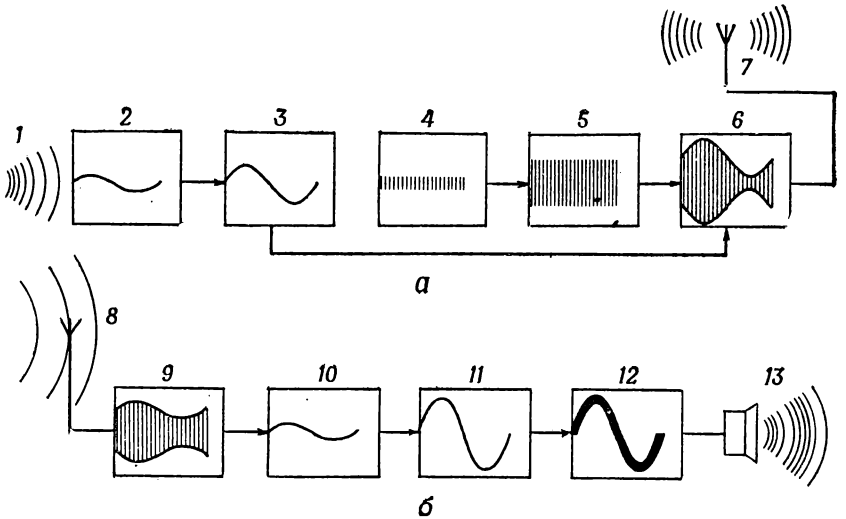


Рис. 3. Структурная схема линии радиосвязи:

а — передающее устройство; *б* — приемное устройство; *1* — звуковые волны; *2* — преобразование микрофоном звуковых волн в электрические колебания звуковой частоты; *3* — усиление электрических колебаний звуковой частоты; *4* — генерирование колебаний высокой частоты; *5* — усиление колебаний высокой частоты; *6* — наложение (модулирование) колебаний звуковой частоты на колебания высокой частоты; *7* — излучение модулированных высокочастотных колебаний антенной; *8* — прием модулированных колебаний высокой частоты; *9* — усиление принятых колебаний; *10* — отделение (детектирование) колебаний звуковой частоты от высокочастотных колебаний; *11* — усиление колебаний звуковой частоты; *12* — усиление колебаний звуковой частоты по мощности; *13* — преобразование электрических колебаний звуковой частоты громкоговорителем в звук

непосредственной расшифровки информации нельзя, поэтому вторым назначением приемника является усиление принятых сигналов.

Принятые и усиленные колебания высокой частоты необходимо преобразовать в форму, удобную для восприятия информации, например в колебания звуковой низкой частоты. Третье назначение приемника — выделение колебаний звуковой частоты из модулированных колебаний высокой частоты. Этот процесс называется *детектированием* принятых сигналов. Выделенные токи звуковой частоты имеют такую же, как у микрофонных токов, форму, т. е. они полностью соответствуют звукам речи или музыки, воздействующим на микрофон. После дополнительного усиления эти токи поступают в телефон (или другое оконечное устройство), вызывая в нем колебания мембраны, а следовательно, и окружающего воздуха, которые и воспринимаются нами как звук.

На рис. 3 приведена структурная схема линии радиосвязи.

Глава 2

ЗВУК И ЕГО ПРЕОБРАЗОВАНИЕ

ПОНЯТИЕ О ЗВУКЕ

Окружающий нас мир насыщен различными звуками. Музыкальный инструмент, мембрана громкоговорителя или любая другая колеблющаяся система приводят в движение частицы окружающего воздуха, заставляя колебаться их около положения равновесия. В результате возникает переменное сжатие и разрежение воздуха. Этот процесс ухо воспринимает как звук до тех пор, пока число механических колебаний частиц воздуха будет находиться примерно в диапазоне от 16 до 16000 колебаний в секунду. Следовательно, *звук* — это есть механические колебания, распространяющиеся в упругих средах (газах, жидкостях и твердых телах) во все стороны от места возникновения. Скорость, с которой распространяется звук в данной среде, называется скоростью звука. Скорость — постоянная величина, зависящая от физического состояния среды: температуры, барометрического давления и удельного веса. В воздухе при нормальных условиях она равна приблизительно 330 м/с, в воде — 1500 м/с.

Сгущение или разрежение частиц среды повторяется в каждой точке звукового поля через некоторый интервал времени, называемый периодом (T), период измеряется в секундах. Величина, обратная периоду, дает число колебаний за секунду и называется частотой колебаний.

За один период звук пройдет определенное расстояние, называемое *длиной звуковой волны* λ:

$$\lambda = cT = \frac{c}{f},$$

где c — скорость распространения звука в данной среде, м/с;

T — период звуковых колебаний частиц среды, с;

f — частота звуковых колебаний, Гц.

Длина звуковой волны равна расстоянию между двумя соседними зонами сжатия (разрежения) частиц среды и измеряется в метрах.

При частоте звука 50 Гц для одного периода колебания требуется 1/50 с. В течение этого времени колебание будет проходить

$1/50 \cdot 330 = 6{,}6$ м. Таким образом, длина волны звукового колебания составит 6,6 м.

Тоном называют звук, создаваемый регулярными периодическими колебаниями синусоидального характера. Звучание тонов определяется их частотой — высоким частотам соответствуют высокие тона, и наоборот.

Когда Вы ударяете по клавишам рояля, Вы слышите звуки различного тона. Частота звуковых колебаний зависит от длины и толщины струны. Более короткая и тонкая струна создает звук более высокого тона, т. е. ее звуковые колебания имеют более высокую частоту.

Степень воздействия звука на органы слуха зависит от амплитуды колебаний: чем больше амплитуда, тем громче звук. Громкость звука измеряется условными единицами, называемыми децибелами (дБ). Если увеличить амплитуду в 10, 100, 1000 и т. д. раз, то это будет соответствовать увеличению громкости соответственно на 20, 40, 60 дБ и т. д.

Громкость характеризует величину слухового ощущения и является физиологической, субъективной оценкой силы звука. Громкость звука зависит от силы звука и частоты.

Самый сильный звук, который мы слышим безболезненно, на 120 дБ громче самого слабого звука, воспринимаемого ухом. Это соответствует увеличению амплитуды в 10^6 раз.

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЗВУКА В ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ

Для преобразования звуковых колебаний в электрические используется *микрофон*. Колебания воздуха преобразуются сначала в механические колебания мембраны микрофона, которые в свою очередь преобразуются в электрические колебания.

При преобразовании воздушных колебаний в механические колебания мембрана работает аналогично барабанной перепонке уха человека.

Превращение механических колебаний в электрические колебания напряжения или тока осуществляется различными путями:

— изменением сопротивления электрической цепи; периодичность изменения сопротивления совпадает с изменением амплитуды и частоты механических колебаний (угольный микрофон);

— использованием явления электромагнитной индукции (электродинамический микрофон);

— изменением величины емкости (конденсаторный микрофон);

— с помощью кристалла с использованием пьезоэлектрического эффекта (кристаллический микрофон).

Принцип работы микрофона

Угольный микрофон. На рис. 4 приведена принципиальная схема его включения. Микрофон включается в первич-

ную обмотку микрофонного трансформатора последовательно с батареей. Эта электрическая цепь называется цепью микрофона.

Основная часть микрофона — капсюль, состоящий из корпуса (на рисунке не показан), мембраны, угольного порошка и угольной колодки. Мембрана вплотную соприкасается с угольным порошком, обладающим свойством при сжатии уменьшать свое сопротивление.

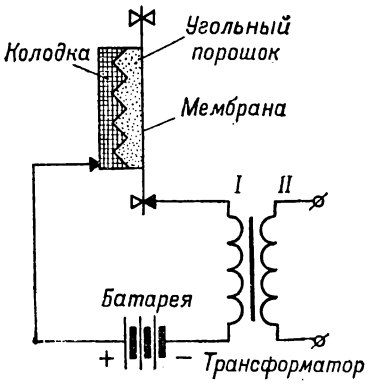


Рис. 4. Схема включения микрофона

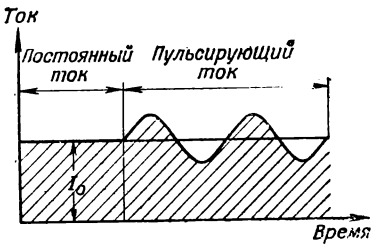


Рис. 5. Ток в цепи микрофона

К микрофону от батареи подводится постоянное напряжение величиной 4—6 В. Это напряжение целесообразно иметь небольшим, чтобы в микрофонной цепи не проходил слишком большой ток. При большом токе вследствие слабого контакта угольных зерен между ними могут появляться искры, которые будут вызывать помехи и спекание порошка.

До воздействия звуковых волн мембрана находится в состоянии покоя. В цепи микрофона проходит постоянный ток I_0 (рис. 5), величина которого зависит от сопротивления цепи микрофона. Вокруг первичной обмотки трансформатора существует постоянное магнитное поле. Во вторичной обмотке никакой э. д. с. не наводится, следовательно, ток во вторичной цепи трансформатора равен нулю.

Как только звуковые волны начнут воздействовать на мембрану, она начнет колебаться в такт с этими волнами и давление на угольный порошок будет то увеличиваться, то уменьшаться. В зависимости от давления мембраны сопротивление угольного порошка будет меняться и в цепи микрофона появится пульсирующий ток (см. рис. 5), который вызовет меняющееся магнитное поле вокруг первичной обмотки. Это поле будет пересекать витки вторичной обмотки трансформатора, и на зажимах ее появится переменная э. д. с. звуковой частоты. Чем сильнее звук действует на мембрану, тем большая переменная э. д. с. будет на зажимах

вторичной обмотки. Таким образом звуковые волны преобразуются в колебания электрического тока.

Угольные микрофоны появились раньше других, сейчас они используются главным образом в телефонных аппаратах. Когда требуется хорошее качество воспроизведения передачи, например при трансляции концерта, этот микрофон обычно не используется.

Электродинамический микрофон. Его принцип работы основан на явлении индукции э. д. с., которая создается в катушке при ее движении в постоянном магнитном поле.

При разговоре звуковые волны, воздействуя на мебрану микрофона, перемещают катушку в воздушном зазоре магнита. Вследствие магнитной индукции на зажимах катушки возникает переменное напряжение в такт со звуковыми волнами.

В конденсаторном микрофоне мембрана из тонкой алюминиевой пластины является одной из обкладок воздушного конденсатора. Звуковые волны, воздействуя на мембрану, заставляют ее колебаться, расстояние между пластинами конденсатора меняется, а следовательно, изменяется и его емкость, что вызывает появление небольшого пульсирующего тока в цепи.

Этот тип микрофона широкого распространения не получил.

Дальнейшей модернизацией этого типа микрофонов являются *электретные конденсаторные микрофоны.* У этих микрофонов мембрана изготавливается из электретных материалов.

Электретами называют диэлектрические материалы, которые, будучи наэлектризованы, длительно сохраняют поляризацию в отсутствии внешнего электрического поля.

Для изготовления мембраны используется синтетическая пленка из политетрафторэтилена, которая у нас в стране называется фторопласт-4. Замена обычной мембраны в конденсаторном микрофоне мембраной из фторопласта-4 значительно повышает чувствительность микрофона и несколько улучшает его частотную характеристику. Считают, что в ближайшее время такие микрофоны могут заменить не только динамические, но также электромагнитные и угольные микрофоны, применяемые в устройстве связи, слуховых аппаратах и других приборах.

Кристаллический микрофон иногда называется пьезоэлектрическим микрофоном.

Работа этого микрофона основана на свойстве определенных кристаллов при сжатии образовывать электрические заряды на своих поверхностях. Пьезоэлектрическими свойствами обладают, например, кварц, сегнетовая соль, пьезокерамики из титаната бария и другие материалы. Мембрана соприкасается с одной стороной кристалла, образуя одну из обкладок. Звуковые колебания вызывают изменение давления на кристалл, тем самым создавая разность потенциалов на обкладках, между которыми заключен кристалл. Эта разность потенциалов пропорциональна давлению на стороны кристалла.

Кристаллический микрофон применяется широко. Размеры его невелики и качество воспроизведения достаточно хорошее.

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ В ЗВУК

Громкоговоритель преобразовывает переменное электрическое напряжение в звуковые колебания.

Громкоговорители можно разделить на четыре различных типа: электродинамический, электростатический, электромагнитный и кристаллический.

Наиболее распространены электродинамические громкоговорители.

Такой громкоговоритель (динамик) работает по простому принципу: если по проводнику, находящемуся в магнитном поле, протекает ток, то на проводник действует механическая сила.

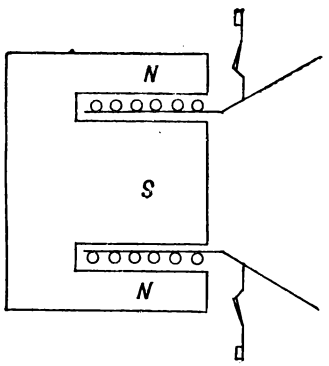


Рис. 6. Принцип устройства электродинамического громкоговорителя

Принцип устройства и работы электродинамического громкоговорителя показан на рис. 6. Катушка помещается в воздушном зазоре магнита. Переменный ток, проходя по катушке, заставляет ее перемещаться вдоль зазора. Катушка соединена с бумажным конусом, который, колеблясь в такт с переменным током, проходящим через катушку, вызывает колебания воздуха, воспринимаемые как звук.

Сопротивление катушки переменному току от 5 до 40 Ом при частоте 1000 Гц и зависит от типа громкоговорителя.

Головной телефон. Если мощность сигнала мала или нет необходимости в большой громкости, то в этих случаях используется головной телефон. В телефоне электрические колебания преобразуются в механические колебания мембраны, которая колеблется в такт с мембраной микрофона. Мембрана, колеблясь, воздействует на окружающий воздух, благодаря чему воспроизводятся звуки, произносимые перед микрофоном.

Мембрана приходит в движение, если по обмоткам катушек электромагнита проходит переменный ток. В этом случае возникает переменное магнитное поле, которое то усиливает, то ослабляет поле постоянного магнита.

Если в обмотках телефона тока нет, мембрана неподвижна. При этом она изогнута в сторону постоянного магнита под действием его поля. Если ток в катушках усиливает магнитное поле, то мембрана еще более прогибается в сторону магнита, если ток в катушках уменьшает магнитное поле, то мембрана вследствие упругости отходит от магнита. При изменениях тока мембрана колеблется.

На рис. 7 показаны различные стадии в преобразовании звуковых волн в электрические колебания, а на рис. 8 — электрических колебаний в звуковые волны.

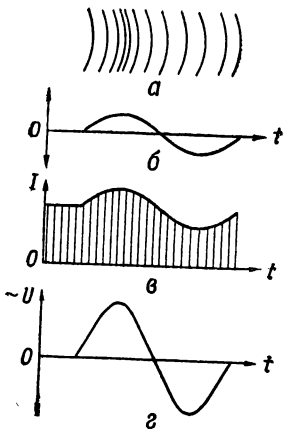


Рис. 7. Различные ступени в преобразовании звуковых волн в электрические колебания:

а — колебания воздуха; *б* — механические колебания мембраны; *в* — электрический ток; *г* — электрическое напряжение

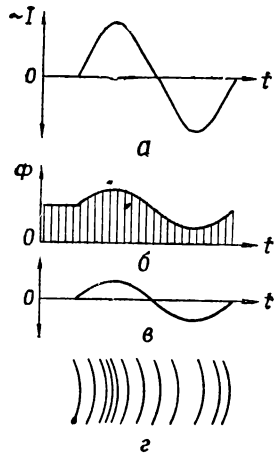


Рис. 8. Различные ступени в преобразовании электрических колебаний в звуковые волны:

а — электрический ток; *б* — изменение потока магнитного поля; *в* — механическое колебание мембраны; *г* — колебания воздуха

Глава 3

КОЛЕБАТЕЛЬНЫЙ КОНТУР

МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ

В природе очень много периодических явлений, которые характеризуются чередованием и многократной повторяемостью определенных фаз. К их числу относятся смена времен года, дня и ночи и т. д. Многие механические колебания могут быть также периодическими: колебания маятника, струны и т. п.

Как уже отмечалось, для получения радиоволн в пространстве необходимо передающую антенну питать переменным током высокой частоты, генерируемым передатчиком.

Непосредственно наблюдать электрические колебания нельзя. Поэтому рассмотрим один из простейших видов механических колебаний (доступных для наблюдения) и сравним их с электрическими колебаниями.

Простейший маятник представляет собой грузик, подвешенный на нитке. Достаточно отвести грузик в сторону от положения равновесия и отпустить его, как он начнет совершать ритмичное движение из стороны в сторону. Такое движение называется свободным колебательным движением.

Время, в течение которого грузик совершает одно полное колебание, называется *периодом свободных колебаний.*

Закон колебания маятника графически изображается синусоидой. На рис. 9 вверху изображен простейший маятник, а внизу — кривая (синусоида). В данном случае показан один период колебания, соответствующий перемещению грузика от среднего положения до одного, а затем до другого крайнего положения и снова до среднего положения. Полученная таким образом кривая (график) изображает в определенном масштабе зависимость отклонения маятника во времени.

Период свободных колебаний грузика зависит от длины нитки, на которой он подвешен. Чем длиннее нитка, тем больше времени затрачивается на одно полное колебание, т. е. с удлинением нитки период колебаний увеличивается, и наоборот.

Наибольшее отклонение грузика от положения равновесия называется *амплитудой* колебаний.

После каждого периода амплитуда колебаний грузика будет уменьшаться. Через некоторое время колебательное движение грузика прекратится или, как принято говорить, затухнет. Энергия, затраченная на отведение грузика в сторону, израсходовалась на преодоление сопротивления воздуха и трения нитки в точке подвеса. Механическая энергия в процессе колебаний перешла в тепловую энергию.

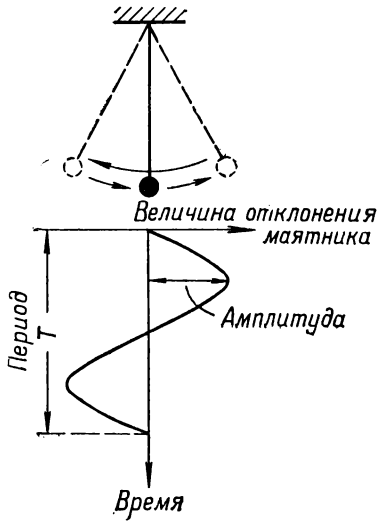


Рис. 9. Колебания маятника и кривая, описываемая им

Колебания, амплитуда которых с течением времени уменьшается, называются *затухающими колебаниями*. Скорость затухания колебаний зависит от величины потерь энергии при каждом периоде колебаний.

Чтобы колебания маятника не затухали, его необходимо подталкивать. В этом случае колебания маятника в отличие от свободных называются *вынужденными колебаниями*. Маятник находится под периодическим воздействием внешней силы.

Свободные и вынужденные колебания существенно отличаются. Период свободных колебаний определяется свойствами колеблющейся системы. При неизменных внешних условиях он остается постоянным. Период вынужденных колебаний определяется периодом действия внешней силы, т. е. может быть каким угодно.

В радиотехнике большое применение получил так называемый *электрический резонанс*. Чтобы лучше уяснить это явление рассмотрим сначала механический резонанс.

Явление, при котором возникают колебания большой амплитуды вследствие воздействия слабых внешних колебаний, называется резонансом. Слово «резонанс» происходит от латинского слова «резонаре», что означает «повторять», «отзываться».

Явление резонанса встречается довольно часто. Проследите за движениями детей, качающихся на качелях. Дети небольшими толчками в такт со свободными колебаниями качелей добиваются большого размаха колебаний и затем более слабыми толчками поддерживают эти колебания. Если толчки производятся не в такт со свободными колебаниями качелей, то раскачать качели не удастся. В этом случае одни толчки будут ускорять движение качелей, другие — тормозить.

Другими словами, резонансом называется совпадение частоты внешней силы с частотой свободных колебаний системы, при этом

получается наибольший размах колебаний. Частоту таких колебаний называют *резонансной частотой.*

Если явление резонанса можно полезно использовать в радиотехнике и музыке, то в строительном деле его всячески стремятся избежать. Возникновение механического резонанса в отдельных деталях здания может привести к полному разрушению последнего.

Итак, резонанс наступает в том случае, когда период вынужденных колебаний совпадает с периодом свободных колебаний.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ

Для получения переменного тока высокой частоты используется колебательный контур, состоящий из катушки индуктивности L и конденсатора C (рис. 10).

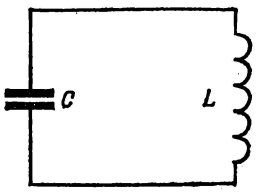


Рис. 10. Замкнутый колебательный контур

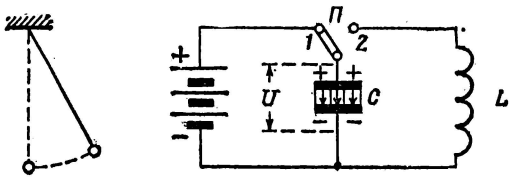


Рис. 11. Заряд конденсатора контура от источника постоянного тока

Колебательный контур — это своеобразный «электрический маятник». Если в простейшем маятнике происходят колебания грузика, то в контуре — колебания свободных электронов. Колебание маятника совершается медленно, а колебание электронов очень быстро.

На рис. 11 показано положение, когда конденсатор контура заряжен от источника постоянного тока (переключатель П в положении *1*).

В этом случае энергия будет сосредоточена в электрическом поле, образовавшемся между обкладками конденсатора, и между ними будет напряжение U, равное напряжению источника тока. Такому положению в системе с маятником соответствует момент наибольшего отклонения в одну из сторон грузика от положения равновесия. Слева на рисунке изображен маятник для сравнения его потенциальной энергии с энергией электрического поля конденсатора.

Переведем переключатель П в положение *2*, т. е. соединим заряженный конденсатор с катушкой индуктивности L. Конденсатор начнет разряжаться через катушку, но мгновенного разряда не произойдет, так как этому будет препятствовать возникающая э. д. с. самоиндукции. Разрядный ток, проходящий через катушку, будет постепенно возрастать, а напряжение на обкладках конденсатора уменьшаться. Ток в цепи достигнет наибольшей величины

в тот момент, когда напряжение на конденсаторе упадет до нуля, т. е. конденсатор полностью разрядится. Энергия, которая была сосредоточена в электрическом поле конденсатора при его заряде от источника постоянного тока, теперь перешла в магнитное поле катушки (рис. 12, *а*). Этому явлению в примере с маятником со-

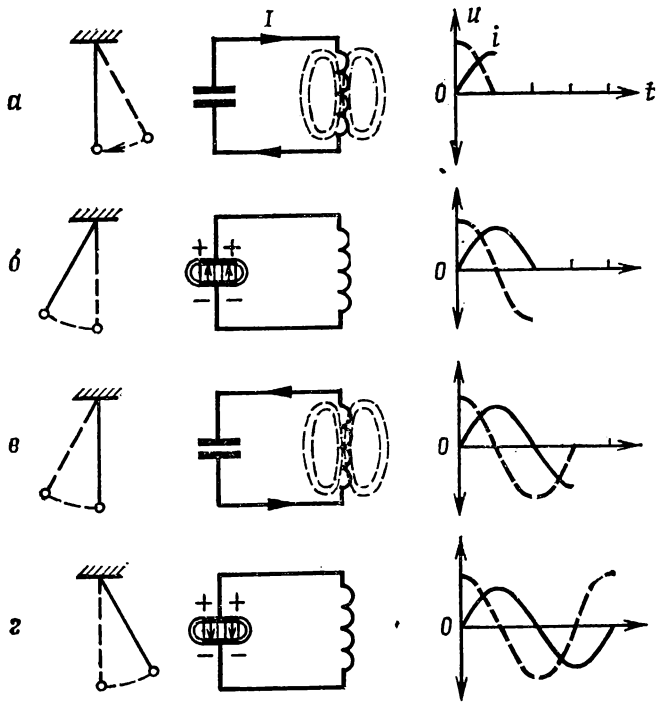


Рис. 12. Колебательный процесс в замкнутом контуре

ответствует момент прохождения грузика через положение равновесия. На рис. 12, *а* изображено изменение во времени тока разряда конденсатора (i) и изменение напряжения на его обкладках (u).

Когда напряжение на конденсаторе упало до нуля, то, казалось бы, ток в цепи должен прекратиться. Но подобно отведенному в сторону маятнику, который, дойдя до положения равновесия, продолжает свое движение по инерции, электроны также не могут мгновенно остановиться. Они продолжают свое движение в том же направлении, но количество электронов, проходящих через поперечное сечение проводника, уменьшается, т. е. уменьшается величина тока, а следовательно, и магнитный поток катушки. Изменение магнитного потока приводит к возникновению в катушке э. д. с. самоиндукции, которая по правилу Ленца препятствует

уменьшению тока. В результате появившейся э. д. с. самоиндукции катушки будет происходить перезаряд конденсатора: на нижней его обкладке начнут накапливаться положительные заряды. Ток в цепи будет уменьшаться, а напряжение на обкладках конденсатора увеличиваться. Этот процесс будет происходить до тех пор, пока полностью не исчезнет магнитное поле катушки. При этом ток станет равным нулю, а напряжение на конденсаторе достигнет примерно прежней величины, но на нижней обкладке будет «плюс», на верхней «минус». Энергия снова сосредоточится в электрическом поле конденсатора (рис. 12, *б*).

Появившееся на обкладках конденсатора в результате перезаряда напряжение снова вызовет разрядный ток, поскольку цепь остается замкнутой. Процесс перезаряда конденсатора в обратном направлении повторится (рис. 12, *в* и *г*). На этом заканчивается полный цикл одного электрического колебания, т. е. полный цикл изменений напряжения и тока в контуре.

Далее процесс колебаний тока и напряжения будет повторяться.

Переходом кинетической энергии в потенциальную и обратно объясняются колебания в механических системах. Переходом энергии магнитного поля, связанной с наличием тока в проводах (кинетическая энергия), в энергию электрического поля, связанную с накоплением зарядов на конденсаторе (потенциальная энергия), объясняются колебания в электрических цепях.

Поэтому цепь, состоящую из конденсатора и катушки индуктивности, называют колебательным контуром.

Из равенства максимальных энергий конденсатора $\frac{U^2_{\text{макс}C}C}{2}$ и катушки $\frac{I^2_{\text{макс}L}L}{2}$ следует

$$\frac{U_{\text{макс.}C}}{I_{\text{макс.}L}} = \sqrt{\frac{L}{C}} = \rho.$$

Эта величина называется характеристическим сопротивлением контура и представляет собой сопротивление катушки или конденсатора для тока, проходящего через них.

В контуре получается переменный ток высокой частоты.

Свободные электрические колебания в контуре подобно свободным механическим колебаниям маятника являются затухающими. Затухающие колебания в контуре изображены на рис. 13. Они существуют в контуре доли секунды. С каждым периодом колебаний амплитуда тока будет уменьшаться, и, наконец, ток прекратится. Это объясняется тем, что электрическая энергия, сообщенная первоначально конденсатору при заряде, расходуется на преодоление сопротивления, т. е. на нагревание соединительных проводов и самой катушки контура. Кроме того, энергия частично расходуется на излучение электромагнитных волн, о чем подробно говорится ниже.

Скорость убывания амплитуды тока определяется величиной активного сопротивления провода контура. Чем больше сопротивление, тем быстрее прекращаются колебания. При большой величине сопротивления колебания не возникнут совсем и произойдет медленный разряд конденсатора через катушку.

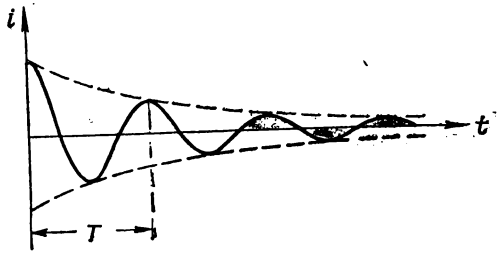


Рис. 13. Затухающие колебания в контуре

Отношение характеристического сопротивления контура к сопротивлению потерь называется добротностью контура

$$Q=\frac{\rho}{R}=\frac{X_L}{R}=\frac{X_C}{R}.$$

Период свободных колебаний в контуре зависит от скорости разряда и заряда конденсатора. Быстрому разряду и заряду конденсатора препятствует индуктивность катушки. Чем больше индуктивность, тем больше э. д. с. самоиндукции, а значит, тем медленнее конденсатор будет разряжаться и заряжаться. Таким образом, чем больше индуктивность контура, тем больше период свободных (собственных) колебаний.

Возрастание периода собственных колебаний происходит также при увеличении емкости конденсатора. С увеличением емкости возрастает время на перезарядку конденсатора.

Зависимость периода собственных колебаний от индуктивности и емкости контура выражается формулой

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

где T — период собственных колебаний контура, с;
L — индуктивность катушки контура, Гн;
C — емкость конденсатора контура, Ф;
$\pi=3{,}14$.

Путем подбора индуктивности и емкости можно получить любой период собственных колебаний контура, т. е. получить любую частоту переменного тока[1]. Частота собственных колебаний контура f определяется по формуле

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

[1] Это справедливо только для определенного диапазона частот, пока не скажутся распределенные параметры — емкость и индуктивность проводов.

Пример 1. Колебательный контур состоит из катушки индуктивностью $L=2$ мГн и конденсатора емкостью $C=500$ пФ. Определить частоту свободных колебаний в этом контуре.

Решение. Подставив значения L и C в формулу для определения частоты, получим

$$f=\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}=\frac{1}{2\pi\sqrt{2\cdot10^{-3}\cdot500\cdot10^{-12}}}=\frac{1}{2\pi10^{-6}}=$$

$$=\frac{10^6}{6{,}28}\approx1{,}6\cdot10^5\text{Гц}=160\text{ кГц}.$$

Пример 2. Контур, состоящий из конденсатора и катушки, должен генерировать частоту 500 кГц. Индуктивность катушки 1 мГн. Какова должна быть величина емкости?

Решение. Из формулы $f=\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ определим значение C, для чего возведем в квадрат левую и правую части уравнения:

$$f^2=\frac{1}{2^2\pi^2LC}.$$

Откуда

$$C=\frac{1}{40f^2L}=\frac{1}{40\cdot5\cdot10^5\cdot5\cdot10^5\,\frac{1}{10^3}}=\frac{1}{10^{10}}\text{ Ф}=100\text{ пФ}.$$

НЕЗАТУХАЮЩИЕ КОЛЕБАНИЯ В КОНТУРЕ

Для практических целей нужен переменный ток высокой частоты с постоянной амплитудой (рис. 14).

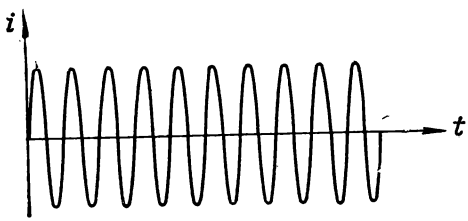


Рис. 14. Незатухающие колебания

Чтобы получить такие *незатухающие колебания*, необходимо в течение каждого периода пополнять энергию в контуре, т. е. добавлять столько энергии, сколько ее расходуется в активном сопротивлении контура. Это значит, что контур в такт со свободными колебаниями нужно подключать к источнику тока. Но частота колебаний в контуре может составлять миллионы герц! Ясно, что никаким механическим переключателем подключить контур к источнику не удастся.

Только электронная лампа (позже транзистор) оказалась тем прибором, с помощью которого эта задача была решена.

Вынужденные колебания в контуре

Выше мы рассмотрели свободные колебания в контуре. Эти колебания затухающие, и период их зависит от величины индуктивности катушки и емкости конденсатора.

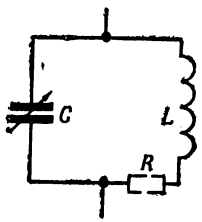


Рис. 15. Схема параллельного колебательного контура

При подключении контура к источнику тока с переменной э. д. с. в нем возникнет переменный ток, частота которого будет равна частоте подключенного источника. В такт с частотой этого источника будет происходить заряд и разряд конденсатора, т. е. в контуре возникнут вынужденные колебания тока.

Одновременно с вынужденными колебаниями в контуре возникают и свободные колебания. Если частота свободных колебаний (определяемая значениями L и C контура) не совпадает с частотой вынужденных колебаний (определяемой частотой источника тока), то свободные колебания быстро затухают и в контуре устанавливаются вынужденные колебания.

Причиной затухания являются неизбежные потери энергии в сопротивлении контура R. Условно считают это сопротивление сосредоточенным в одном месте и включенным последовательно в контур. Сопротивление R не равно сопротивлению проводов контура постоянному току, поэтому его называют активным сопротивлением контура, на котором происходит потеря энергии. Складывается оно из сопротивлений, вызывающих потери мощности в катушке R_L, в соединительных проводах $R_{пр}$, в конденсаторе R_C и тех элементов, которые получают энергию от контура и вносят в него дополнительное сопротивление $R_{доп}$. Таким элементом может быть, например, антенна или другой контур, являющийся нагрузкой.

Каждый контур имеет определенную величину активного сопротивления. В схемах радиоприемников оно не изображается, хотя в действительности следует рисовать контур, как показано на рис. 15. Здесь сопротивление изображено пунктиром, так как оно существует в распределенном виде по всему контуру.

На рис. 16 приведены кривые изменения тока (в неразветвленной цепи) и эквивалентного сопротивления в параллельном контуре[1] в зависимости от изменения частоты звукового генера-

[1] Для краткости под последовательной цепью (контуром) будем понимать последовательное включение источника переменного тока в колебательную цепь, а под параллельной цепью (контуром) — параллельное подключение источника переменного тока к колебательному контуру.

тора. Выходное напряжение генератора 10 В. Активное сопротивление контуров около 100, 200 и 310 Ом. Индуктивность катушки 15,4 мГн, емкость конденсатора 17 500 пФ.

При частоте 9,8 кГц в цепи наступает резонанс токов. Общий ток минимальный, а эквивалентное сопротивление контура — максимально. Оно определяется зависимостью

$$Z = \frac{L}{RC},$$

где L — индуктивность контура, Гн;
C — емкость, Ф;
R — общее сопротивление контура, Ом.

Подсчитаем (для контура с активным сопротивлением, равным 100 Ом) эквивалентное сопротивление по формуле

$$Z = \frac{0{,}0154}{100\,\frac{17500}{10^{12}}} \approx 8{,}6 \text{ кОм}.$$

Эквивалентное сопротивление параллельного контура наибольшее при резонансной частоте (рис. 16, *б*). При уменьшении активных потерь контура эквивалентное сопротивление возрастает.

Подведем к контуру два тока равных амплитуд, но разных частот. Одна частота равна резонансной, другая частота отличается от резонансной на 800 Гц. Переменный ток с резонансной частотой создаст бо́льшее напряжение на зажимах контура. Разница в напряжении зависит от степени расхождения частот и от остроты резонансной кривой.

На рис. 17 приведены кривые изменения тока в цепи и эквивалентного сопротивления в последовательном контуре.

Теперь ток максимальный при резонансной частоте. Резонанс напряжений наступает при той же частоте, что и резонанс токов при параллельном контуре, поскольку мы используем те же катушку и конденсатор. Эквивалентное сопротивление последовательного контура наименьшее при резонансной частоте.

Сравнивая величину изменения эквивалентного сопротивления (напряжение пропорционально величине эквивалентного сопротивления) для частот с разностью 800 Гц, мы получим следующие данные (рис. 16, *б*). По кривой I эквивалентное сопротивление при резонансе равно 8,6 кОм, при частоте 9 кГц (т. е. при расстройке в 800 Гц) оно равно 5 кОм. Отношение обеих величин эквивалентного сопротивления дает $5/8{,}6 \approx 0{,}58$. Это значит, что сигнал с частотой 9 кГц будет в 0,58 раз слабее, чем сигнал при 9,8 кГц (резонансная частота).

По кривой II для тех же частот получим отношение 0,78 (4,5 и 3,5 кОм). Сигнал при 9 кГц будет затухать меньше, чем в первом случае (кривая I). Мы говорим, что первый контур более избирательный, чем второй контур.

Свойство контура выделять токи и напряжения различных частот называется *избирательностью или селективностью* контура.

Избирательность параллельного контура улучшается по мере уменьшения активных потерь.

То же самое относится к последовательному контуру. Из рис. 17, *б* видно, что последовательный контур становится более избирательным при уменьшении активных потерь в контуре.

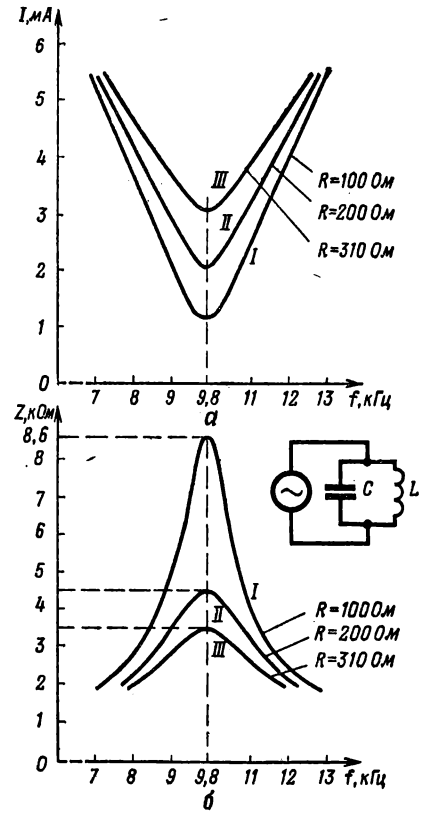


Рис. 16. Зависимость тока и эквивалентного сопротивления в параллельном резонансном контуре от частоты вынужденных колебаний:

а — зависимость тока от его частоты; *б* — зависимость эквивалентного сопротивления от частоты колебаний тока

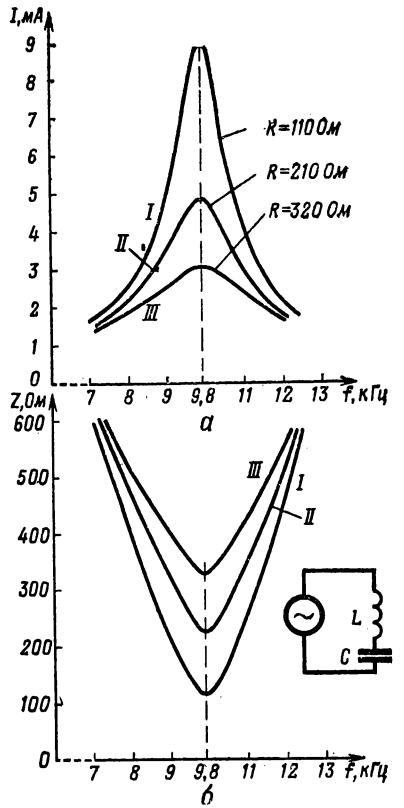


Рис. 17. Зависимость тока и эквивалентного сопротивления в последовательном резонансном контуре от частоты вынужденных колебаний:

а — зависимость тока от его частоты; *б* — зависимость эквивалентного сопротивления от частоты колебаний тока

Резонансная частота может меняться изменением емкости конденсатора или индуктивности катушки. Обычно контур настраивается переменным конденсатором и для подстройки используются подстроечные конденсаторы, которые часто называются триммерами. В некоторых случаях настройка осуществляется изменением индуктивности. Сердечник из специального магнитного материала

вводится или выводится из катушки. При введении сердечника индуктивность катушки возрастает.

Из формулы $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ можно определить полосу частот, перекрываемую настраиваемым контуром в зависимости от пределов изменения параметров контура. Предположим, что резонанс в контуре наступает при частоте 500 кГц. Если теперь уменьшить емкость конденсатора в 9 раз, то резонансная частота станет в 3 раза выше (в формуле емкость находится под знаком квадратного корня). Практически максимальную емкость переменного конденсатора можно получить около 500 пФ. Обычно для этого используется триммер емкостью порядка 25 пФ, который подключается параллельно с переменным конденсатором. Сами провода имеют определенную емкость по отношению к шасси (примерно около 15 пФ). Эта паразитная емкость образуется монтажными проводами, которые составляют как бы одну пластину конденсатора, а шасси — другую, с воздушным диэлектриком между ними.

Таким образом, общая максимальная емкость переменного конденсатора составит 500+25+15=540 пФ. Минимальная емкость будет определяться минимальной емкостью переменного конденсатора в сумме с емкостями 25 и 15 пФ. Если предположить, что общая минимальная емкость равна 60 пФ, тогда максимальное изменение емкости составит 60 : 540 = 1 : 9. Как уже сказано, частота, при которой контур может быть настроен, изменяется в отношении 1 : 3.

Радиосигналы представляют собой модулированные колебания, содержащие целый спектр гармонических колебаний различных частот, занимающих определенную полосу частот. Эти частоты располагаются по обе стороны от основной резонансной частоты, поэтому их называют боковыми частотами. Чем выше наибольшая частота модуляции, тем шире полоса частот. Сигналы будут приниматься без искажений в том случае, если все частоты спектра будут проходить без заметного ослабления. Для удовлетворительного приема радиовещательных программ полоса пропускания приемника должна быть не менее 4—5 кГц.

Избирательность контура в радиоприемнике обычно выражается разностью частот (по отношению к резонансной частоте), которая необходима, чтобы получить затухание в отношении 1/10.

Поскольку передающая станция излучает кроме несущей частоты определенную полосу боковых частот, то кривая резонанса должна иметь такую форму, при которой не было бы сильного ослабления боковых полос. Идеальная кривая резонанса должна представлять прямоугольную форму (пунктирная кривая на рис. 18), т. е. иметь широкую плоскую вершину и очень крутые спады по сторонам.

Более выгодную форму кривой резонанса по сравнению с кривой одиночного контура имеет полосовой фильтр, состоящий из двух или большего числа связанных колебательных контуров. Полосовой фильтр имеет кривую резонанса, более близкую к пря-

моугольной, и поэтому более равномерно пропускает боковые частоты модулированного сигнала (рис. 19).

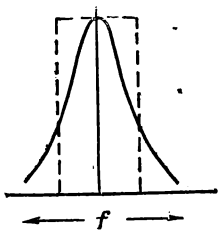


Рис. 18. Кривая резонанса одиночного контура

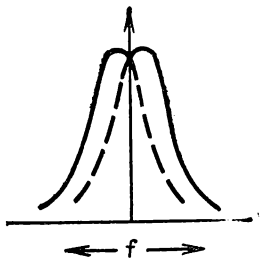


Рис. 19. Кривая резонанса двух связанных, слегка расстроенных один от другого контуров

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОЛЕБАТЕЛЬНОГО КОНТУРА

Коэффициент усиления

Острота резонансной кривой колебательного контура определяется *добротностью* (качеством) контура (Q). Чем больше отношение реактивного сопротивления при резонансе к активному сопротивлению контура, тем выше добротность и острее кривая резонанса.

Добротность для последовательной цепи

$$Q = \frac{X_L}{R},$$

где Q — добротность контура;

X_L — индуктивное сопротивление при резонансной частоте;

R — активное сопротивление контура;

Q — величина безразмерная, так как она представляет отношение двух сопротивлений.

Активное сопротивление ограничивает величину тока при резонансе, поэтому чем меньше это сопротивление, тем больше величина тока при резонансной частоте и тем больше Q (выше добротность). Чем больше величина индуктивного сопротивления при резонансе, тем большее падение напряжения на нем будет создавать максимальный резонансный ток.

Величина Q не изменится, если подсчет вести с емкостным сопротивлением X_C вместо X_L, поскольку они при резонансе равны.

Для резонансных цепей высоких частот (порядка 300—500 кГц) $Q = 50 \div 250$. Q менее 10 считается низкой, а более 300 очень высокой.

Для резонансной цепи можно рассматривать Q как коэффициент усиления, который показывает, насколько возрастает напря-

жение на зажимах катушки или конденсатора в момент резонанса в последовательной цепи по сравнению с входным напряжением.

Напряжение на зажимах индуктивности или конденсатора при резонансе равно напряжению генератора, увеличенному в Q раз:

$$U_{XL} = U_{XC} = QU_{\text{ген}}.$$

Добротность для параллельной цепи определяется так же, как и для последовательной цепи, отношением

$$Q = \frac{X_L}{R}.$$

Для параллельного контура Q можно рассматривать как коэффициент усиления, который показывает, во сколько раз возрастает эквивалентное сопротивление контура в момент резонанса. Таким образом, при резонансе

$$Z_{\text{общ}} = QX_L.$$

Пример 3. Напряжение источника тока равно 300 мкВ. Добротность резонансной цепи равна 150. Определить напряжение на зажимах катушки и конденсатора при резонансе.

Решение.

$$U_{XL} = U_{XC} = QU_{\text{ген}} = 150 \cdot 300 = 45\,000 \text{ мкВ}.$$

Пример 4. Индуктивное сопротивление катушки равно 1500 Ом. Добротность контура равна 150. Определить эквивалентное сопротивление контура при резонансной частоте.

Решение.

$$Z_{\text{общ}} = QX_L = 150 \cdot 1500 = 225\,000 \text{ Ом}.$$

Полоса пропускания

Полоса частот, в пределах которой ток в контуре составляет не менее 70,7% резонансного значения, называется *полосой пропускания* колебательного контура (рис. 20). Ширина полосы пропускания частот, отмеченная на резонансной кривой, равна 20 кГц (от 40 до 60 кГц). Резонансная цепь пропускает определенную полосу частот, равную ширине полосы пропускания. Чем острее кривая резонанса, тем уже ширина полосы пропускания.

При приеме модулированных колебаний контур должен иметь достаточно широкую полосу пропускания, чтобы не допустить сильного ослабления боковых частот, что в противном случае может привести к искажению передаваемого сигнала.

Чем меньше Q, тем шире кривая резонанса, а следовательно, больше ширина полосы пропускания. Кроме того, чем выше резонансная частота, тем больший диапазон частот попадает в ширину полосы для данной кривой резонанса.

Ширина полосы резонансной цепи равна

$$\Delta f = \frac{f_p}{Q}.$$

Например, последовательная цепь с $Q=100$ настраивается в резонанс при частоте 800 кГц. Ширина полосы пропускания этой цепи $\Delta f=\frac{800}{100}=8$ кГц. Это значит, что ток равен 70,7% (или более) максимальной величины для всех частот в диапазоне 8 кГц. В середине этой полосы пропускания лежит резонансная частота

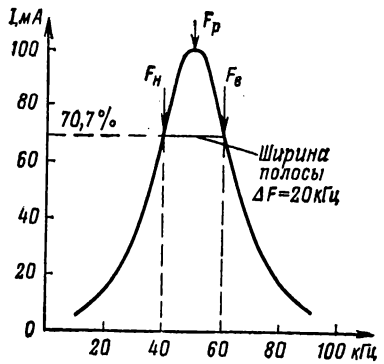


Рис. 20. Ширина полосы пропускания резонансной цепи $\Delta F=$ =20кГц

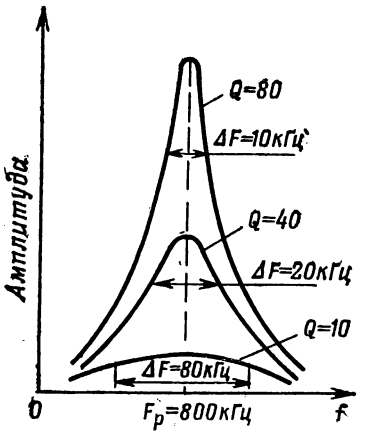


Рис. 21. Зависимость ширины полосы пропускания от различных значений Q

800 кГц, пределы полосы от 796 до 804 кГц. Напряжение на зажимах конденсатора C в последовательно-резонансной цепи также будет равно 70,7% (или больше) максимальной величины для той же ширины полосы 8 кГц.

При параллельно-резонансной цепи, имеющей добротность контура больше 10, приведенную выше формулу можно использовать для подсчета полосы пропускания частот, которая создает сопротивление 70,7% (и более) максимальной величины эквивалентного сопротивления при резонансной частоте.

Чем больше Q, тем острее кривая резонанса, больше амплитуда тока в последовательной резонансной цепи и эквивалентное сопротивление в параллельной резонансной цепи (ΔF на рис. 21 — ширина полосы пропускания на уровне половинной мощности).

Формула для резонансной частоты

Для любой LC-цепи (последовательной или параллельной) частота собственных колебаний контура равна $\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$. Эта формула получается следующим образом. При резонансе

$$X_L=X_C \text{ или } 2\pi f_p L=\frac{1}{2\pi f_p C}.$$

Из уравнения получим

$$f_р = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{0{,}159}{\sqrt{LC}},$$

где L — индуктивность, Гн;
C — емкость, Ф;
$f_р$ — частота, Гц.

Пример 5. Определите резонансную частоту при $L=239$ мкГн и $C=106$ пФ.

Решение. L должно быть выражено в генри 239 мкГн$=239\cdot10^{-6}$ Гн и C в фарадах 106 пФ$=106\cdot10^{-12}$ Ф.

$$f_р = \frac{0{,}159}{\sqrt{239\cdot10^{-6}\cdot106\cdot10^{-12}}} = \frac{0{,}159}{\sqrt{253\cdot10^{-18}}} = \frac{0{,}159}{15{,}9\cdot10^{-8}} =$$

$$= \frac{0{,}159}{0{,}159\cdot10^{-6}} = 1\cdot10^{6} = 1000 \text{ кГц}.$$

Частота резонанса обратно пропорциональна корню квадратному из значений L и C. Чем больше L и C, тем меньше $f_р$. Цепь, состоящую из L и C, можно настроить в резонанс при любой частоте от нескольких герц до многих мегагерц в зависимости от величины индуктивности и емкости. При $L=8$ Гн и $C=20$ мкФ цепь настраивается в резонанс при низкой частоте (приблизительно 12 Гц), а при $L=2$ мкГн и $C=3$ пФ — при высокой радиочастоте (примерно 65 МГц).

Произведение LC определяет резонансную частоту $f_р$. Имеется множество LC-сочетаний, которые могут создавать резонанс на одной и той же частоте. В табл. 1 приведены три возможные комбинации L и C, создающие резонанс на частоте 1000 кГц. Резонансная частота одна и та же, потому что когда L уменьшается (увеличивается), во столько же раз увеличивается (уменьшается) другой множитель C, в результате произведение LC остается постоянным.

Таблица 1

Сочетание L и C, позволяющее получить резонанс на частоте 1000 кГц

L, мкГн	C, пФ	Произведение LC	$X_L = 2\pi fL$, Ом при 1000 кГц	$X_C = \frac{1}{2\pi fC}$, Ом при 1000 кГц
23,9	1060	25334	150	150
119,5	212	25334	750	750
239	106	25334	1500	1500

Реактивное сопротивление при резонансе изменяется при различных значениях L и C, но во всех случаях $X_L=X_C$ на частоте 1000 кГц.

Чем больше отношение $\frac{L}{C}$, тем лучше Q. Из табл. 1 видно, что $X_L = X_C$, но величина каждого из них становится большей, если произведение LC получается при значениях более высокой индуктивности и меньшей емкости. Чем больше отношение $\frac{L}{C}$, тем больше реактивное сопротивление при резонансной частоте, тем лучше добротность контура Q, хотя активное сопротивление при этом также возрастает, но относительно медленно (так как увеличивается размер катушки). На более высоких резонансных частотах из-за больших потерь начинает заметно увеличиваться активное сопротивление. Таким образом, более высокое Q получается при большем отношении $\frac{L}{C}$ до определенных пределов. Для обычных катушек, предназначенных для работы в диапазоне радиочастот, максимальное Q можно получить при индуктивном сопротивлении катушки около 1000 Ом.

Определение L или C при резонансе. Любую из трех величин L, C и $f_р$ можно подсчитать по формуле резонансной частоты, если известны две другие величины. Резонансную частоту можно измерить. Тогда при известной одной величине L или C и найденной резонансной частоте можно вычислить третью величину.

Например, чтобы найти L или C из формулы

$$f_р = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}},$$

возведем в квадрат обе ее части, чтобы исключить радикал

$$f_р^2 = \frac{1}{(2\pi)^2 LC}.$$

Тогда

$$C = \frac{1}{(2\pi)^2 f_р^2 L}$$

и

$$L = \frac{1}{(2\pi)^2 f_р^2 C}.$$

НАСТРОЙКА КОЛЕБАТЕЛЬНОГО КОНТУРА

Настройка контура — это получение резонансов на различных частотах изменением емкости конденсатора или индуктивности катушки. Переменная емкость конденсатора C (рис. 22) дает возможность настроить контур в резонанс на любую из пяти различных частот входного напряжения.

Настройка контура означает выбор желаемой частоты. Кривые резонанса показаны с возрастающей амплитудой, так как добротность контура Q возрастает.

Пять частот, приведенные на рисунке, даны в качестве примера. В действительности конденсатор емкостью 26,5—424 пФ и катушкой индуктивности 239 мкГн позволяет получить резонанс с любой из частот в диапазоне 500—2000 кГц.

Настройка в резонанс параллельного контура также производится изменением емкости или индуктивности.

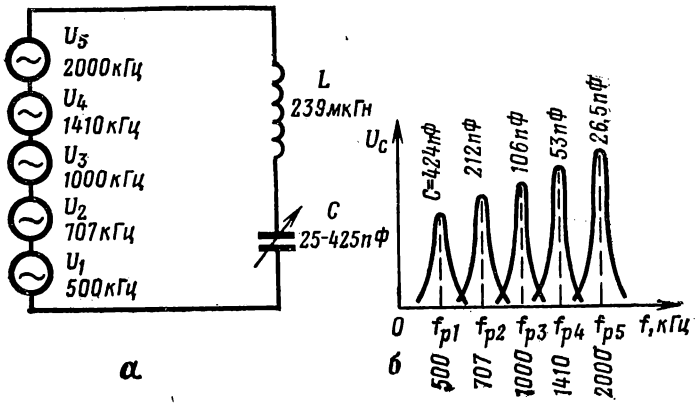


Рис. 22. Настройка последовательной цепи в резонанс при помощи конденсатора С переменной емкости:

а — цепь с входным напряжением различных частот; *б* — кривые резонанса при различных частотах (относительные амплитуды не в масштабе)

Коэффициент перекрытия. При настройке контура изменение разонансной частоты обратно пропорционально изменению корня квадратного из величины емкости *C* или индуктивности *L*. При уменьшении емкости конденсатора в 4 раза — с 424 до 106 пФ — резонансная частота увеличивается в 2 раза — с 500 до 1000 кГц.

Итак, чтобы перекрыть диапазон частот от 500 до 2000 кГц (коэффициент перекрытия в данном случае 4 : 1, т. е. отношение наибольшей частоты к наименьшей), емкость должна изменяться от 424 до 26,5 пФ (отношение наибольшей емкости к наименьшей 16 : 1). Практически невозможно получить коэффициент перекрытия по частоте больше чем 4 : 1 при одной комбинации емкости и индуктивности с сохранением высокой добротности контура *Q*.

Для получения более широкого диапазона волн используются различные катушки индуктивности.

Расстроенный колебательный контур

Последовательный расстроенный контур. Когда частота входного напряжения ниже резонансной, емкостное сопротивление больше индуктивного. Отсюда напряжение на конденсаторе больше, чем на индуктивности. В целом цепь по отно-

шению к приложенному напряжению имеет емкостный характер, т. е. ток в цепи опережает приложенное напряжение.

Если частота входного напряжения выше резонансной, то больше индуктивное сопротивление. Падение напряжения на нем будет больше, а ток в цепи будет отставать от приложенного напряжения.

В том и другом случае выходное напряжение значительно ниже, чем при резонансе. Чем больше расстроен контур, тем больше эта разница.

Параллельный расстроенный контур. Когда частота подводимого напряжения ниже резонансной частоты параллельного контура, индуктивное сопротивление меньше емкостного, поэтому ток индуктивной ветви больше тока емкостной ветви. В общей цепи протекает индуктивный ток, который отстает от приложенного напряжения.

Когда частота подводимого напряжения выше резонансной частоты, то в общей цепи будет протекать емкостной ток, который будет опережать приложенное напряжение.

В том и другом случае эквивалентное сопротивление контура меньше, чем эквивалентное сопротивление при резонансной частоте.

Использование последовательного и параллельного контуров

Когда входное напряжение для LC-цепи поступает от генератора, имеющего небольшое внутреннее сопротивление, выгодно использовать резонанс напряжений (последовательная

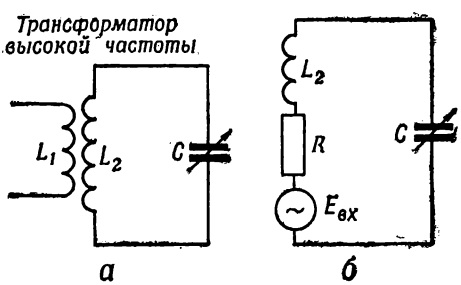


Рис. 23. Практическое использование последовательной резонансной цепи:

а — трансформатор высокой частоты индуктирует переменную э. д. с. во вторичной обмотке L_2; *б* — эквивалентная схема

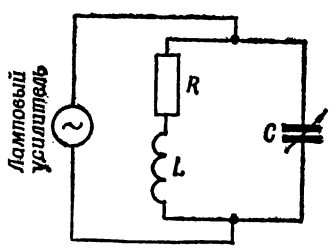


Рис. 24. Практическое использование параллельной резонансной цепи

цепь). Небольшое, последовательно включенное сопротивление позволяет получить высокую добротность контура Q при достаточно острой кривой резонанса. Пример такого использования показан на рис. 23.

Переменное напряжение, подводимое к первичной обмотке трансформатора, индуктирует во вторичной обмотке переменное

напряжение. Таким образом, источник входного напряжения включен последовательно в резонансную цепь, эквивалентная схема которой приведена на рис. 23. В сущности витки вторичной обмотки L_2 служат генератором с внутренним сопротивлением R. Небольшое сопротивление катушки, порядка нескольких Ом, обеспечивает высокое Q последовательного резонансного контура.

На рис. 24 приведен пример использования резонанса токов (параллельная цепь).

Входное напряжение для этой цепи поступает от выходной цепи лампового усилителя, который имеет высокое внутреннее сопротивление от 10 000 до 1 000 000 Ом. Чем больше сопротивление на зажимах параллельной резонансной цепи, тем больше добротность Q. Кроме того, чем больше сопротивление нагрузки для лампового усилителя, тем больше величина усиления.

Глава 4

ФИЛЬТРЫ

Часто в цепях радиотехнических устройств одновременно протекают токи самых различных частот: от очень высоких радиочастот до низких звуковых частот, а также токи нулевой частоты (постоянный ток). Обычно токи некоторых частот должны воздействовать на последующие элементы схемы, воздействие токов других частот является вредным, так как нарушает нормальную работу аппаратуры. Следовательно, возникает необходимость выделения токов одних частот и подавление токов других частот. Для этого используется электрический фильтр.

В зависимости от того, колебания каких частот пропускаются, различают:

— заграждающие фильтры;
— фильтры верхних и нижних частот;
— полосовые фильтры.

Работа фильтров основана на использовании противоположных свойств индуктивного и емкостного сопротивлений. При увеличении частоты колебаний индуктивное сопротивление увеличивается, а емкостное уменьшается, и, наоборот, при уменьшении частоты индуктивное сопротивление уменьшается, а емкостное увеличивается. Подбором величин L и C осуществляется любое разделение частот.

Пульсирующий ток

Ток, который изменяется по амплитуде, но не изменяется по направлению, называется пульсирующим током.

На рис. 25 приведен пример образования пульсирующего тока. Постоянное напряжение батареи $U_б$ включено последовательно с переменным напряжением генератора $U_г$. Напряжение на резисторе R равно сумме приложенных напряжений. Пульсирующий ток, протекающий через резистор, изменяет свою величину в обе стороны от постоянного уровня 20 А. Величина тока и напряжения совпадает, поскольку резистор $R=1$ Ом.

Составляющие постоянного и переменного тока. Пульсирующее напряжение U_R (рис. 25) представляет переменное напряжение генератора $U_г$, наложенное на постоянное

напряжение $U_б$ батареи. В сущности составляющая постоянного тока складывается с составляющей переменного тока. Если подключить к зажимам резистора вольтметр постоянного тока, он покажет уровень постоянной составляющей 20 В; если подключить вольтметр переменного тока, он покажет действующее значение переменной составляющей 7,07 В (амплитудное значение $\times$ $\times 0{,}707$ = действующему значению).

Следует заметить, что относительно уровня постоянной составляющей изменение переменного напряжения или переменного тока происходит с изменением полярности. Изменение U_R от +20

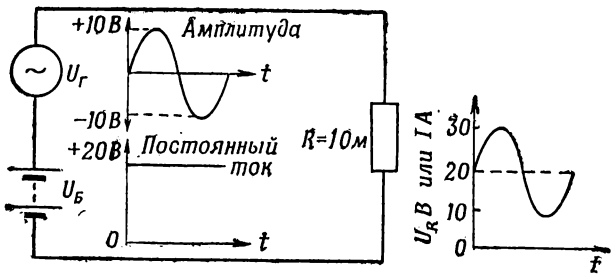


Рис. 25. Пульсирующий ток и напряжение (напряжение на резисторе R равно $U_б + U_г$)

до +10 В представляет уменьшение положительного напряжения по сравнению с нулем, но по сравнению с уровнем постоянной составляющей +20 В величина +10 В представляет отрицательную величину.

ВЫДЕЛЕНИЕ ПЕРЕМЕННОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ

Очень часто необходимо выделить из пульсирующего колебания переменную составляющую. Это легко осуществляется с помощью трансформатора или конденсатора.

Трансформаторная связь

Постоянный ток (постоянная составляющая), протекая по первичной обмотке трансформатора, создает постоянное магнитное поле, которое не оказывает влияние на вторичную обмотку трансформатора (рис. 26). Переменный ток (переменная составляющая) индуктирует переменную э. д. с. во вторичной обмотке. Уровень постоянного тока в первичной цепи соответствует нулевому уровню переменного напряжения (тока) вторичной цепи.

Когда ток в первичной обмотке возрастает над уровнем постоянного тока, во вторичной обмотке создается напряжение одной полярности по отношению к нулевой оси, а когда уменьшается — другой полярности.

Напряжение во вторичной обмотке может совпадать по фазе с напряжением первичной обмотки или быть сдвинутым на 180° в зависимости от направления обмоток или способа их подключения. Напряжение может повышаться или понижаться в зависимости от коэффициента трансформации.

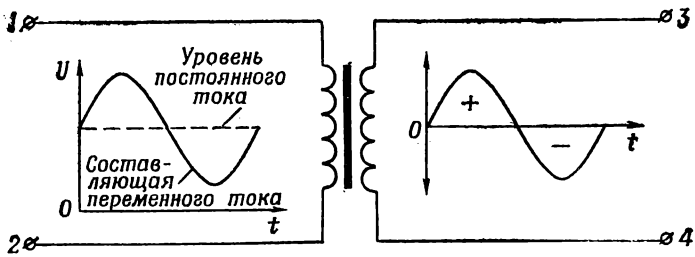


Рис. 26. Схема выделения переменной составляющей из пульсирующего колебания с помощью трансформатора

Емкостная связь

Пульсирующее напряжение подводится к цепи, состоящей из резистора R и конденсатора C (рис. 27). Конденсатор заряжается до уровня постоянного входного напряжения, которое

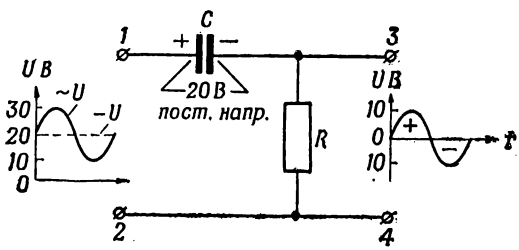


Рис. 27. Схема выделения переменной составляющей из пульсирующего колебания с помощью конденсатора

представляет среднее значение переменного напряжения. Процесс зарядки считается законченным к исходу промежутка времени $t=5\tau$, где $\tau=RC$ — постоянная времени рассматриваемой цепи. Это время очень мало́ и характеризует собой переходный процесс (момент включения или выключения) в цепи. Мы же рассматриваем стационарный (установившийся) процесс, в котором емкость для постоянной составляющей пульсирующего тока имеет огромное сопротивление (равное бесконечности), а следовательно, эта составляющая тока будет равна нулю и все входное напряжение будет полностью приложено к конденсатору. Таким образом, составляющая постоянного тока блокируется, поскольку она не соз-

дает напряжения на резисторе R. Составляющая переменного тока создает напряжение на резисторе R.

Изменения составляющей переменного тока симметричны относительно среднего уровня пульсирующего напряжения, так как заряд — разряд конденсатора происходит через одно и тоже сопротивление. В один полупериод напряжение на конденсаторе увеличивается, в другой полупериод на ту же величину уменьшается.

Переменная составляющая пульсирующего напряжения создает ток заряда и разряда конденсатора C. Этот ток очень маленький и не создает заметного падения напряжения на конденсаторе C. Падение напряжения на резисторе R вследствие его большой величины практически равно переменной составляющей пульсирующего напряжения. Полярность напряжения на резисторе определяется направлением тока в цепи.

Нулевой уровень переменного напряжения на резисторе R соответствует среднему уровню пульсирующего напряжения, приложенному к RC цепи. Величина напряжения выше среднего уровня создает положительный полупериод переменного напряжения на резисторе R, величина ниже среднего уровня — отрицательный.

Переменная составляющая приложенного напряжения и переменное напряжение на резисторе R находятся в фазе. Это справедливо для всех RC цепей связи, когда сопротивление R берется в 10 раз и более больше сопротивления X_C. В этом случае реактивное сопротивление очень мало по сравнению с активным и фазовый угол практически равен нулю.

Напряжение на отдельных участках цепи. Вольтметр постоянного напряжения, подключенный к точкам *1* и *2*, покажет средний уровень пульсирующего напряжения 20 В (постоянную составляющую), а вольтметр переменного тока — действующую величину 7 В переменной составляющей. В точках *1* и *3* вольтметр постоянного напряжения покажет 20 В, а вольтметр переменного напряжения 0 В. В точках *3* и *4* эти вольтметры соответственно покажут 0 В и 7 В.

Во всех случаях конденсаторы блокируют постоянный ток и пропускают переменный. Выбор величины конденсатора C зависит от частоты составляющей переменного тока.

Шунтирующие емкости

Конденсатор C (рис. 28) является шунтирующим для сопротивления резистора R_1. Для всех частот, при которых сопротивление X_C составляет $\frac{1}{10}$ величины сопротивления резистора R_1 или меньше, составляющая переменного тока минует резистор R_1, проходя через небольшое сопротивление X_C. Так как это сопротивление невелико, то на нем практически переменный ток не создает падения напряжения, поэтому его и не будет на сопротивлении R_1, поскольку конденсатор C и резистор R_1 включены параллельно.

Для постоянного тока конденсатор C представляет бесконечно большое сопротивление. В этом случае резисторы R_1 и R_2 выполняют роль делителя постоянного напряжения.

Делителем напряжения переменного тока являются резистор R_2 и эквивалентное сопротивление параллельно соединенных R_1 и C, которое в нашем примере равно около 500 Ом.

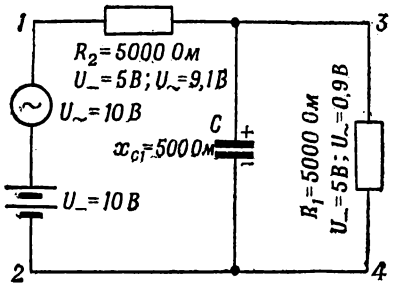


Рис. 28. Конденсатор C шунтирует резистор R_1

Вольтметр постоянного напряжения покажет 5 В на резисторе R_2 и 5 В на резисторе R_1; вольтметр переменного напряжения покажет 9,1 В и 0,9 В соответственно.

РАЗДЕЛЕНИЕ НИЖНИХ И ВЕРХНИХ ЧАСТОТ

Фильтры нижних и верхних частот представляют комбинацию ранее описанных R, L, C.

По своему устройству они разделяются на Г- Т- и П-образные фильтры. Любой из трех видов может работать как фильтр нижних и верхних частот.

Способность фильтра уменьшать амплитуду нежелаемых частот называется *затуханием*. Частота, от которой начинается затухание, называется *предельной частотой* (граничной, частотой срезания).

На рис. 29 приведена характеристика фильтра нижних частот. Предельная частота 15 кГц. Все токи с частотами меньше 15 кГц проходят и создают напряжение на нагрузке, токи предельной частоты и выше — подавляются.

На рис. 30 приведена характеристика фильтра верхних частот. Полоса подавления 0—50 Гц.

Полосовые фильтры. Если одновременно использовать фильтры нижних и верхних частот, то можно пропустить сигналы определенной полосы частот, например от 50 до 15 000 Гц. Частоты ниже 50 и выше 15 000 Гц подавляются. Комбинированная цепь, состоящая из фильтров нижних и верхних частот, образует полосовой фильтр.

Полосовой фильтр образуют и два связанных резонансных контура.

При индуктивной связи между двумя контурами степень связи определяется коэффициентом взаимоиндукции. В результате этой связи поля обеих катушек взаимодействуют между собой. Если использовать два резонансных контура, катушки которых индуктивно связаны, то работа обоих контуров будет зависеть один от другого (рис. 31).

Рис. 29. Характеристика фильтра нижних частот с предельной частотой 15 кГц

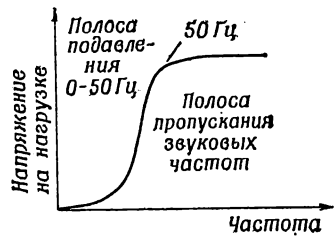


Рис. 30. Характеристика фильтра верхних частот с предельной частотой 50 Гц

При очень слабой связи получается кривая резонанса *1*, которая напоминает кривую резонанса одиночного контура (рис. 32). Если степень связи увеличить, то общее эквивалентное сопротив-

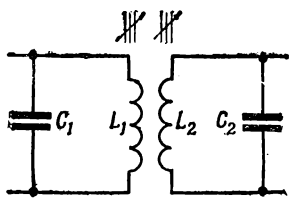


Рис. 31. Полосовой фильтр из двух контуров, связанных индуктивно

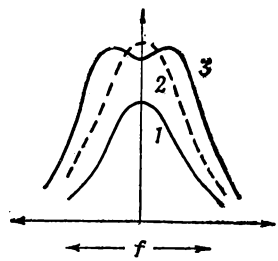


Рис. 32. Кривые резонанса полосового фильтра:
1 — связь меньше критической; *2* — связь равна критической; *3* — связь больше критической

ление будет возрастать и мы получим кривую резонанса *2*. Эта кривая также имеет один горб. По мере увеличения связи кривая резонанса *3* будет иметь два горба, то же самое как и два контура, которые слегка расстроены один относительно другого.

Связь между катушками, при которой получается кривая резонанса, подобная кривой *1*, называется связью *меньшей критической,* при кривой резонанса *2* связь называется *критической.* Как только на кривой резонанса появятся два горба, связь между контурами станет больше критической.

Подбором связи и улучшением качества контуров стараются получить резонансную кривую с достаточно плоской вершиной и крутыми спадами боковых сторон.

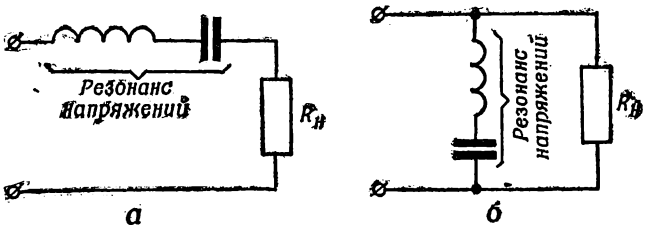


Рис. 33. Последовательная резонансная цепь в качестве фильтра:

а — фильтрующие элементы включены последовательно с $R_н$;
б — фильтрующие элементы включены параллельно с $R_н$

Резонансные фильтры. Настроенные в резонанс цепи служат хорошими фильтрами в диапазоне радиочастот.

Последовательная резонансная цепь имеет максимальный ток и минимальное эквивалентное сопротивление при резонансной частоте. Если эту цепь соединить последовательно с сопротивлением нагрузки (рис. 33, *а*), тогда в зависимости от добротности контура Q определенная полоса частот будет создавать максимальное напряжение на выходном сопротивлении $R_н$. Если же эту цепь соединить параллельно с $R_н$ (рис. 33, *б*), тогда определенная полоса частот будет подавляться, практически не создавая напряжения на нагрузке.

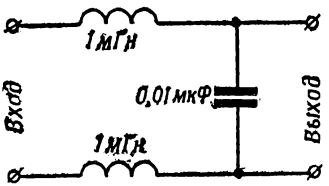


Рис. 34. Схема фильтра цепи питания (пропускает токи с частотой колебаний до 50 Гц и подавляет радиочастоты)

Фильтр в цепи питания. Обычная сеть частотой 50 Гц является источником энергии для многих потребителей. По линии питания распространяются помехи в виде токов различных частот. Помехи создаются промышленными устройствами: электродвигателями, рентгеновскими и сварочными аппаратами и т. д. Чтобы при включении приемника помехи не попали на его вход и выход и не создавали различных шумов и свистов, используют заградительные фильтры (рис. 34).

Шунтирующий конденсатор с двумя последовательно включенными дросселями высокой частоты образуют симметричный Г-образный фильтр нижних частот. Использование двух дросселей делает цепь симметричной по отношению к «земле». Дроссели имеют большое индуктивное сопротивление для составляющих высоких частот, практически не представляя сопротивления для тока 50 Гц. Шунтирующий конденсатор создает короткое замыкание для токов высоких частот.

Глава 5

АНТЕННЫ

Антенна предназначается для излучения или приема электромагнитных волн. Каждый передатчик и приемник имеют антенну.

ПОНЯТИЕ ОБ АНТЕННАХ

Всякий провод, по которому протекает переменный ток высокой частоты, излучает электромагнитные волны. Тем не менее не всякая электрическая цепь может создавать в пространстве

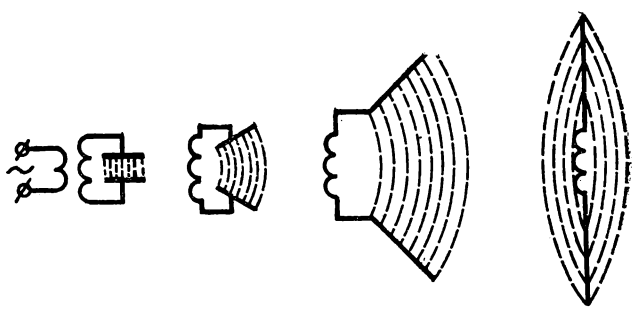


Рис. 35. Переход от замкнутого колебательного контура к открытому

достаточно эффективное излучение. При наличии в цепи двух проводов, по которым чаще всего ток протекает в противоположных направлениях, электрические и магнитные поля, излучаемые прямым и обратным проводами, ослабляют друг друга, и поэтому излученное поле получается во много раз слабее, чем если бы излучал только один провод.

Для образования радиоволн в пространстве нельзя использовать и обычный замкнутый контур, называемый контуром с сосредоточенными параметрами *LC*. Магнитное поле такого контура сосредоточено вблизи витков катушки, охватывая небольшое пространство. Еще меньшее пространство занимает электрическое

поле, сосредоточенное между обкладками конденсатора. Изменения величины и направления магнитного и электрического полей при колебательном процессе создают вблизи контура очень слабое электромагнитное поле, которое не способно распространяться на большие расстояния.

Такой контур можно сравнить с закрытой комнатой, внутри которой находится источник звука. Находясь вне комнаты, вы слышите слабый звук. Чтобы звук был хорошо слышен, достаточно раскрыть окна и двери. Для того чтобы замкнутый контур мог излучать, его также нужно «раскрыть».

Чтобы создать радиоволну, способную распространяться на большие расстояния, нужно расширить пространство, занимаемое магнитным и электрическим полями. Эта задача решается с помощью антенн. Антенна представляет собой открытый колебательный контур.

Проследим преобразование замкнутого колебательного контура в открытый контур (антенну). Возьмем замкнутый колебательный контур (рис. 35) и будем раздвигать пластины конденсатора. Чтобы емкость контура не изменилась, необходимо при раздвижении пластин одновременно увеличивать их размеры (только в длину). В конце концов конденсатор превратится в два длинных провода. При этом электрическое поле займет значительно большее пространство, чем раньше.

Точно так же (если заменить катушку длинным проводом) увеличится пространство, охватываемое магнитным полем.

Таким образом колебательный контур с сосредоточенными параметрами L и C превратился в колебательный контур (в два провода) с распределенными параметрами L и C, т. е. в антенну (рис. 36), способную создавать радиоволны в пространстве.

Рис. 36. Простейшая антенна

ПОНЯТИЕ ОБ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ И ЕГО ИЗЛУЧЕНИИ

Образование и распространение радиоволн в пространстве в некоторой степени аналогичны образованию и распространению волн на поверхности воды (рис. 37).

Камень, брошенный в воду, является источником образования двух видов волн. С одной стороны, звуковой, так как слышен всплеск. Как эта волна распространяется, мы не увидим. С другой стороны, появится волна на поверхности воды, за распространением которой можно проследить.

От места падения камня начнут расходиться волны в виде концентрических окружностей, которые, расширяясь, будут охватывать все большую поверхность воды.

Бросим на поверхность воды спичку. Мы заметим, что она не будет увлечена проходящей волной, а останется на месте, совершая колебания вверх и вниз. Отсюда ясно, что вода не передвигается вместе с волной. Камень нарушил покой одних частиц воды и заставил их совершать колебательные движения вверх и

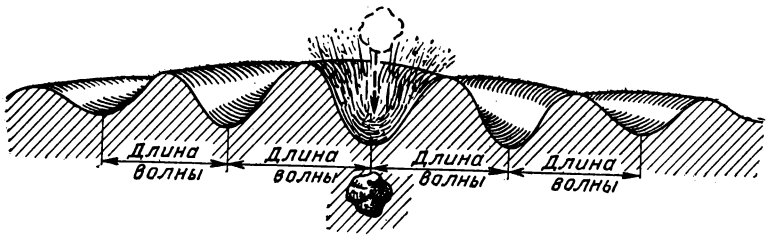


Рис. 37. Образование волн на поверхности воды

вниз. Это движение передается соседним частицам, которые начинают совершать такие же колебания, но с некоторым опозданием. Постепенно все большая масса воды втягивается в колебательное движение.

В результате на поверхности воды образуются волны, которые представляют собой распространение вертикального колебания частиц воды.

Расстояние между двумя соседними гребнями или впадинами называется *длиной волны* (рис. 37).

Подобно волнам на поверхности воды или звуковым волнам радиоволны, возникая около антенны, распространяются с определенной скоростью в пространстве.

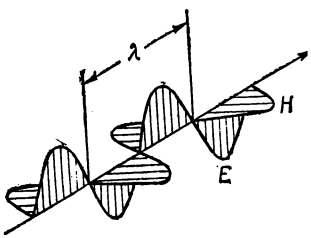


Рис. 38. Мгновенные значения напряженностей электрического и магнитного полей в пространстве

При прохождении тока по проводу вокруг него образуется магнитное поле, а так как между отдельными участками провода существует определенная разность потенциалов, то возникает и электрическое поле.

Между электрическим и магнитным полями существует неразрывная связь. Электрическое поле вызывает движение электронов, т. е. электрический ток. Электрический же ток в свою очередь вызывает появление магнитного поля вокруг проводника или вокруг того места, где он проходит. Следовательно, электрическое поле создает магнитное поле, и, наоборот, магнитное поле (если оно переменное) создает электрическое поле и вызывает появление электрического тока.

Так как изменяющиеся магнитное и электрическое поля неразрывно связаны, то лучше говорить об электромагнитном поле. *Под электромагнитным полем следует понимать совокупность непрерывно изменяющихся электрического и магнитного полей.*

На рис. 38 приведены значения напряженностей магнитного и электрического полей для одного момента времени. Направление напряженности H магнитного поля в каждой точке перпендикулярно направлению напряженности E электрического поля.

На рис. 39 с помощью силовых линий изображены электрическое и магнитное поля вокруг антенны. При питании антенны пере-

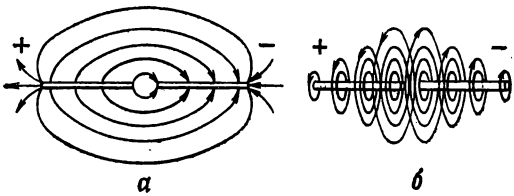


Рис. 39. Условное изображение поля вокруг вибратора, питаемого в середине, для одного момента времени:
а — электрическое поле; *б* — магнитное поле

менным током высокой частоты создается переменное электромагнитное поле. Поле, образующееся от напряжения, является электрическим полем, поле, образующееся от тока, — магнитным полем. На рис. 39, *а* изображены электрические силовые линии в одной плоскости. В действительности они окружают антенну во всех плоскостях, включая и эту. Электрические линии имеют наибольшую густоту на концах антенны, где имеется максимальное напряжение. Магнитные силовые линии (рис. 39, *б*) тоже окружают антенну и имеют наибольшую интенсивность в точке наибольшего тока, т. е. в средней части антенны.

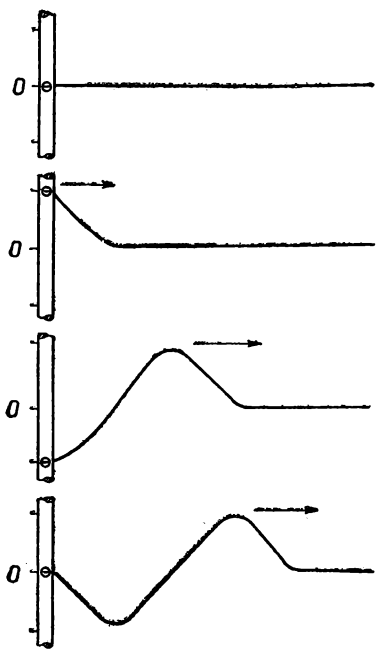


Рис. 40. Изменение электрического поля при движении электрона в проводнике

Некоторое упрощенное представление об образовании и распространении электромагнитных волн можно получить, рассмотрев колебательное движение одного электрона.

Как известно, вокруг электрического заряда существует электрическое поле. При перемещении заряда будет перемещаться и электрическое поле (силовые линии). Однако картина поля измениться мгновенно не может. Для этого требуется какое-то вре-

мя. Изменение состояния поля распространяется от одной точки пространства к другой со скоростью света.

На рис. 40 изображены один период колебания электрона в проводнике и изменение при этом силовой линии электрического поля в пространстве. При продолжительном периодическом коле-

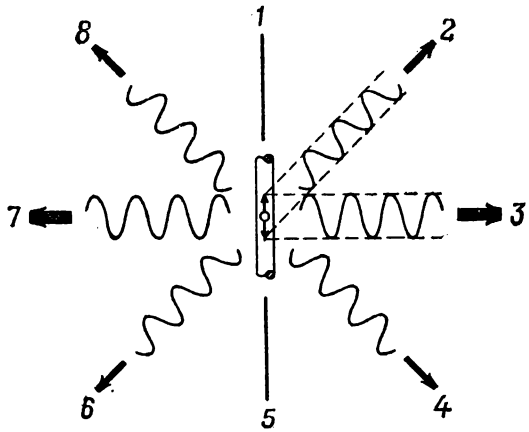


Рис. 41. Условное изображение распространения волн электрического поля в различных направлениях от колеблющегося электрона

бании электрона в проводнике в пространстве образуется волна электрического поля.

На рис. 41 изображена картина распространения волн электрического поля в восьми направлениях от колеблющегося электрона. Колебания с наибольшей амплитудой распространяются в направлениях, перпендикулярных оси провода, т. е. в этих направлениях происходит наибольшее излучение. В направлениях оси провода амплитуды колебаний равны нулю, т. е. в этих направлениях отсутствует излучение. Характер излучения и распространения волн не изменится, если вместо колебаний одного электрона будут происходить колебания многих электронов. Чем больше электронов участвует в колебательном процессе, тем больше мощность излучаемых колебаний.

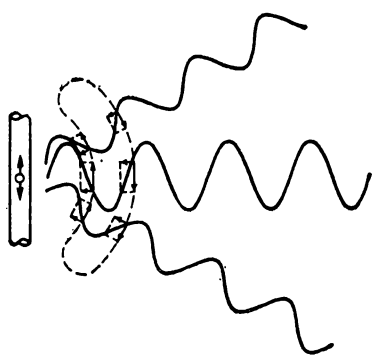


Рис. 42. Составляющие электрического поля

Электрическое поле в любой точке пространства можно разложить на две составляющие (рис. 42). Составляющие электри-

ческого поля, перпендикулярные направлению распространения, несут с собой энергию. Если их просуммировать во всех точках пространства, получим электрическое поле в виде замкнутых силовых линий, которые отделяются от провода и распространяются в пространстве (рис. 43).

На рис. 44 показано образование электрического поля, изображенного силовыми линиями, за один период изменения напряжения на зажимах генератора, питающего вибратор. Так создается электрическое поле радиоволны, которое распространяется со скоростью света. Показать магнитное поле, вызванное изменениями электрического поля, на том же рисунке весьма сложно. Оно распространяется концентрическими кругами. Сочетание электрического и магнитного полей образует электромагнитную волну (радиоволну).

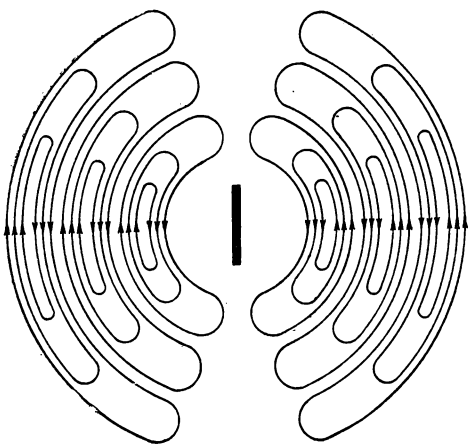


Рис. 43. Условное изображение электрического поля

Электромагнитная волна переносит в пространстве электромагнитную энергию, заключенную в электрических и магнитных полях, величина которой пропорциональна квадрату напряжений этих полей.

Если волна на поверхности воды представляет собой колебания частичек воды, а звуковая волна — колебания частичек воздуха, то электромагнитная волна представляет собой колебания самого электромагнитного поля. Поэтому она распространяется не только в воздухе, но и в безвоздушном пространстве.

Антенна тем эффективней излучает электромагнитую энергию, чем выше в ней частота тока. Поэтому в радиотехнике для создания поля излучения используются колебания с частотами $3 \cdot 10^4$—$3 \cdot 10^{10}$ Гц.

Под скоростью распространения волн следует понимать скорость распространения энергии.

Каждую секунду антенна излучает в пространство огромное количество радиоволн, равное частоте тока в антенне. Допустим, что частота тока в антенне 3 МГц, тогда за 1 с будет создано в пространстве 3 000 000 радиоволн. За одну секунду «первая» волна пройдет путь 300 000 км, а все остальные волны пройдут соответственно меньшее расстояние. На расстоянии 300 000 км уложится в данном случае 3 000 000 радиоволн. Отсюда легко оп-

ределить длину одной волны (длина волны обозначается греческой буквой λ — ламбда):

$$\lambda = \frac{300\,000}{3\,000\,000} = 0{,}1 \text{ км} = 100 \text{ м}.$$

Расстояние, на которое распространяется радиоволна за время одного колебания тока в антенне, называется *длиной волны.*

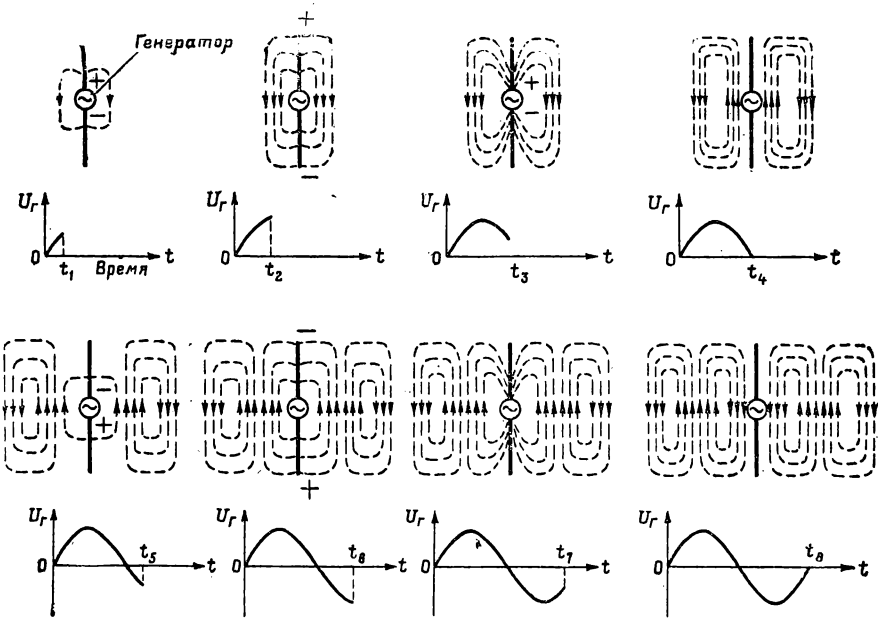


Рис. 44. Принцип образования радиоволн вокруг антенны

Так как скорость распространения радиоволн постоянная, то длина волны

$$\lambda = cT,$$

где λ — длина волны, м;
c — скорость света, равная 300 000 000 м/с;
T — период колебаний, с.

Но

$$T = \frac{1}{f},$$

а значит,

$$\lambda = \frac{c}{f},$$

где f — частота колебаний, Гц.

Чем больше частота тока в антенне, тем меньше длина излучаемых радиоволн.

Пример 6. Найти длину волны, соответствующую частотам 1200 и 600 кГц[1].
Решение.

$$\lambda_1 = \frac{300\,000}{1200} = 250 \text{ м},$$

$$\lambda_2 = \frac{300\,000}{600} = 500 \text{ м}.$$

Пример 7. Радиостанция работает на волне 240 м. Определить ее частоту.
Решение.

$$f = \frac{300\,000}{240} = 1250 \text{ кГц}.$$

ПОЛУВОЛНОВОЙ ВИБРАТОР

Свободные колебания в полуволновом вибраторе

Полуволновой вибратор (вибратор Герца или диполь) — это простейшая антенна.

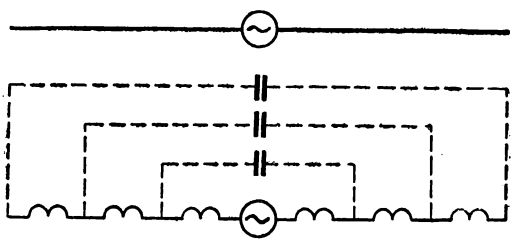


Рис. 45. Полуволновой вибратор и его эквивалентная схема

Полуволновой вибратор является резонансной системой, индуктивность и емкость которой распределены вдоль его длины (рис. 45).

Подключим вибратор к источнику постоянного тока. Оба провода зарядятся разноименными зарядами (рис. 46, *а*). Если мы отключим батарею и соединим оба провода, то противоположные заряды начнут притягиваться и в антенне образуется ток. Начнется колебательный процесс. Провода антенны будут попеременно заряжаться разноименными зарядами (подобно процессу перезарядки конденсатора в закрытом колебательном контуре).

В вибраторе образуются затухающие колебания, частота которых определяется индуктивностью и емкостью проводов.

При разряде и заряде проводов антенны не через все точки провода протекает одинаковое количество электрических зарядов. Через середину провода проходят все заряды, накопившиеся на нем. По мере удаления от середины через точки провода протека-

[1] Если частота выражается в килогерцах, то для получения длины волны в метрах скорость распространения надо брать не в метрах, а в километрах (300 000 км/с).

ет все меньшее и меньшее количество зарядов (рис. 46, *б*), т. е. по мере удаления от середины провода антенны величина тока уменьшается и на концах его становится равной нулю (рис. 46, *в*).

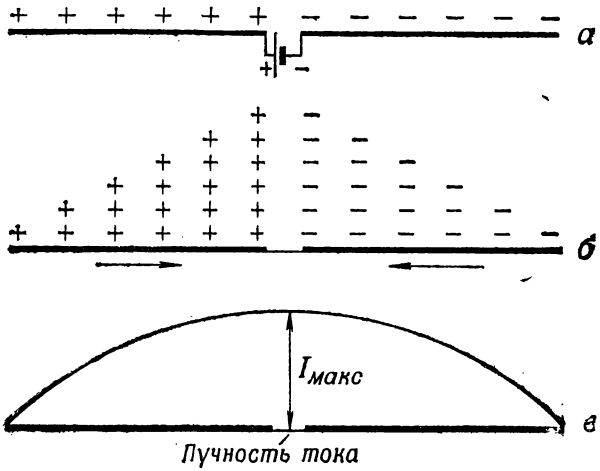


Рис. 46. Получение свободных колебаний в антенне и кривая распределения тока:

а — заряд антенны от источника постоянного тока; *б* — количество зарядов, проходящих при разряде через различные точки провода; *в* — кривая распределения тока в антенне

Из рис. 46, *в* видно, что вдоль провода укладывается одна полуволна тока, поэтому вибратор и называется полуволновым. Скорость распространения электромагнитной энергии вдоль вибра-

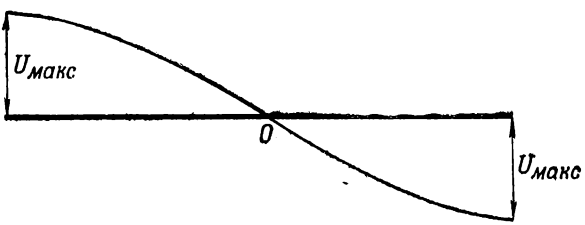


Рис. 47. Кривая распределения напряжения вдоль провода антенны

тора несколько меньше, чем в свободном пространстве. Следовательно, длина полуволнового вибратора немного короче половины волны ($\lambda/2$) в свободном пространстве. Длина волны свободных колебаний в антенне равняется удвоенной длине вибратора.

На рис. 47 показано распределение напряжения вдоль антенны. На концах провода напряжение достигает наибольшей вели-

чины, в середине провода оно равно нулю. Такое распределение напряжения объясняется тем, что напряжение между различными точками провода представляет собой сумму электродвижущих сил, действующих на отдельных участках. Более удаленной от середины точке провода соответствует большая э.д.с.

Сопротивление излучения

От генератора к вибратору подводится активная мощность $P_а$, часть которой излучается, а часть бесполезно теряется.

Подводимая к антенне мощность $P_а$ состоит из мощности излучения $P_и$ и мощности потерь $P_п$:

$$P_а = P_и + P_п.$$

Мощностью излучения называется количество энергии, излучаемой антенной за 1 с, а мощностью потерь — количество энергии, бесполезно расходуемой за 1 с.

Из электротехники известно, что активная мощность любой цепи равна

$$P = I^2R,$$

где I — действующее значение тока в цепи;
R — активное сопротивление цепи.

По аналогии с этой формулой можно написать, что

$$P_и = I^2_{пучн}R_и,$$

где $I_{пучн}$ — действующее значение тока в пучности;
$R_и$ — сопротивление излучения.

Сопротивлением излучения называется такое активное сопротивление, которое, будучи включено в пучность тока в антенне, поглощало бы мощность, равную мощности излучения. Зная сопротивление излучения, можно определить излучаемую мощность, так как $I_{пучн}$ легко измерить. Сопротивление излучения измерить невозможно, оно подсчитывается математически.

Сопротивление излучения полуволнового вибратора приблизительно колеблется от 73 до 45 Ом. Чем больше диаметр провода вибратора, тем меньше его сопротивление излучения. Если диаметр провода вибратора очень мал по сравнению с длиной волны, то сопротивление излучения максимальное.

Если полуволновый вибратор работает на частоте, которая в небольших пределах отличается от резонансной, то он ведет себя как последовательный резонансный контур. Когда поступающая частота ниже резонансной частоты вибратора, то входное сопротивление состоит из активного и емкостного сопротивлений. И наоборот, если поступающая частота выше резонансной частоты вибратора, то входное сопротивление состоит из активного и индуктивного сопротивлений.

Характеристика направленности вибратора

Полуволновый вибратор является направленной антенной (рис. 48). Антенна называется направленной, если она создает неодинаковую величину напряженности поля излучения в равноудаленных от нее точках пространства. Направленность из-

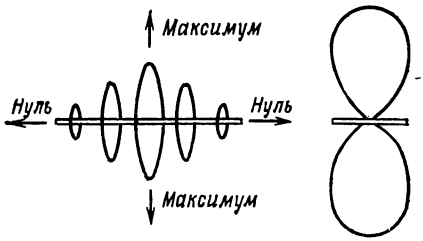


Рис. 48. Характеристика направленности полуволнового вибратора в горизонтальной плоскости

лучения антенны изображается в горизонтальной или вертикальной плоскости кривой, называемой характеристикой или диаграммой направленности антенны.

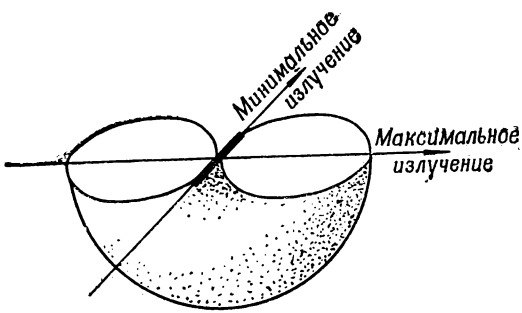


Рис. 49. Пространственная диаграмма направленности полуволнового вибратора

На рис. 49 приведена пространственная диаграмма направленности полуволнового вибратора (в разрезе).

Влияние земли на характеристику направленности антенны

Приведенные выше рассуждения относятся к антенне, расположенной в свободном пространстве. Обычно же она располагается относительно близко к земле. В этом случае поверхность земли влияет на характеристику направленности антенны. Часть излучаемой энергии падает на землю вблизи антенны и отражается. К приемной антенне поступает энергия, непосредственно из-

лученная антенной, и энергия, отраженная от земли. Эти две волны складываются векторно.

Изменения характеристики направленности зависят от проводимости почвы, длины волны, поляризации волн[1] и высоты антенны над землей.

Радиоволна, излучаемая антенной вниз при достаточно больших углах к горизонту, при отражении от поверхности земли перехватывается этой антенной. В этом случае в передающей антенне протекают два тока: один ток создается входным напряжением, другой индуктируется отраженной волной. Эти два тока суммируются векторно, создавая результирующий ток, который зависит от разности фаз складываемых токов. Так как мощность, подводимая к антенне, остается постоянной, а действующая сила тока изменяется при различных высотах антенны, то должно изменяться и сопротивление излучения $\left(R_и = \frac{P}{I^2}\right)$. Условия свободного пространства наступают (т. е. земля не влияет на сопротивление излучения), если высота антенны больше трех длин волн. Практически сопротивление излучения антенны, расположенной выше одной длины волны, изменяется в небольших пределах и приближается к сопротивлению излучения в свободном пространстве (72 Ом).

Настройка антенны в резонанс

Чтобы антенна излучала наибольшую мощность, необходимо добиться максимальной величины тока в антенне. Это достигается настройкой антенны в резонанс с частотой колебаний передатчика. При этом дальность действия радиостанции увеличивается.

Настройка антенны в резонанс сводится к тому, чтобы длину волны ее свободных колебаний сделать равной длине волны передатчика. Изменять геометрическую длину антенны практически невозможно, поэтому настройка осуществляется изменением собственной длины волны антенны, путем включения дополнительной индуктивности или емкости последовательно с антенной.

Изменения напряжения и тока вдоль четвертьволновой вертикальной антенны примерно такие же, как в одной половине полуволнового вибратора (рис. 50, *а*).

Катушка индуктивности включается в тех случаях, когда собственная длина волны антенны оказывается меньше длины волны передатчика (рис. 50, *б*). При включении катушки общая индуктивность антенны возрастает на $L_к$ ($L_к$ — величина индуктивности катушки), период колебаний увеличивается:

$$T = 2\pi\sqrt{C_а(L_а + L_к)},$$

[1] Понятие о поляризации волн дано в гл. «Распространение радиоволн».

а следовательно, увеличивается и длина волны свободных колебаний в антенне:

$$\lambda = cT.$$

Конденсатор включается в тех случаях, когда собственная длина волны антенны оказывается больше длины волны передатчика (рис. 50, *в*). При включении конденсатора общая емкость антенны уменьшается (емкость конденсатора настройки оказывается подключенной последовательно с емкостью антенны), а следовательно, период и длина волны свободных колебаний в антенне также уменьшаются.

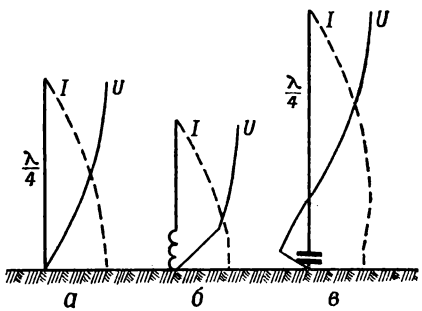


Рис. 50. Изменение электрической длины заземленной антенны с помощью индуктивной и емкостной нагрузки

Большинство современных переносных радиостанций работает в широком диапазоне частот. Чтобы обеспечить настройку антенны в заданном диапазоне, приходится включать секционированную катушку (или вариометр) и конденсатор переменной емкости. Подбором числа витков катушки осуществляется грубая настройка антенны, а изменением емкости конденсатора — точная.

Сопротивление излучения четвертьволновой вертикальной антенны у ее основания около 36 Ом.

Эффективность работы антенны оценивается коэффициентом полезного действия (КПД), он численно равен отношению мощности излучения антенны к полной мощности.

Заземление и противовес

Заземление в радиостанциях служит как бы одной из обкладок «конденсатора» антенна — земля. Кроме того, в землю отводятся электрические заряды, возникающие в антенне в результате электризации сухим снегом или пылью. Особенно сильные заряды могут появиться в антенне во время грозы. Эти заряды (если антенна изолирована от земли) опасны для жизни обслуживающего персонала и, кроме того, могут вызвать повреждение аппаратуры.

При твердом и плохо проводящем грунте, а также на передвижных радиостанциях вместо заземления используется противовес.

Противовес представляет собой несколько проводов, которые подвешиваются под антенной невысоко над землей. На противовес, изолированный от земли, замыкаются силовые линии электрического поля антенны.

Идеальный противовес должен представлять собой большую металлическую пластину, расположенную над поверхностью земли. Однако изготовить такой противовес практически невозможно, поэтому ограничиваются системой проводов.

Для передвижных станций высота подвешивания проводов противовеса над землей равна 1—2 м.

НАПРАВЛЕННЫЕ АНТЕННЫ

Главное назначение радиосвязи — передать высокочастотную энергию, несущую информацию от передающей антенны к приемной. Если связь ведется с одним корреспондентом, то энер-

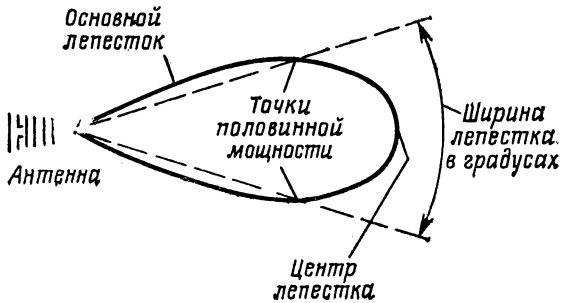


Рис. 51. Определение ширины диаграммы направленности по точкам половинной мощности

гия, излучаемая в других направлениях, расходуется бесполезно. При использовании направленной передающей антенны большая часть излученной энергии будет сосредоточена в направлении приемной антенны. В этом случае можно использовать передатчик меньшей мощности. То же самое рассуждение можно применить и к приемной антенне.

Следовательно, применение направленных антенн позволяет увеличить мощность (напряженность) поля в заданном направлении.

Элементами направленной антенны могут служить полуволновые вибраторы. Сочетание их образует направленную антенную систему или просто направленную антенну.

Вибраторы могут быть активными и пассивными. Активным называется вибратор, подключенный при помощи фидера к генератору высокой частоты (или к приемному устройству). Пассивным называется вибратор, в котором ток возникает под действием поля активного вибратора; непосредственно к передатчику пассивный вибратор не подключается.

Направленность антенны определяется шириной луча, т. е. углом излучения. Углом излучения антенны называется угол, заключенный между двумя прямыми, вдоль которых излучается половина максимальной мощности, излучаемой в центре лепестка

(рис. 51). Чем больше направленность антенны, тем меньше ширина лепестка.

Если добавить один или несколько пассивных вибраторов к активному (подключенному к нагрузке) вибратору, то при этом повысится направленность системы. Антенна с одним активным и

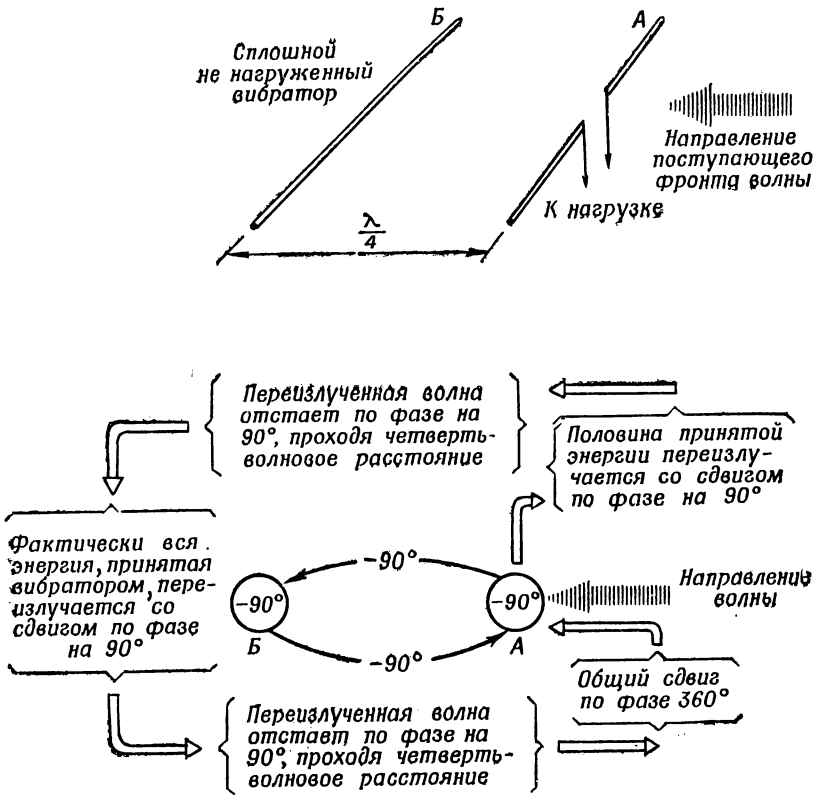


Рис. 52. Принцип работы направленной антенны

одним или более пассивными вибраторами называется направленной антенной.

Рассмотрим работу двух полуволновых вибраторов, расположенных на расстоянии четверти волны (рис. 52). Один вибратор (активный) подключен к нагрузке, другой сплошной вибратор (пассивный) является ненагруженным. Предположим, что волна поступает справа, как указано стрелкой.

Энергия волны будет перехватываться активным вибратором. При этом не вся мощность будет поглощаться нагрузкой; мощность, которая не поглощается, будет переизлучаться. Примерно переизлучаемая мощность составляет половину общей мощности, которая перехватывается антенной. Если вибратор *А* перехваты-

вает 2 мВт мощности, то 1 мВт мощности он будет переизлучать. Переизлучение происходит со сдвигом фазы на четверть периода (90°) в сторону отставания.

Часть переизлученной волны перехватывается ненагруженным вибратором *Б* со сдвигом по фазе еще на 90° в сторону отставания, так как расстояние между вибраторами равно четверти длины волны. Будучи ненагруженным, этот вибратор переизлучает с отставанием на четверть периода практически всю мощность, ко-

Рис. 53. Направленная антенна:
а — трехвибраторная антенна; *б* — диаграмма направленности антенны в горизонтальной плоскости

торая принята им. Часть этой мощности будет возвращаться обратно с противоположной стороны и перехватываться нагруженным вибратором *А*. При этом снова произойдет отставание по фазе на 90°.

Если расстояние между вибраторами и их длина подобраны правильно, то волна, которая возвращается вибратором *Б*, будет прибывать обратно к вибратору *А* в фазе с принимаемым сигналом. Таким образом, при наличии пассивного вибратора, удаленного на расстояние четверти волны, сигнал на нагруженном вибраторе становится больше.

В этом случае ненагруженный вибратор работает подобно отражателю и называется *рефлектором*.

Наибольший результат получается при размещении рефлектора на расстоянии 0,15 длины волны позади активного вибратора при условии, если рефлектор несколько длиннее полволны (обычно на 5%). При этом сдвиг фазы получается меньше 90° при прохождении волной расстояния 0,15 длины волны. Это уменьшение компенсируется за счет увеличения сдвига фазы при переизлучении от более длинного, чем полволны, рефлектора.

Если ненагруженный вибратор *Б* поместить впереди питаемого резонансного вибратора *А* на расстоянии 0,1 длины волны и если ненагруженный вибратор короче вибратора *А* на $\approx 5\%$, он будет работать как линза, концентрируя энергию вперед. В этом случае пассивный вибратор называется *директором*. Часто рефлектор и директор используются вместе, образуя простую и компактную направленную антенную систему.

На рис. 53, *а* изображена антенная система, состоящая из активного вибратора, рефлектора и директора, а на рис. 53, *б* приведена ее диаграмма направленности в горизонтальной плоскости. В направленных антенных системах имеется некоторое излучение и в обратном направлении. Величина этого излучения небольшая по сравнению с излучением в основном направлении.

Сопротивление излучения активного вибратора при наличии пассивных вибраторов всегда меньше, чем без них, так как ток в нагруженном вибраторе увеличивается пассивными элементами.

Магнитные антенны

В приемниках применяются магнитные антенны, имеющие направленные характеристики приема. Они имеют небольшие размеры, что дает возможность располагать их внутри корпуса приемника.

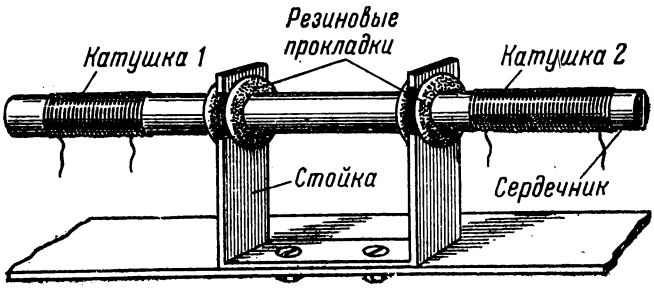


Рис. 54. Магнитная антенна

Магнитная антенна представляет собой стержневой сердечник из материала с большой магнитной проницаемостью (феррит), на который намотана катушка (или несколько катушек на разные участки диапазона принимаемых волн). Сердечник, находясь в электромагнитном поле, концентрирует в себе магнитную составляющую этого поля, в результате чего катушка магнитной антенны пронизывается потоком большой плотности. Чем выше магнитная проницаемость сердечника, тем большая электродвижущая сила будет наводиться в антенне.

Общий вид магнитной антенны для длинных и средних волн показан на рис. 54.

Так как на магнитную антенну в основном воздействует магнитная составляющая электромагнитного поля, то индустриальные помехи воспринимаются слабо, поскольку они имеют явно выраженную электрическую составляющую.

Если мощная ближняя станция мешает приему дальней станции, то, ориентируя антенну нулевым направлением приема в сторону помехи, можно ослабить ее действие.

АНТЕННЫ ВОЙСКОВЫХ РАДИОСТАНЦИЙ

Антенны войсковых радиостанций должны быть удобны в переноске и эксплуатации, обеспечивать надежную радиосвязь и иметь возможность маскировки от наземного и воздушного наблюдения.

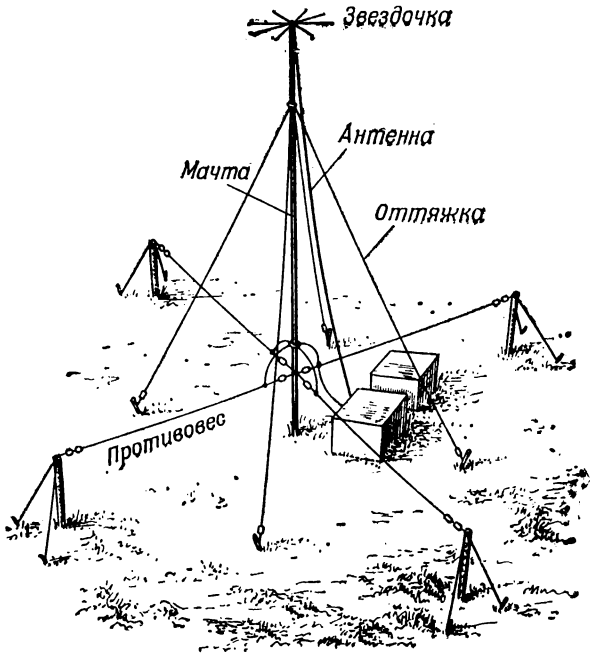


Рис. 55. Вертикальная антенна с противовесом (антенна со «звездочкой» подвешена на мачте)

Наиболее простым типом войсковой антенны является *штыревая антенна,* получившая широкое практическое применение. Штыревые антенны встречаются различной высоты (от 1,5 до 20 м) и обычно состоят из отдельных колен.

Для небольших штыревых антенн никакой отдельной опоры или оттяжек не требуется.

Чтобы увеличить дальность действия радиостанции, штыревые антенны снабжают металлическими «звездочками», которые навинчиваются на верхнее колено штыря (дальность увеличивается в полтора-два раза). При этом увеличивается ток, проходящий по антенне, так как емкость между концами антенны и землей возрастает.

Для удобства укладки «звездочки» делаются складными. При развертывании антенны необходимо лучи «звездочки» распреде-

лять равномерно во все стороны. Штырь может иметь телескопическую конструкцию.

Вертикальная антенна может быть сделана из гибкого провода, тогда для ее подвески требуется жесткая опора, называемая мачтой.

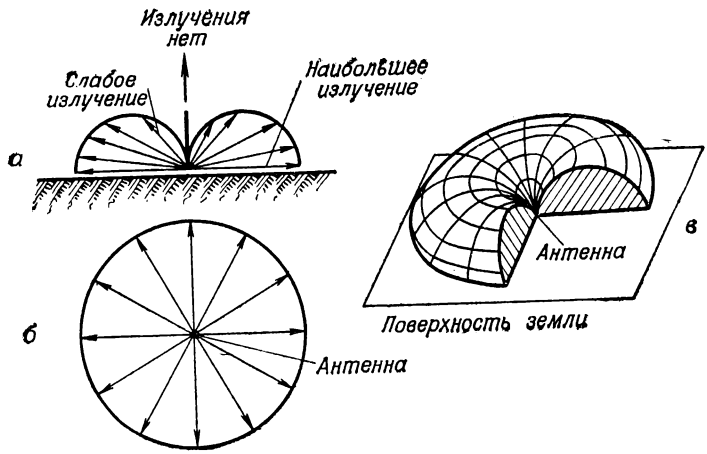


Рис. 56. Диаграмма направленности штыревой антенны:
а — в вертикальной плоскости; *б* — в горизонтальной плоскости; *в* — объемное изображение диаграммы направленности

Вертикальные антенны большой высоты обычно применяются с противовесом. На рис. 55 изображена вертикальная антенна с металлической «звездочкой» на конце. Противовес здесь состоит из четырех лучей. Провода противовеса с проводом антенны образуют конденсатор. Емкость этого конденсатора увеличивается при увеличении числа лучей и их длины.

Штыревые антенны излучают энергию радиоволны в разных направлениях неравномерно. На рис. 56 изображена диаграмма направленности излучения вертикального штыря в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Радиоволны наибольшей мощности излучаются штыревыми антеннами вдоль земной поверхности. С увеличением угла к горизонту излучаемая мощность уменьшается. В вертикальном направлении радиоволны не излучаются, поэтому, например, для связи с самолетами эти антенны малопригодны.

На ультракоротких волнах применяется штыревая антенна с противовесом. На рис. 57, *а* изображена такая антенна, а на рис. 57, *б* — диаграмма ее излучения в горизонтальной плоскости. Провода противовеса в виде веера устанавливаются в сторону корреспондента, так как в эту сторону должно происходить максимальное излучение энергии радиоволны. Объясняется это тем, что электрическое поле получается наибольшим со стороны противовеса.

Помимо штыревой антенны в переносных радиостанциях применяется антенна, называемая *горизонтальным вибратором*. Эта антенна состоит из двух горизонтальных проводов, подвешиваемых на мачтах над поверхностью земли (рис. 58).

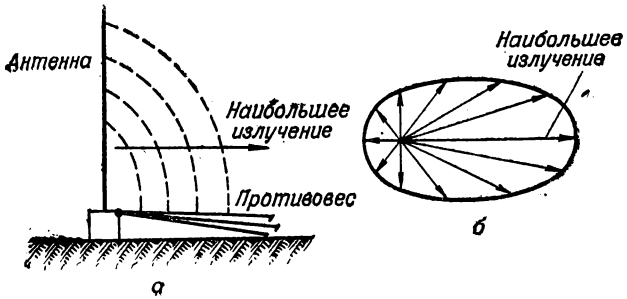


Рис. 57. Штыревая антенна с противовесом и ее диаграмма направленности в горизонтальной плоскости

При работе на горизонтальный вибратор дальность действия связи по сравнению с дальностью при работе на штыревую ан-

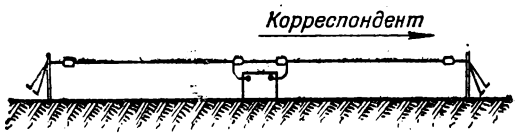


Рис. 58. Низко расположенный горизонтальный вибратор

тенну увеличивается. Для хорошей работы горизонтального вибратора необходима надежная изоляция лучей антенны от земли

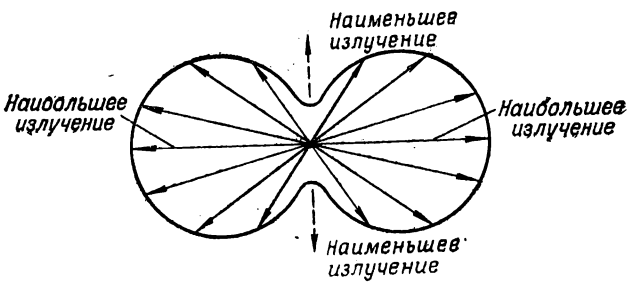


Рис. 59. Диаграмма направленности низко расположенного горизонтального вибратора в горизонтальной плоскости

и корпуса радиостанции. Поэтому не рекомендуется устанавливать радиостанцию непосредственно на землю, а лучи антенны разбрасывать по поверхности земли.

На рис. 59 приведена диаграмма направленности вибратора в горизонтальной плоскости. Наиболее интенсивно радиоволна излучается вверх и в направлении лучей антенны.

Для повышения дальности действия один из лучей антенны горизонтального вибратора подвязывается к дереву или мачте на высоте 8—10 м от земли, а другой устанавливается в направлении на корреспондента и включается в гнездо «противовес» передатчика. Такая антенна называется антенной типа *наклонный луч*.

Глава 6

РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН

Знание условий распространения радиоволн необходимо для правильной организации радиосвязи, телевизионных передач, радионавигационной службы и т. д.

ПРИРОДА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН

Понятие об электрическом поле

Всякий электрический заряд, помещенный в ту или другую среду, изменяет ее свойства. Если в эту измененную среду поместить теперь другой электрический заряд, то он будет испытывать на себе действие некоторой механической силы (будет притягиваться или отталкиваться).

Электрическое поле, как и магнитное, является носителем особого вида материи. Если рука человека нечаянно попадает в электрическое поле высокой частоты, то оно может вызвать ожог. Это говорит о том, что электрическое поле не менее материально, чем кипяток или пламя.

Электрическими силами, или силами поля, называются силы, действующие на электрические заряды.

Электрическое поле характеризуется величиной силы, с которой оно действует на единичный заряд, помещенный в данной точке. Эта сила называется *напряженностью электрического поля* и обозначается буквой E. Чем больше E, тем сильнее действие поля на электрический заряд, находящийся в этом поле. Напряженность электрического поля можно сравнить с силой, которая действует в поле земного тяготения на единицу массы (например, на 1 г). Сила притяжения к земле уменьшается по мере удаления любого предмета от поверхности земли (уменьшается вес предмета). Напряженность электрического поля также уменьшается по мере удаления от заряженного тела.

Электрическое поле принято изображать *силовыми линиями*. Под силовой линией следует понимать линию, совпадающую с направлением силы поля. Поэтому условно электрическое поле рассматривается как совокупность силовых линий. Силовые линии электрического поля, так же как и силовые линии магнитного

поля, не материальны; они введены условно для облегчения изучения свойств электрического поля. Меридианы и параллели на земле не существуют, они условно введены на картах для указания местоположения. Точно так же не существует в действительности и силовых линий, они нам нужны для изображения сил, действующих в электрическом поле.

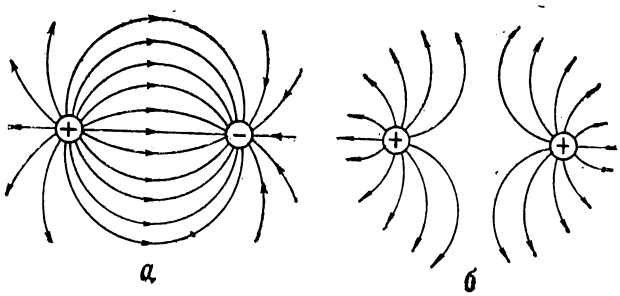


Рис. 60. Электрическое поле:
а — двух разноименных зарядов; *б* — двух одноименных зарядов

Принято считать, что силовые линии электрического поля имеют начало и конец. Начало свое они берут с положительного заряда и заканчиваются на отрицательном. Силовые линии всегда выходят или входят перпендикулярно поверхности заряженного

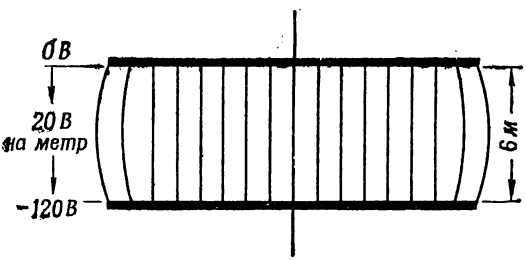


Рис. 61. Электрическое поле конденсатора

тела в данной точке. На рис. 60 показано условное изображение электрических полей разноименных и одноименных зарядов.

Определим напряженность электрического поля на простом примере. Предположим, что конденсатор, имеющий расстояние между пластинами 6 м, заряжен до потенциала — 120 В (рис. 61). Если потенциал на одной пластине равен нулю по сравнению с —120 В на другой пластине, то в этом случае имеется изменение 120 В на расстоянии 6 м. На каждый метр расстояния между обкладками приходится 20 В. Разность потенциалов существует между любыми двумя точками на данной электрической силовой линии. Напряженность электрического поля в свободном пространстве определяется как разность потенциалов на один метр.

Электрические силовые линии являются векторами, т. е. имеют направление и величину. Направление вектора совпадает с направлением силы, приложенной к единичному положительному заряду, помещенному в это поле.

Если рассматриваемый нами источник напряжения 120 В является переменным, то в проводах, соединяющих источник с конденсатором, появится электрический ток. Ток будет заряжать и разряжать конденсатор, вызывая изменение полярности в течение каждого периода. В диэлектрике конденсатора будет происходить смещение электронных орбит атомов в сторону положительно заряженной пластины. Всякое же упорядоченное движение электронов представляет собой электрический ток. Следовательно, в диэлектрике конденсатора протекает электрический ток, который называется *током смещения.*

Изменяющееся электрическое поле приводит к изменению тока смещения. Ток смещения, как и обычный ток в цепи конденсатора, опережает по фазе на 90° приложенное напряжение электрического поля.

Понятие о магнитном поле

Если к стрелке компаса поднести постоянный магнит, то северный конец стрелки начнет отталкиваться от северного полюса магнита, а южный конец — притягиваться к нему.

Одноименные полюсы магнита взаимно отталкиваются, а разноименные взаимно притягиваются.

Величина этой силы зависит от силы полюсов, расстояния между ними и характера среды, в которой находятся магниты.

Между электрическими и магнитными полями имеется определенное сходство. Подобно тому как электрическое поле приводит в движение электрические заряды, так и магнитное поле заставляет перемещаться тела, которые обладают магнитными свойствами.

Магнитные силы имеют в каждой точке определенное направление. Линии, вдоль которых действуют силы в магнитном поле, называются магнитными силовыми линиями. Они не материальны и введены условно для облегчения изучения свойств магнитного поля.

Чтобы охарактеризовать магнитное поле, введено понятие о его напряженности. *Напряженностью магнитного поля* называется сила, с которой магнитное поле действует на единицу северной магнитной массы (единичный полюс), помещенной в данную точку поля.

Электрическое и магнитное поля всегда взаимно перпендикулярны. Между электрическим и магнитным полями существует неразрывная связь. Электрическое поле вызывает движение электронов, т. е. электрический ток, который в свою очередь вызывает появление магнитного поля вокруг проводника или вокруг того места, где он проходит. Следовательно, электрическое поле созда-

ет магнитное поле, и, наоборот, магнитное поле (если оно переменное) создает электрическое поле и вызывает появление электрического тока.

Понятие об электромагнитных волнах

Доказано, что электрический заряд, имеющий ускорение, всегда будет излучать энергию в виде электромагнитной волны. В антенне электрические заряды (электроны), совершая переменное движение, излучают электромагнитную энергию.

Предположим, что радиоволны излучаются от точечного источника (источник настолько мал, что превращается в чисто математическое понятие), в этом случае они будут распространяться в виде сферы подобно надуваемому воздушному шару, в центре которого находится источник излучения (рис. 62). Излучение энергии в определенном направлении будем называть лучом. Лучи всегда перпендикулярны к поверхности воображаемого шара и расходятся по мере того, как шар увеличивается в размере. При большом расстоянии от источника излучения поверхность каждого, следующего один за другим «воздушного шара» почти параллельна поверхностям своих соседей. Поэтому с достаточной степенью точности радиоволны обычно рассматриваются параллельными одна другой. Вблизи антенны такое предположение недопустимо. Поверхность воображаемого шара называется *фронтом волны*. Относительно любой точки (через которую проходит волна) фронт волны считается плоской поверхностью.

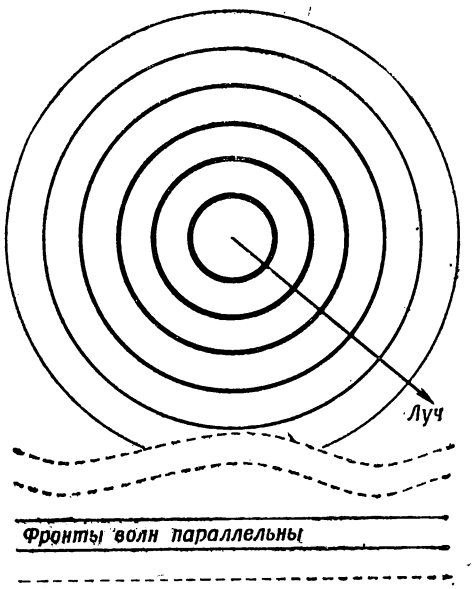


Рис. 62. Сферическое распространение от точечного источника

Рассмотрим луч радиоволны. Он состоит из электрического и магнитного полей. Поля перпендикулярны как между собой, так и по отношению направления распространения, т. е. лучу. Поля изменяются синусоидально с частотой источника.

Простейший тип электромагнитной волны показан на рис. 63. Такая волна называется поляризованной волной, т. е. магнитная и электрическая составляющие не изменяются по направлению. Поляризация радиоволны определяется по тому, как ориентирован вектор электрического поля по отношению к земле. Вертикально

поляризованная волна (как показано на рис. 63) имеет вертикальное электрическое поле (E) и горизонтальное магнитное поле (H). И наоборот, горизонтально поляризованная волна имеет горизонтальное электрическое поле и вертикальное магнитное поле. Внизу рис. 63 дана электромагнитная волна в векторном изображе-

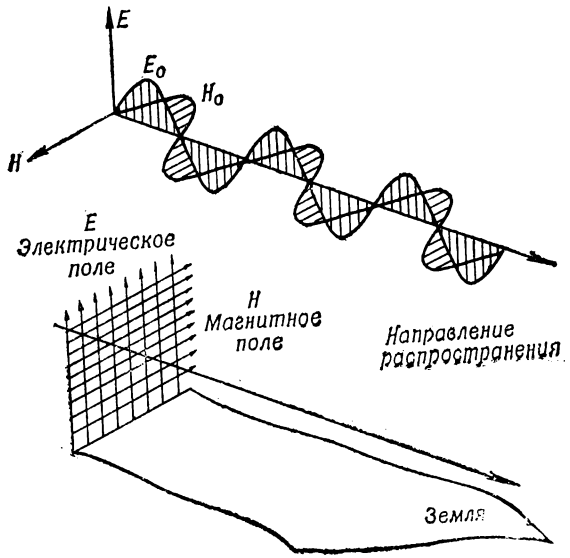


Рис. 63. Составляющие E и H электромагнитной волны

нии при вертикальной поляризации. Обычно для связи используются радиоволны как с вертикальной, так и с горизонтальной поляризацией.

КАК РАСПРОСТРАНЯЮТСЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ

Радиоволны — это только один из видов электромагнитных волн, встречающихся в природе. Инфракрасные (тепловые) лучи, свет, ультрафиолетовые лучи, рентгеновы лучи, гамма-лучи — это электромагнитные волны различной длины и проявляют они себя по-разному. Радиоволны оказывают электрическое и магнитное действие, инфракрасные лучи нагревают тела, лучи света освещают их и т. д.

Длина волны света измеряется миллионными долями миллиметра, а длина радиоволн может быть от долей сантиметра до тысяч метров.

Радиоволны излучаются проводами, когда по ним протекают переменные токи высокой частоты, световые же волны излучаются атомами вещества при изменении состояния электронов.

При распространении света наблюдаются следующие явления:

— отражение от границы двух веществ, которые имеют различные оптические свойства;

— преломление при переходе через границу между двумя различными прозрачными веществами;

— дифракция, т. е. явление частичного огибания препятствий, которые встречаются на пути распространения света;

— интерференция, т. е. наложение световых лучей, при котором может быть ослаблена или усилена сила света.

Все эти явления наблюдаются и при распространении радиоволн.

В однородной среде радиоволны, как и свет, распространяются прямолинейно со скоростью, зависящей от свойств окружающей среды. С постоянной скоростью $3 \cdot 10^8$ м/с радиоволны распространяются только в пустоте, так как она является идеальным диэлектриком.

Для практических целей разница в скоростях распространения радиоволн в различных средах не имеет никакого значения. Время прохождения сигнала от передающей станции до приемной во многих случаях составляет весьма небольшие доли секунды. Прохождение радиоволн в слоях с различными электрическими свойствами (с разными скоростями распространения) приводит к преломлению волн, т. е. к изменению направления их движения.

Понятия о поверхностных и пространственных волнах

Радиоволны, излучаемые антенной, распространяются вдоль земной поверхности и под углом к горизонту. Первые волны называются *поверхностными,* вторые — *пространственными.* Таким образом, электромагнитные волны могут распространяться между передатчиком и приемником двумя путями.

Поверхностная волна электромагнитных колебаний распространяется от передатчика к приемнику вдоль земли. Характер распространения этой волны определяется электрическими свойствами почвы и воды, а также частотой излучаемых колебаний.

На сравнительно коротких расстояниях радиосвязь осуществляется главным образом поверхностными радиоволнами.

Пространственная волна распространяется от антенны в атмосферу земли. В ионизированных[1] слоях атмосферы она меняет свое направление. Так как ионизация земной атмосферы довольно резко меняется в течение суток, то пространственная волна распространяется различно. Временами она может не возвращаться к приемной антенне, что приведет к нарушению связи.

Иногда радиосвязь одновременно осуществляется поверхностной и пространственной волнами. К сожалению, комбинация этих волн часто вызывает замирания принимаемого сигнала, нарушающие устойчивость радиосвязи.

---

[1] Понятие о ионизации атмосферы дано ниже.

Отражение волны

При падении радиоволн на гладкую поверхность вещества, обладающего электропроводимостью, происходит отражение, при котором угол падения равен углу отражения. Это соответст-

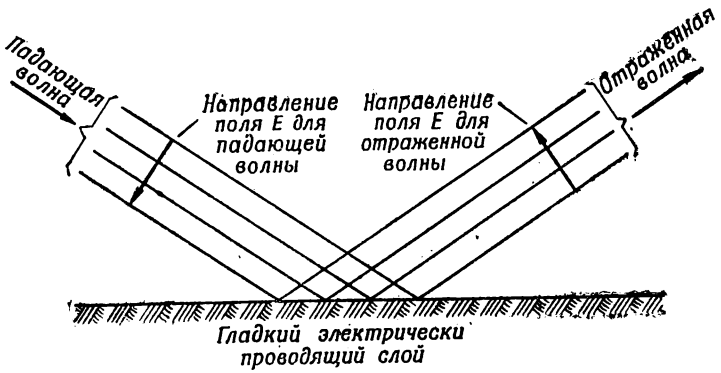


Рис. 64. Зеркальное отражение радиоволн

вует зеркальному отражению света (рис. 64). Обратите внимание на изменение фазы электрического поля E.

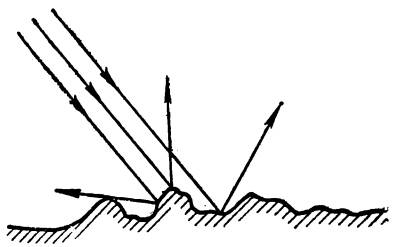


Рис. 65. Рассеянное отражение радиоволн

При наличии на отражающей поверхности неровностей, размеры которых соизмеримы с длиной волны, наблюдается рассеянное отражение (рис. 65), соответствующее рассеянию света при отражении от шероховатой поверхности.

При определенных условиях поверхность земли и ионизированные слои атмосферы хорошо отражают радиоволны.

Преломление волны

При наличии среды, плохо проводящей ток, происходит изменение направления распространения волн, т. е. происходит преломление (рис. 66). Чем короче волна, тем меньше она преломляется. Преломление тем больше, чем сильнее различаются диэлектрические проницаемости граничащих сред.

В неоднородных средах, диэлектрические проницаемости которых от слоя к слою изменяются плавно, радиоволны распространяются по криволинейным траекториям (рис. 67). Кривизна траектории определяется степенью неоднородности среды: чем

резче от точки к точке меняются свойства среды, тем больше кривизна траектории. Явление плавного преломления любых лучей, в том числе и радиоволн, получило название *рефракции*.

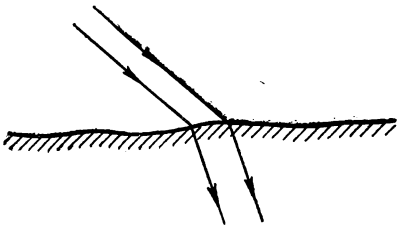


Рис. 66. Преломление радиоволн

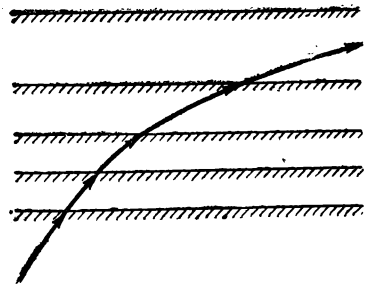


Рис. 67. Постепенное преломление (рефракция)

Отражение и преломление волны

Степень ионизации верхних слоев атмосферы различна. Скорость же распространения электромагнитных волн зависит от среды. Чем больше степень ионизации, тем больше скорость рас-

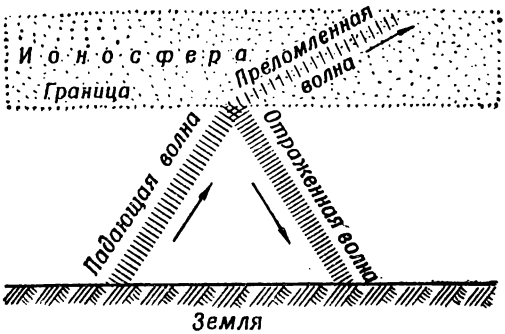


Рис. 68. Преломление и отражение электромагнитной волны от границы ионизированного слоя

пространения радиоволны. Резкой границы между различно ионизированными слоями атмосферы нет, следовательно, будет происходить постепенное изменение скорости распространения радиоволны. Для наглядности предположим, что между серединами различно ионизированных областей существует резкое разделение. Назовем это разделение границей (рис. 68).

Если волна падает перпендикулярно к границе раздела, то она продолжает распространяться в том же направлении, незначи-

тельно изменив скорость движения. Если же волна встречает границу раздела под углом, то в этом случае часть волны отражается, а остальная волна, пройдя границу раздела, изменит направление своего распространения, т. е. преломится.

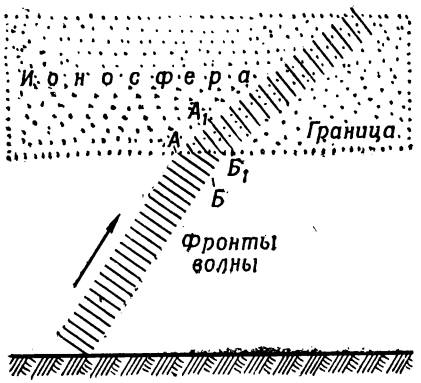


Рис. 69. Преломление вследствие изменения скорости распространения

Рассмотрим фронт волны $A — Б$ (рис. 69). Так как скорость распространения волны больше в ионизированной среде, точка A фронта падающей волны пройдет расстояние $A — A_1$, в то время как точка $Б$ пройдет меньшее расстояние $Б — Б_1$. В результате фронт волны изменит направление своего распространения.

Величина преломления зависит от отношения скоростей в двух средах. Это отношение называется коэффициентом преломления. Он дает возможность подсчитать степень преломления, т. е. изгибания электромагнитной волны.

Дифракция волны

Когда световая волна падает на края непрозрачного предмета, в этом случае можно наблюдать, что предмет не будет бросать резко очерченную тень. Тень будет как бы размываться,

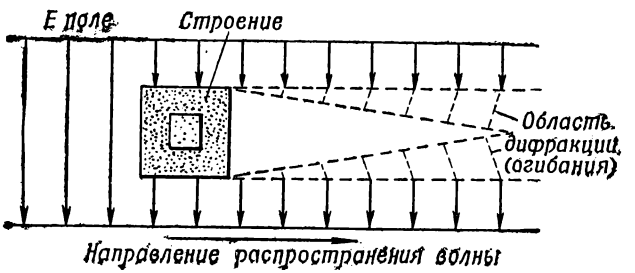


Рис. 70. Дифракция волны

потому что световая волна огибает края предмета, уменьшая площадь общей тени, — это свойство огибать препятствия называется *дифракцией*. Дифракция световых волн очень небольшая.

Таким же образом и электромагнитные волны огибают препятствия, но в значительно большей степени (рис. 70).

ВЛИЯНИЕ АТМОСФЕРЫ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН

Характер распространения радиоволн зависит от длины волны, кривизны Земли, почвы, состава атмосферы, времени суток и года, состояния ионосферы, магнитного поля Земли, метеорологических условий.

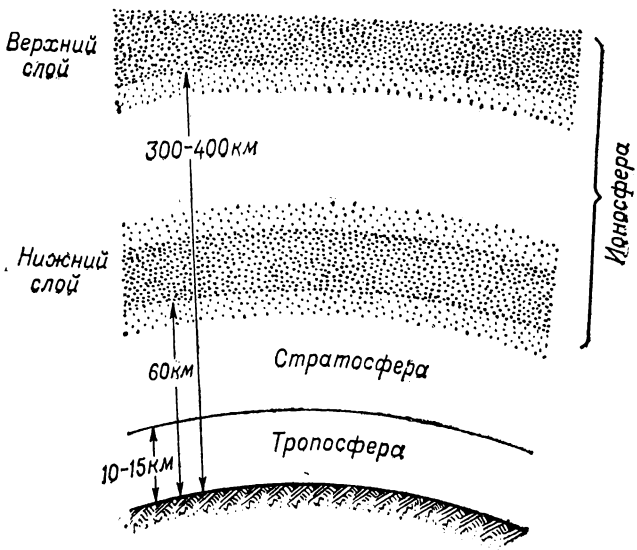


Рис. 71. Строение атмосферы

Рассмотрим строение атмосферы, оказывающей существенное влияние на распространение радиоволн. В зависимости от времени суток и года изменяются содержание влаги и плотность воздуха.

Воздух, окружающий земную поверхность, образует атмосферу, высота которой составляет приблизительно 1000—2000 км. Состав земной атмосферы неоднороден.

Слои атмосферы высотой примерно до 100—130 км по своему составу однородны. В этих слоях имеется воздух, содержащий (по объему) 78% азота и 21% кислорода. Нижний слой атмосферы толщиной 10—15 км (рис. 71) называется тропосферой. В этом слое имеются водяные пары, содержание которых резко колеблется с изменением метеорологических условий.

Тропосфера постепенно переходит в стратосферу. Границей считается высота, на которой прекращается падение температуры.

На высотах примерно от 60 км и выше над Землей под влиянием солнечных и космических лучей в атмосфере происходит ионизация воздуха: часть атомов распадается на свободные электроны и ионы. В верхних слоях атмосферы ионизация незначи-

тельна, так как газ очень разрежен (имеется небольшое число молекул в единице объема). По мере того как солнечные лучи проникают в более плотные слои атмосферы, степень ионизации увеличивается. С приближением к Земле энергия солнечных лучей падает и степень ионизации опять уменьшается. Кроме того, в

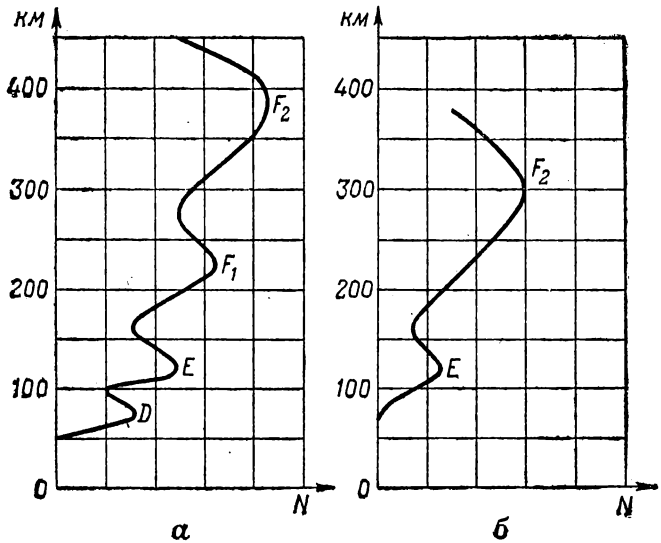


Рис. 72. Распределение ионизации:
а — в дневные часы; *б* — в ночные часы

нижних слоях атмосферы вследствие большой плотности отрицательные заряды долго существовать не могут; происходит процесс восстановления нейтральных молекул.

Ионизация в разреженной атмосфере на высотах 60—80 км от Земли и выше сохраняется в течение длительного времени. На этих высотах атмосфера очень разрежена, плотность свободных электронов и ионов настолько низкая, что столкновение, а отсюда и восстановление нейтральных атомов происходит относительно редко.

Верхний слой атмосферы называется ионосферой. Ионизированный воздух оказывает существенное влияние на распространение радиоволн.

Днем образуется четыре регулярных слоя или максимума ионизации — слои D, E, F_1 и F_2. Наибольшую ионизацию (наибольшее число свободных электронов в единице объема) имеет слой F_2. Примерная картина распределения ионизации в дневные часы приведена на рис. 72, *а*, а в ночные часы — на рис. 72, *б*.

После захода Солнца ионизирующее излучение резко падает. Происходит восстановление нейтральных молекул и атомов, что приводит к уменьшению степени ионизации. Ночью полностью ис-

чезают слои D и F_1, ионизация слоя E значительно уменьшается, а слой F_2 сохраняет ионизацию с некоторым ослаблением.

Высота слоев ионосферы все время меняется в зависимости от интенсивности солнечных лучей. Днем высота ионизированных слоев меньше, ночью больше. Летом в наших широтах электронная концентрация ионизированных слоев больше, чем зимой (за исключением слоя F_2). Степень ионизации зависит также и от уровня солнечной активности, определяемой количеством пятен на Солнце. Период солнечной активности равен примерно 11 годам.

В полярных широтах наблюдаются нерегулярные процессы ионизации, связанные с так называемыми ионосферными возмущениями.

В зависимости от длины волны характер распространения радиоволн меняется. Поэтому все радиоволны условно делят на диапазоны. Внутри каждого диапазона радиоволны распространяются примерно одинаково.

В радиотехнике применяются радиоволны длиной от 30 км до 1 см. Волны длиннее 30 км не используются вследствие малой эффективности передающих антенн в этом диапазоне.

Деление радиоволн на диапазоны дано в табл. 2.

Таблица 2

Длины волн	Частота	Наименование диапазона
Свыше 10 000 м	Ниже 30 кГц	Сверхдлинные волны
10 000—1000 м	30—300 кГц	Длинные волны
1000—100 м	300—3000 кГц	Средние волны
100—10 м	3—30 МГц	Короткие волны
10 м — 1 мм	30—300 000 МГц	Ультракороткие волны:
10—1 м	30—300 МГц	метровые
100—10 см	300—3000 МГц	дециметровые
10—1 см	3 000—30 000 МГц	сантиметровые
10—1 мм	30 000—300 000 МГц	миллиметровые

Границы диапазонов радиоволн условные, так как резкой разницы в характере распространения граничных частот нет. Один диапазон волн плавно переходит в другой.

Имеется несколько путей, по которым радиоволна приходит к приемной антенне. Как уже отмечалось, радиоволны, распространяющиеся над поверхностью земли и огибающие ее вследствие явления дифракции, называются *поверхностными* или *земными волнами* (направление *1*, рис. 73). Волны, распространяющиеся по направлениям *2* и *3*, называются *пространственными*. Они делятся на ионосферные и тропосферные. Последние наблюдаются только в диапазоне УКВ. *Ионосферными* называются волны, отраженные или рассеянные ионосферой, *тропосферными* — волны, отраженные или рассеянные неоднородными слоями или «зернами» тропосферы.

Поверхностная волна основанием своего фронта касается земли, как показано на рис. 74. Эта волна при точечном источнике всегда имеет вертикальную поляризацию, так как горизонтальная составляющая волны поглощается землей. При достаточном удалении от источника, выраженном в длинах волн, любой отрезок фронта волны является плоской волной.

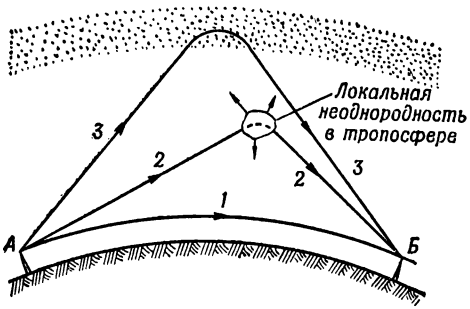


Рис. 73. Пути распространения радиоволн

Поверхность земли поглощает часть энергии распространяющихся вдоль нее поверхностных волн, поскольку земля имеет активное сопротивление. Чем короче волна, т. е. чем больше часто-

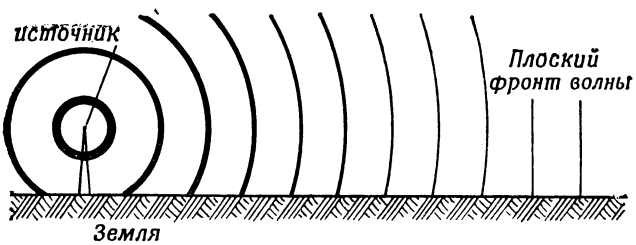


Рис. 74. Распространение поверхностных волн

та, тем больший ток индуктируется в земле и тем больше потери. Потери в земле уменьшаются с увеличением проводимости почвы, так как волны проникают в землю тем меньше, чем выше проводимость почвы. В земле происходят и диэлектрические потери, которые также увеличиваются с укорочением волны.

Для частот выше 1 МГц поверхностная волна фактически сильно затухает из-за поглощения землей и поэтому не используется, за исключением местной зоны действия. У телевизионных частот затухание настолько большое, что поверхностная волна может использоваться на расстояниях не больше 1—2 км от передатчика.

Связь на большие расстояния осуществляется главным образом пространственными волнами.

Чтобы получить преломление, т. е. возвращение волны на землю, волна должна излучаться под определенным углом по отношению к земной поверхности. Наибольший угол излучения, при котором радиоволна данной частоты возвращается на землю, называется критическим углом для данного ионизированного слоя (рис. 75).

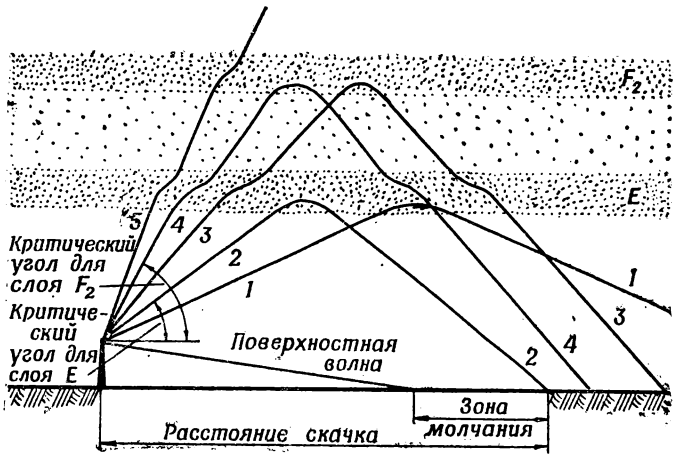


Рис. 75. Влияние угла излучения на прохождение пространственной волны

Каждый ионизированный слой имеет свою критическую частоту и критический угол.

На рис. 75 показан луч *1*, который легко преломляется слоем *E*, так как луч входит под углом ниже критического угла этого слоя. Луч *3* проходит область *E*, но возвращается на землю слоем F_2, потому что он входит под углом ниже критического угла слоя F_2. Луч *4* также проходит слой *E*. Он входит в слой F_2 при его критическом угле и возвращается на землю. Луч *5* проходит обе области и теряется в пространстве.

Все лучи, изображенные на рис. 75, относятся к одной частоте. Если используется более низкая частота, требуются большие критические углы для обеих областей; наоборот, если частота увеличивается, обе области имеют меньшие критические углы. Если продолжать увеличивать частоту, то наступит момент, когда волна, распространяющаяся от передатчика параллельно земле, будет превышать критический угол для любой области. Такое состояние получается на частоте около 30 МГц. Выше этой частоты связь пространственной волной становится ненадежной.

Итак, каждой критической частоте, соответствует свой критический угол, и, наоборот, каждому критическому углу соответствует своя критическая частота. Следовательно, любая пространственная волна, частота которой равна или ниже критической, бу-

дет на определенном удалении от передатчика возвращаться на землю.

На рис. 75 луч *2* падает на слой *E* при критическом угле. Обратите внимание, где отраженная волна падает на землю (при превышении критического угла сигнал теряется); пространственная волна, дойдя до ионизированного слоя, отражается от него и возвращается на землю на большом расстоянии от передатчика. На некотором расстоянии от передатчика, зависящем от мощности передатчика и длины волны, возможен прием поверхностной волны. От того места, где кончается прием поверхностной волны, начинается зона молчания и кончается она там, где появляется отраженная пространственная волна. Резкой границы зоны молчания не имеют.

По мере возрастания частоты величина мертвой зоны увеличивается вследствие уменьшения критического угла. Для связи с корреспондентом на определенном расстоянии от передатчика в определенные время суток и времена года существует максимальная допустимая частота, которая может быть использована для связи пространственной волной. Каждая ионосферная область имеет свою максимальную допустимую частоту для связи.

Короткие и тем более ультракороткие волны в ионосфере теряют незначительную часть своей энергии. Чем выше частота, тем меньший путь проходят электроны при своих колебаниях, вследствие чего уменьшается число их столкновений с молекулами, т. е. уменьшаются потери энергии волны.

В более низких ионизированных слоях потери больше, так как повышенное давление свидетельствует о большей плотности газа, а при большей плотности газа вероятность столкновения частиц возрастает.

Длинные волны отражаются от нижних слоев ионосферы, имеющих наименьшую концентрацию электронов, при любых углах возвышения, в том числе и близких к 90°. Почва средней влажности является почти проводником для длинных волн, поэтому они хорошо отражаются от земли. Многократным отражением от ионосферы и земли объясняется дальнее распространение длинных волн.

Распространение длинных волн не зависит от времени года и метеорологических условий, от периода солнечной активности и от ионосферных возмущений. При отражении от ионосферы длинные волны претерпевают большое поглощение. Вот почему для связи на большие расстояния необходимо иметь передатчики большой мощности.

Средние волны заметно поглощаются в ионосфере и почве плохой и средней проводимости. Днем наблюдается только поверхностная волна, так как пространственная волна (длиннее 300 м) практически полностью поглощается в ионосфере. Для полного внутреннего отражения средние волны должны пройти некоторый путь в нижних слоях ионосферы, имеющих хотя и невысокую концентрацию электронов, но зато значительную плотность воздуха.

Ночью с исчезновением слоя D поглощение в ионосфере уменьшается, вследствие чего на пространственных волнах можно поддерживать связь на расстояниях 1500—2000 км при мощности передатчика около 1 кВт. Условия связи зимой несколько лучше, чем летом.

Достоинством средних волн является то, что они не подвержены влиянию ионосферных возмущений.

Согласно международному соглашению на волнах длиной около 600 м передаются сигналы бедствия (сигналы SOS).

Положительной стороной связи пространственной волной на коротких и средних волнах является возможность осуществления дальней связи при небольшой мощности передатчика. Но связь пространственными волнами имеет и существенные недостатки.

Во-первых, неустойчивость связи вследствие изменения высоты ионизированных слоев атмосферы в течение суток и года. Для поддержания связи с одним и тем же пунктом за сутки приходится два-три раза менять длину волны. Часто вследствие изменения состояния атмосферы связь на некоторое время нарушается совсем. Во-вторых, наличие зоны молчания.

Волны короче 25 м относятся к «дневным волнам», так как они хорошо распространяются днем. К «ночным волнам» относятся волны длиннее 40 м. Эти волны хорошо распространяются ночью.

Условия распространения коротких радиоволн определяются состоянием ионизированного слоя F_2. Электронная концентрация этого слоя часто нарушается вследствие неравномерности солнечного излучения, вызывающей ионосферные возмущения и магнитные бури. В результате энергия коротких радиоволн значительно поглощается, что ухудшает радиосвязь, даже иногда делает ее совсем невозможной. Особенно часто ионосферные возмущения наблюдаются на широтах, близких к полюсам. Поэтому там коротковолновая связь ненадежна.

Наиболее заметные ионосферные возмущения имеют свою периодичность: они повторяются через 27 суток (время обращения Солнца вокруг своей оси).

В диапазоне коротких волн сильно сказывается влияние промышленных, атмосферных и взаимных помех.

Оптимальные частоты связи на коротких волнах выбираются на основе радиопрогнозов, которые делятся на долгосрочные и краткосрочные. В долгосрочных прогнозах указывается ожидаемое среднее состояние ионосферы в течение определенного отрезка времени (месяца, сезона, года и более), тогда как краткосрочные прогнозы составляются на сутки, пятидневку и характеризуют возможные отклонения ионосферы от ее среднего состояния. Прогнозы составляются в виде графиков в результате обработки систематических наблюдений за ионосферой, солнечной активностью и состоянием земного магнетизма.

Ультракороткие волны (УКВ) от ионосферы не отражаются, они свободно проходят ее, т. е. эти волны не имеют пространственной ионосферной волны. Поверхностная же ультракороткая

волна, на которой возможна радиосвязь, имеет два существенных недостатка: во-первых, поверхностная волна не огибает земную поверхность и большие препятствия и, во-вторых, она сильно поглощается в почве.

Ультракороткие волны широко применяются там, где требуется небольшой радиус действия радиостанции (связь ограничивается обычно пределами прямой видимости). В этом случае связь ведется пространственной тропосферной волной. Она обычно состоит из двух составляющих: прямого луча и луча, отражен-

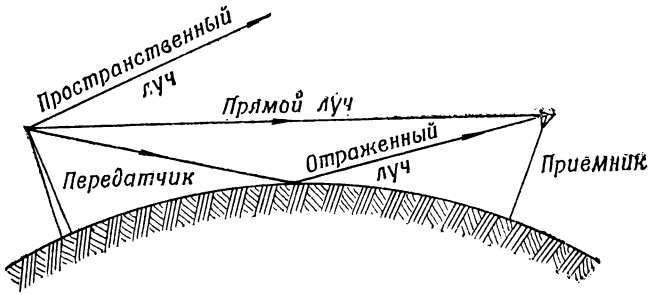


Рис. 76. Прямой и отраженный лучи пространственной волны

ного от земли (рис. 76). Если антенны расположены достаточно близко, оба луча обычно достигают приемной антенны, но интенсивность их различная. Луч, отраженный от земли, слабее из-за потерь, происходящих во время отражения от земли. Прямой луч имеет почти то же самое затухание, что и волна в свободном пространстве. В приемной антенне общий сигнал равен векторной сумме этих двух составляющих.

Приемная и передающая антенны имеют обычно одну и ту же высоту, так что длина пути отраженного луча немного отличается от прямого луча. Отраженная волна имеет сдвиг по фазе на 180°. Таким образом, пренебрегая потерями в земле во время отражения, если два луча прошли одно и то же расстояние, векторная сумма их равна нулю, в результате в приемной антенне сигнала не будет.

В действительности отраженный луч проходит несколько большее расстояние, следовательно, разность фаз в приемной антенне будет около 180°. Разность фаз определяется разностью пути в отношениях длины волны, а не в линейных единицах. Другими словами, общий сигнал, принимаемый при этих условиях, зависит главным образом от используемой частоты. Например, если длина рабочей волны 360 м, а разность пути 2 м, сдвиг фазы будет отличаться от 180° только на 2°. В результате наблюдается почти полное отсутствие сигнала в приемной антенне. Если длина волны 4 м, та же самая разность пути 2 м будет вызывать разность фазы 180°, полностью компенсируя сдвиг фазы 180° при отражении. В этом случае сигнал удваивается по напряжению.

Из этого вытекает, что при низких частотах использование пространственных волн не представляет интереса для связи. Только на высоких частотах, где разность пути является соизмеримой с используемой длиной волны, пространственная волна широко используется.

Радиус действия передатчиков УКВ значительно увеличивается при связи самолетов в воздухе и с землей.

К преимуществам УКВ следует отнести возможность применения небольших антенн. Кроме того, в диапазоне УКВ может одновременно работать большое число радиостанций без взаимных помех. На участке диапазона волн от 10 до 1 м можно разместить одновременно работающих станций больше, чем в диапазоне коротких, средних и длинных волн вместе взятых.

Широкое распространение получили ретрансляционные линии, работающие на УКВ. Между двумя пунктами связи, находящимися на большом расстоянии, устанавливается несколько УКВ приемопередатчиков, расположенных в пределах прямой видимости один от другого. Промежуточные станции работают автоматически. Организация ретрансляционных линий позволяет повысить дальность связи на УКВ и осуществить многоканальную связь (вести одновременно несколько телефонных и телеграфных передач).

Сейчас уделяется большое внимание использованию УКВ диапазона для дальней радиосвязи.

Наибольшее применение получили линии связи, работающие в диапазоне 20—80 МГц и использующие явления ионосферного рассеяния. Считалось, что радиосвязь через ионосферу возможна лишь на частотах ниже 30 МГц (длина волны более 10 м), а так как этот диапазон полностью загружен и дальнейшее увеличение числа каналов в нем невозможно, вполне понятен интерес к рассеянному распространению радиоволн.

Это явление заключается в том, что некоторая часть энергии излучения сверхвысоких частот рассеивается имеющимися в ионосфере неоднородностями. Создаются эти неоднородности воздушными течениями слоев с различными температурой и влажностью, блуждающими заряженными частицами, продуктами ионизации хвостов метеоритов и другими еще малоизученными источниками. Поскольку тропосфера всегда неоднородна, рассеянное преломление радиоволн существует систематически.

Рассеянное распространение радиоволн подобно рассеянию света прожектора в темную ночь. Чем мощнее световой луч, тем больше он дает рассеянного света.

При изучении дальнего распространения ультракоротких волн было замечено явление резкого кратковременного повышения слышимости сигналов. Такие всплески случайного характера длятся от нескольких миллисекунд до нескольких секунд. Однако практически они наблюдаются в течение суток с перерывами, редко превышающими несколько секунд. Появление моментов повышенной слышимости объясняется главным образом отражением радио-

волн от ионизированных слоев метеоритов, сгорающих на высоте около 100 км. Диаметр этих метеоритов не превышает нескольких миллиметров, а их следы тянутся на несколько километров.

От метеоритных следов хорошо отражаются радиоволны частотой 50—30 МГц (6—10 м).

Ежедневно в земную атмосферу влетает несколько миллиардов таких метеоритов, оставляя за собой ионизированные следы с высокой плотностью ионизации воздуха. Это и дает возможность получить надежную работу радиолиний большой протяженности при использовании передатчиков относительно небольшой мощности. Неотъемлемой частью станций на таких линиях является вспомогательное буквопечатающее оборудование, снабженное элементом памяти.

Поскольку каждый метеоритный след существует всего несколько секунд, передача ведется автоматически короткими сериями.

В настоящее время широко используются связь и телевизионные передачи через искусственные спутники Земли.

Глава 7

ЭЛЕКТРОННЫЕ И ИОННЫЕ ПРИБОРЫ

Электронные лампы осуществляют:

— преобразование постоянного тока в переменный ток высокой частоты;

— преобразование переменного тока в постоянный;

— усиление слабых колебаний;

— модуляцию (управление колебаниями высокой частоты);

— детектирование (выделение сигнала, действующего при модуляции на высокочастотное колебание);

— преобразование одних частот в другие.

ДВУХЭЛЕКТРОДНАЯ ЛАМПА

Известно, что в проводниках имеются свободные электроны. Под действием сил электрического поля они перемещаются внутри проводника, образуя электрический ток. Выйти за пределы проводника они не могут, так как этому препятствуют силы притяжения положительно заряженных ядер атомов, находящихся на поверхности проводника. Чтобы преодолеть эти силы, электрон должен совершить работу, а для этого он должен обладать определенным запасом энергии. С повышением температуры энергия электрона возрастает. Если проводник нагреть до высокой температуры, то некоторые свободные электроны, приобретая большую скорость, вылетают из проводника в окружающее пространство. Эти электроны при известных условиях создают ток.

Процесс выделения (излучения, испускания) электронов накаленными телами называется *термоэлектронной эмиссией.* Слово «термо» означает «тепло», а «эмиссия» — «испускание», «излучение».

Холодная эмиссия. Если приложить определенную разность потенциалов между металлическими электродами, то возможно излучение электронов с поверхности холодного металла за счет действия внешнего электрического поля. Этот вид эмиссии называется холодной эмиссией и используется в некоторых газоразрядных приборах.

Вторичная эмиссия. С поверхности холодного металла можно получить эмиссию, если его бомбардировать электронами или ионами. Электрон, двигаясь с большой скоростью, ударяется о

поверхность металла. Часть кинетической энергии электрона передается электронам металла, часть энергии превращается в тепло. Электроны, получившие дополнительную энергию, вылетают с поверхности металла.

Электроны, бомбившие металл, называются первичными, а электроны, вылетающие из металла, — вторичными. При определенных скоростях первичный электрон может выбить несколько вторичных. Это явление называется вторичной эмиссией.

Фотоэлектронная эмиссия. Некоторые материалы излучают электроны под воздействием потока световой энергии. Это явление называется фотоэлектронной эмиссией.

Устройство диода

Простейшая электродная лампа имеет два электрода, и поэтому она называется *двухэлектродной лампой* или *диодом*. Условное изображение диода дано на рис. 77.

Рис. 77. Условное изображение диода

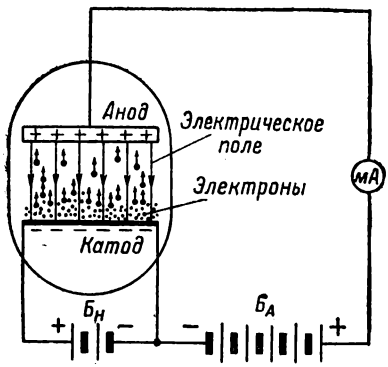


Рис. 78. Движение электронов между катодом и анодом диода

Диод состоит из стеклянного или металлического баллона, из которого выкачан воздух, внутри баллона помещаются два электрода. Один из них называется катодом, другой — анодом.

Из баллона выходит три вывода: два — для подключения нити накала к источнику тока, третий — для подключения анода.

Катод представляет собой металлическую нить из тугоплавкого металла. Нить накаливается электрическим током, как и в обычной осветительной электрической лампе. Анодом диода служит металлический цилиндр, охватывающий собой катод.

Величина термоэлектронной эмиссии катода характеризуется током эмиссии, зависящим от степени нагрева катода, т. е. его температуры (чем выше температура катода, тем больше ток эмиссии), поверхности катода (чем больше поверхность катода, тем больше ток эмиссии), материала катода.

Анод притягивает излученные катодом электроны, так как он имеет положительный потенциал по отношению к катоду. Свободные электроны, вылетевшие с раскаленного катода, попадают в электрическое поле, действующее между анодом и катодом. Под влиянием этого поля электроны движутся к аноду (рис. 78). Во внешней цепи возникает электрический ток.

Стоит только отключить анод от источника тока, как поток (упорядоченное движение) электронов сразу прекратится. Электрическое поле между катодом и анодом исчезнет, и анод не в состоянии будет притягивать электроны.

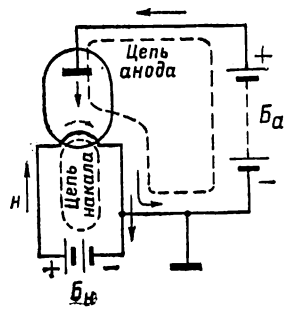


Рис. 79. Схема включения диода

Включение диода

На рис. 79 изображена схема включения диода. Схема состоит из двух цепей: цепи накала и цепи анода.

В цепь накала входят: нить накаливания (катод), соединительные провода и источник тока (в данном случае батарея накала $Б_н$), накаливающий катод.

В цепь анода входят источник тока (анодная батарея $Б_а$), пространство между анодом и катодом внутри лампы и соединительные провода.

Ток, проходящий по цепи накала, называется током накала ($I_н$). Напряжение между выводами нити накала называется напряжением накала ($U_н$).

Ток, проходящий по цепи анода, называется анодным током ($I_а$). Напряжение между анодом и катодом называется анодным напряжением ($U_а$).

На рис. 79 стрелками показано направление тока в цепях накала и анода. Еще раз обратим внимание на то, что электроны движутся в цепи от минуса к плюсу, а внутри лампы — от катода к аноду. Но принято считать за направление тока направление от плюса источника тока к минусу, а внутри лампы — от анода к катоду.

Величины напряжения и тока накала, а также анодного напряжения и анодного тока различны для разных типов ламп и зависят от назначения последних.

Каким образом включать батарею накала в цепь, безразлично. Независимо от направления тока в цепи накала нить раскалится и будет излучать электроны.

Чтобы получить ток в цепи анода, плюс анодной батареи необходимо подключить к аноду, а минус — к катоду диода. Минус анодной батареи обычно соединяют с минусом, а не с плюсом батареи накала (см. рис. 79).

Таким образом, к одному выводу катода подключаются ми-

нус батареи накала и минус анодной батареи. Эта точка называется «общим минусом»; она соединяется с землей или корпусом станции (заземляется).

Основное свойство диода состоит в том, что он пропускает ток только в одном направлении, или, как говорят, имеет одностороннюю проводимость.

Благодаря свойству односторонней проводимости двухэлектродная лампа получила широкое распространение для выпрямления переменного тока.

В радиоприемниках диод применяется для детектирования (выпрямления переменного тока высокой частоты).

Типы катодов

Катоды электронных ламп изготовлялись из чистого вольфрама, но затем их стали покрывать слоем другого металла или окиси металла (за исключением катодов мощных ламп). Та-

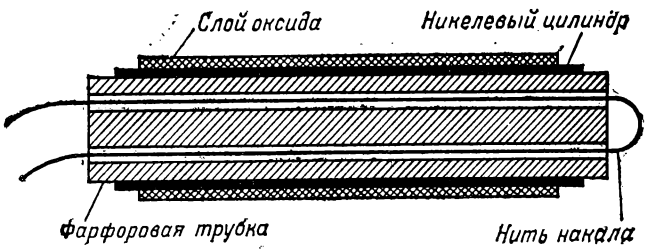


Рис. 80. Одна из первых конструкций подогревного катода

кие катоды получили название активированных. Катоды, в которых используется активная пленка, называют пленочными катодами.

Тонкий слой другого металла, нанесенный на вольфрам или другой металл, увеличивает эмиссию катода при той же температуре нагрева. Активированные катоды более экономичны, т. е. расходуют меньшую мощность на нагрев.

Срок службы активированных катодов значительно больше, чем вольфрамовых.

Лампы, в которых используются катоды в виде нити, называются лампами с *прямым* (непосредственным) *накалом.*

Катоды прямого накала в большинстве случаев нельзя питать непосредственно переменным током, так как будет меняться накал нити и эмиссия будет пульсировать с частотой, равной удвоенной частоте питаемого тока. С такой же частотой будет пульсировать и ток в анодной цепи.

Чтобы катоды можно было питать от источника переменного тока, применяют *подогревные катоды.* Лампы, в которых используются подогревные катоды, называются *лампами с косвенным накалом.*

На рис. 80 схематически изображена конструкция подогревного катода (вид в разрезе). Катод состоит из фарфоровой трубки с двумя каналами, через которые проходит нить накала (подогреватель), изготовляемая обычно из вольфрама. На фарфоровую трубку надет никелевый цилиндр, покрытый снаружи оксидным слоем, который и является катодом. В этом случае нить предназначена только для накала катода. Катод и нить изолированы между собой фарфоровой трубкой.

Лампа с подогревным катодом начинает работать лишь через 30—40 с после включения. Это недостаток подогревных катодов.

Тепловая инерция подогревных катодов достаточно велика, и изменения переменного тока, питающего нить накала, с частотой 50 Гц практически не сказываются на температуре катода, т. е. она остается постоянной. Фона переменного тока не появляется, поэтому для питания подогревных катодов можно использовать источники переменного тока.

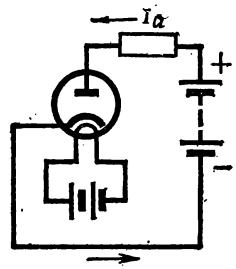


Рис. 81. Схема включения диода с подогревным катодом

На рис. 81 приведена принципиальная схема включения лампы с подогревным катодом.

Характеристика диода

Напряжение накала диода остается во время работы постоянным, а изменяется только напряжение на аноде. Поэтому важно знать, как зависит величина анодного тока диода от анодного напряжения.

Зависимость анодного тока I_a от анодного напряжения U_a, изображенная в виде графика, называется *характеристикой диода* (рис. 82). По горизонтальной оси отложено напряжение на аноде в вольтах, по вертикальной оси — ток в миллиамперах.

При анодном напряжении, равном нулю, ток в анодной цепи диода также равен нулю. Затем с ростом напряжения на аноде анодный ток увеличивается и, наконец, достигает некоторого предельного значения. Дальнейшее повышение анодного напряжения не вызывает роста анодного тока.

Нагретый катод излучает электроны все время. Когда напряжение на аноде равно нулю, он не в состоянии притягивать электроны и анодный ток тоже равен нулю. Внутри лампы вокруг катода образуется отрицательный пространственный заряд (электронное облачко), который препятствует выходу из катода новых электронов. Часть электронов попадает на катод обратно, на их место вылетают новые, таким образом отрицательный пространственный заряд существует все время, пока нагрет катод. Плотность пространственного заряда, т. е. число электронов в 1 см^3 прост-

ранства, зависит от температуры катода. Чем выше эта температура, тем больше плотность пространственного заряда.

При включении положительного анодного напряжения электроны пространственного заряда начинают притягиваться анодом. На место улетевших электронов катод выделяет новые, появляется анодный ток.

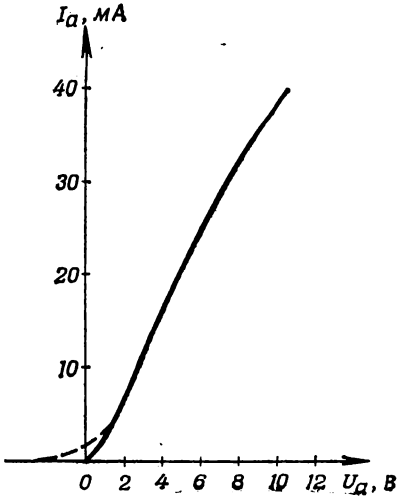


Рис. 82. Характеристика диода

Величина анодного тока определяется количеством электронов, попадающих с катода лампы на анод за одну секунду. С увеличением напряжения на аноде он притягивает все больше и больше электронов пространственного заряда, т. е. растет ток в анодной цепи. При некотором анодном напряжении наступает замедление в росте анодного тока, и начиная с определенного напряжения он остается постоянным, как бы мы ни увеличивали напряжение[1].

Это значит, что все электроны, излучаемые катодом, попадают на анод. Пространственного заряда — поставщика электронов аноду — теперь не существует, а катод при данном напряжении накала не в состоянии излучать большее количество электронов. Анодный ток достигает предельного значения. Это предельное значение анодного тока называется *током насыщения*. В диоде ток насыщения равен току эмиссии катода.

Повысить анодный ток (увеличить эмиссию) можно только путем увеличения напряжения накала, но этого делать не следует, так как повышение накала выше определенной нормы резко сокращает срок службы лампы.

Итак, ток в цепи диода увеличивается (до момента насыщения) с увеличением приложенного напряжения. В этом отношении диод напоминает обычный проводник. Как и проводник, диод имеет некоторое сопротивление, называемое внутренним сопротивлением диода. Если сопротивление проводника постоянное, то внутреннее сопротивление диода не постоянное, оно зависит от величины и полярности приложенного напряжения. Ток через диод не проходит при отрицательном напряжении на аноде, в этом случае внутреннее сопротивление диода равно бесконечности.

В зависимости от типа диода его внутреннее сопротивление достигает порядка сотен или тысяч Ом. Это справедливо для слу-

[1] Это справедливо только для вольфрамовых катодов. У оксидных катодов рост анодного тока не прекращается вплоть до разрушения катода.

чая, когда диод работает при небольших положительных напряжениях на аноде, т. е. до наступления момента насыщения.

У некоторых типов диодов, имеющих небольшое расстояние между анодом и катодом, анодный ток (анодная характеристика) начинается при некотором небольшом отрицательном напряжении на аноде (см. пунктирную часть характеристики на рис. 82). Имея большую начальную скорость, некоторые электроны даже при небольшом отрицательном потенциале анода преодолевают тормозящее поле и достигают анода, создавая в его цепи небольшой «начальный» ток. Для устранения этого тока следует приложить между анодом и катодом небольшое отрицательное «запирающее» напряжение.

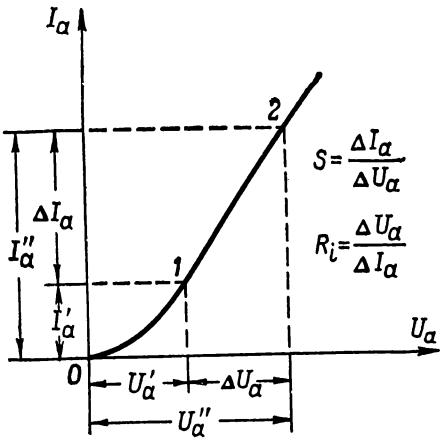


Рис. 83. Определение параметров диода по его характеристике

Параметры диода

Параметрами электронной лампы называются постоянные величины, которые характеризуют ее свойства.

Основные параметры диода — крутизна характеристики S и внутреннее сопротивление R_i.

Эти параметры позволяют сравнивать различные типы диодов и рассчитывать схемы, в которых работают лампы.

Крутизной характеристики диода называется отношение изменения анодного тока к вызвавшему его изменению анодного напряжения (рис. 83), выраженное в мА/В:

$$S=\frac{I_a''-I_a'}{U_a''-U_a'}=\frac{\Delta I_a}{\Delta U_a}.$$

Крутизна характеристики измеряется в миллиамперах на вольт и показывает, на сколько миллиампер изменяется анодный ток диода при изменении анодного напряжения на один вольт.

На прямолинейном участке характеристики крутизна имеет наибольшее значение, на этом участке она неизменна и является параметром лампы. Крутизна характеристики диода зависит от его конструкции: чем больше действующая поверхность анода и чем меньше расстояние между анодом и катодом, тем больше крутизна. Большая крутизна характеристики — достоинство диода.

Величина, обратная крутизне характеристики, называется *внутренним сопротивлением* лампы переменному току.

Внутреннее сопротивление переменному току — есть отношение изменения анодного напряжения к изменению анодного тока, выраженное в омах:

$$R_i = \frac{U_a'' - U_a'}{I_a'' - I_a'} = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a}.$$

Внутреннее сопротивление показывает, на сколько вольт потребовалось бы увеличить анодное напряжение, чтобы величина анодного тока возросла на один ампер.

На прямолинейном участке характеристики величина R_i постоянна и служит параметром лампы. Чем больше поверхность анода и чем меньше расстояние между анодом и катодом, тем меньше R_i. У различных типов диодов R_i измеряется величинами от нескольких сот Ом до десятков килоом.

Не следует путать внутреннее сопротивление переменному току R_i с сопротивлением лампы постоянному току $R_{i\,пост}$, которое определяется как отношение величины анодного напряжения к соответствующей величине анодного тока.

В одной и той же точке характеристики лампы сопротивление диода переменному току и сопротивление постоянному току имеют различные значения.

Лампа как нелинейное сопротивление

Имея в виду сопротивление лампы постоянному току, ее можно сравнивать с обычным сопротивлением. Однако электронная лампа, и в частности диод, обладает некоторыми особенностями.

Величина обычного сопротивления не зависит от приложенного напряжения. Если напряжение увеличить в несколько раз, то во столько же раз увеличится и ток. Сопротивления, для которых характерна прямая пропорциональность между напряжением и током, называются линейными.

Для лампы между величиной напряжения, приложенного между анодом и катодом, и величиной анодного тока прямой пропорциональности нет. Это значит, что величина сопротивления лампы для постоянного тока при различных значениях анодного напряжения неодинакова.

На графике, изображенном на рис. 84, напряжение на аноде U_a'' в два раза больше напряжения U_a'. Однако значение анодного тока I_a'' превышает значение тока I_a' более чем в два раза.

Так как между напряжением на аноде и анодным током нет прямой пропорциональности, лампу следует рассматривать как нелинейное сопротивление.

Нелинейное сопротивление характеризуется изменением формы тока по сравнению с формой приложенного переменного напряжения. Это свойство электронных ламп широко используется в радиотехнике.

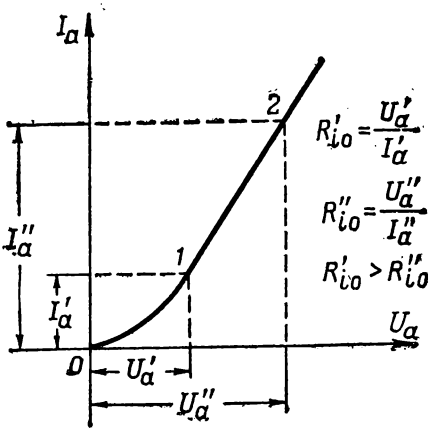


Рис. 84. Сопротивление диода постоянному току в различных точках характеристики

ТРЕХЭЛЕКТРОДНАЯ ЛАМПА

Трехэлектродная лампа отличается от двухэлектродной наличием третьего электрода, расположенного между анодом и катодом на пути движения электронов. Этот электрод стали называть *сеткой*, а лампу с тремя электродами — *трехэлектродной*, или *триодом*. Электроны свободно проходят через отверстия сетки. Для сравнения укажем, что отверстия сетки во столько раз больше размеров электронов, во сколько примерно Земля больше пылинки.

Добавление третьего электрода изменило свойства электронной лампы. Кроме выпрямления переменного тока трехэлектродная лампа способна усиливать электрические колебания. Использование трехэлектродных ламп для усиления электрических колебаний значительно увеличило дальность радиосвязи.

Вскоре было открыто новое свойство трехэлектродной лампы. Выяснилось, что с помощью триода можно получить незатухающие электрические колебания высокой частоты. Это открытие вызвало переворот в радиотехнике. Появились ламповые передатчики, получившие широкое распространение.

Устройство и работа триода

Анод и катод триода такие же, как у диода. Сетка изготовляется в виде спирали. Условное изображение триода приведено на рис. 85.

С помощью сетки можно управлять величиной анодного тока. Поэтому она обычно называется управляющей сеткой.

Чтобы сетка могла управлять потоком электронов внутри лампы, необходимо между сеткой и катодом включить источник напряжения. Меняя величину и знак этого напряжения, мы будем менять величину электронного потока в лампе. Кроме цепей накала и анода в триоде появилась еще одна цепь — цепь сетки (рис. 86).

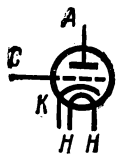


Рис. 85. Условное изображение триода

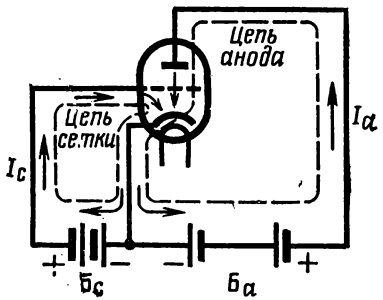


Рис. 86. Анодная и сеточная цепи триода

Рассмотрим работу сетки. Если на сетку не подано напряжение (т. е. сетка электрически нейтральна), то она не оказывает никакого влияния на поток электронов. При положительном напряжении на аноде электроны от катода, пройдя между витками сетки, попадут на анод и в анодной цепи установится какой-то ток I_{a1} (рис. 87, *а*).

При отрицательном напряжении на сетке (здесь и в дальнейшем напряжение на сетке следует понимать как потенциал сетки по отношению к катоду) электроны отталкиваются к катоду с силой, зависящей от величины этого напряжения. При небольшом отрицательном напряжении часть электронов все-таки проскакивает к аноду и в анодной цепи устанавливается ток I_{a2} (рис. 87, *б*). Очевидно, что ток I_{a2} меньше тока I_{a1}. Электроны, вылетающие из катода, обладают некоторым запасом энергии, вследствие того, что они имеют некоторую начальную скорость. Этот запас энергии дает возможность некоторым электронам преодолеть отталкивающее действие сетки, когда она находится под небольшим отрицательным напряжением. Кроме того, часть поля, создаваемого анодом, достигает катода, помогая этим электронам преодолевать сетку.

С увеличением отрицательного напряжения на сетке ток в анодной цепи уменьшается, и наступит момент, когда он совершенно прекратится (рис. 87, *в*). В этом случае говорят, что лампа заперта. В запертой лампе все электроны под действием отрица-

тельного напряжения на сетке возвращаются обратно к катоду, несмотря на положительное напряжение на аноде. Сетка ближе расположена к катоду, поэтому и влияние ее сильнее.

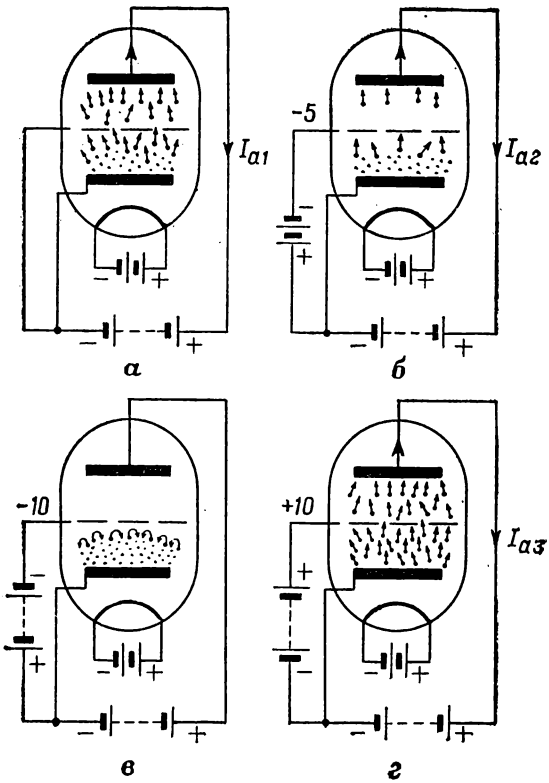


Рис. 87. Принцип работы триода (влияние напряжения на управляющей сетке на величину анодного тока):

а — напряжение на сетке равно нулю; *б* — напряжение на сетке —5 В; *в* — напряжение на сетке —10 В; *г* — напряжение на сетке +10 В

При положительном напряжении на сетке она помогает аноду притягивать электроны. В анодной цепи устанавливается ток I_{a3} (рис. 87, *г*), больший тока I_{a1}. Часть электронов попадет на положительно заряженную сетку и образует сеточный ток, но большинство электронов пролетит к аноду, так как напряжение на нем значительно больше напряжения на сетке.

Величина анодного тока зависит от напряжения на сетке. Чем больше положительное напряжение на сетке, тем больше электронов пролетит мимо нее и тем больше будет анодный ток. При этом больше электронов будет попадать и на сетку, а значит, одновременно с увеличением анодного тока растет и сеточный ток.

При некотором положительном напряжении на сетке все электроны, излучаемые катодом, попадут на анод и сетку. Анодный ток возрастет до величины тока насыщения. Дальнейшим увеличением положительного напряжения на сетке увеличить анодный ток не удастся. Говорят, что лампа в этом случае полностью открыта. Ток эмиссии катода равен сумме анодного и сеточного токов.

Таким образом, меняя величину и знак напряжения на сетке в сравнительно небольших пределах, можно добиться изменения анодного тока от нуля до тока насыщения. В этом именно и состоит управляющее действие сетки.

Сетку можно сравнить с водопроводным краном. Открывая постепенно кран, можно изменять количество воды, вытекающей в единицу времени. Точно так же изменением напряжения на сетке можно регулировать величину анодного тока.

Управлять величиной анодного тока изменением напряжения на сетке значительно «легче», чем изменением напряжения на аноде. Кроме того, при сеточном управлении почти нет расхода энергии источника, создающего управляющее напряжение на сетке.

Когда напряжение на сетке равно нулю, никакой затраты энергии нет со стороны источника сеточного напряжения. Электроны движутся от катода к аноду (при положительном напряжении на нем) с определенным ускорением, приобретая при этом кинетическую энергию под воздействием электрического поля анода, т. е. за счет энергии источника анодного напряжения.

Рассмотрим, что получается при положительном напряжении на сетке. При своем движении от катода к сетке электроны будут двигаться с большей скоростью, т. е. получат дополнительную кинетическую энергию за счет электрического поля сетки. Но как только электроны пройдут положительно заряженную сетку, их скорость начнет уменьшаться. Электроны будут тормозиться сеткой и, следовательно, отдавать ранее приобретенную дополнительную кинетическую энергию обратно. Электроны будут достигать анод с той же скоростью, с какой они достигали его при отсутствии напряжения на сетке. Положение не изменится и при отрицательном напряжении на сетке.

Как мы видим, сетка не изменяет конечной скорости электронов, а значит, и их кинетической энергии. Отсюда вытекает, что источник сеточного напряжения не затрачивает энергии на ускорение электронов, т. е. при постоянном напряжении на сетке происходит управление анодным током без затраты энергии со стороны сетки.

При изменении напряжения на сетке происходит некоторая затрата энергии. Это объясняется тем, что управляющее напряжение на сетке не только управляет величиной анодного тока, но и создает ток в цепи сетки. При небольшой частоте изменения напряжения на сетке сеточный ток весьма мал, следовательно, весьма мал и расход энергии на управление анодным током. Это очень

важное обстоятельство и позволяет применить электронную лампу в качестве усилителя.

При очень больших частотах положение резко меняется. Может оказаться, что сетка при движении электрона от катода притягивает его, а как только электрон пройдет сетку, напряжение на ней меняется и она начинает его отталкивать, т. е. электрон все время получает ускорение — приобретает кинетическую энергию. В этом случае происходит затрата энергии со стороны сетки. По этой причине обычные электронные лампы непригодны для усиления электрических колебаний очень высоких частот (волны короче 2—3 м).

Характеристики триода

Зависимость анодного тока от изменения напряжения на сетке, выраженная графически, называется анодно-сеточной ха-

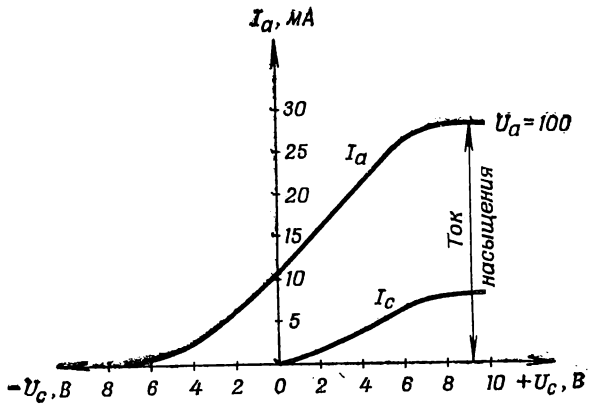


Рис. 88. Характеристики анодного и сеточного токов триода

рактеристикой [1]. При этом следует иметь в виду, что напряжение на аноде остается постоянным.

Для построения анодно-сеточной характеристики по горизонтальной оси (рис. 88) вправо от нуля откладывается положительное напряжение на сетке, влево — отрицательное. По вертикальной оси откладывается величина анодного тока. Изменяя напряжение на сетке, по прибору определяют величину анодного тока. Кривая, которая показывает, как изменяется ток в анодной цепи при изменении напряжения на сетке, называется *анодно-сеточной характеристикой.*

По характеристике можно, например, сказать, что при постоянном анодном напряжении $U_a = 100$ В анодный ток появляется при напряжении —6 В на сетке. Ток насыщения наступает при +8 В. В средней своей части характеристика примерно прямолинейна; это значит, что при изменении напряжения на сетке на одну и ту

[1] Часто в литературе эта характеристика называется сеточной.

же величину анодный ток возрастает или убывает равными «порциями».

Зависимость анодного тока от изменения напряжения на аноде, выраженная графически, называется *анодной характеристикой.* При этом следует иметь в виду, что напряжение на сетке остается постоянным.

Для построения анодной характеристики по горизонтальной оси вправо от нуля откладывается напряжение на аноде, по вертикальной — величина анодного тока.

На рис. 88 кроме анодно-сеточной характеристики тока $I_а$ изображена еще одна кривая. Эта характеристика сеточного тока $I_с$. Характеристика начинается от нуля и возрастает по мере роста положительного напряжения на сетке. При отрицательном напряжении на сетке электроны не попадают на нее.

При обычных условиях, когда напряжение на сетке мало по сравнению с анодным напряжением, сеточный ток гораздо меньше анодного. Бóльшая часть электронов пролетает сквозь отверстия сетки к аноду.

Если понизить напряжение накала, то явление насыщения наступит при меньших напряжениях на сетке и величина тока насыщения уменьшится.

Следует отметить, что если продолжать (после наступления насыщения) увеличивать сеточное напряжение, то через некоторое время произойдет перераспределение тока. При этом анодный ток начнет быстро падать, а сеточный — увеличиваться, так как при большем напряжении на сетке ею будет притягиваться больше электронов. Лампы в этой области характеристик обычно не используются.

Семейство характеристик

Несколько анодно-сеточных характеристик одной и той же лампы, снятых при различных напряжениях на аноде, называются *семейством анодно-сеточных характеристик* (рис. 89).

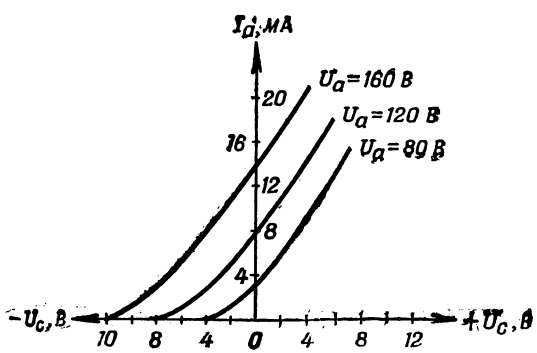


Рис. 89. Семейство анодно-сеточных характеристик триода

При более высоком напряжении на аноде характеристика анодного тока смещается влево. Чтобы запереть лампу при более высоком анодном напряжении, потребуется большее отрицательное напряжение на сетке.

Несколько анодных характеристик одной и той же лампы, снятых при различных напряжениях на сетке, называются *семейством анодных характеристик.*

Параметры триода

Основные параметры триода:
— крутизна характеристики, S;
— коэффициент усиления, μ;
— внутреннее сопротивление, R_i.

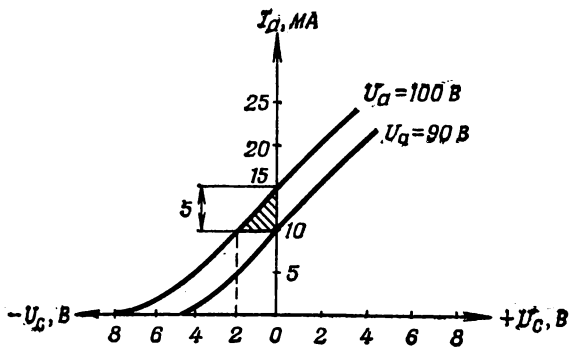


Рис. 90. Определение параметров лампы по ее характеристикам

Крутизна характеристики показывает, на сколько миллиампер изменяется анодный ток в лампе, если изменить напряжение на управляющей сетке на один вольт при постоянном анодном напряжении. Другими словами, крутизна характеристики показывает, как круто поднимается характеристика кверху.

Крутизну характеристики можно определить по анодно-сеточной характеристике. Для определения коэффициента усиления и внутреннего сопротивления лампы необходимо иметь две анодно-сеточные характеристики.

На рис. 90 приведены две анодно-сеточные характеристики. Одна из них снята при напряжении на аноде, равном 90 В, другая — при 100 В.

Если изменить напряжение на сетке от —2 В до 0, т. е. на 2 В, то анодный ток при этом возрастает с 10 до 15 мА, т. е. на 5 мА. Так как крутизна S характеризует изменение анодного тока при

изменении напряжения на сетке на один вольт (при постоянном U_a), то

$$S = \frac{5}{2} = 2{,}5\ \frac{мА}{В},$$

или в общем виде

$$S = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_c}\ (при\ постоянном\ U_a),$$

где ΔI_a — прирост анодного тока;

ΔU_c — прирост сеточного напряжения.

Крутизну принято выражать в миллиамперах на вольт (мА/В). Для различных ламп она может иметь значения от 1 до 10—20 мА/В.

Внутреннее сопротивление лампы определяет связь между анодным током и напряжением на ее аноде. Если увеличить анодное напряжение (при постоянном напряжении на сетке), то анодный ток также увеличится. Отношение изменения анодного напряжения к соответствующему изменению анодного тока при постоянном напряжении на сетке называется внутренним сопротивлением лампы.

Вернемся к рис. 90. При изменении напряжения на аноде на 10 В (одна характеристика снята при $U_a = 90$ В, другая — при $U_a = 100$ В) и постоянном напряжении на сетке (в рассматриваемом случае $U_c = 0$) анодный ток изменился на 5 мА (с 10 до 15 мА). Отсюда легко определить внутреннее сопротивление лампы по закону Ома:

$$R_i = \frac{10В}{0{,}005А} = 2000\ Ом,$$

или в общем виде

$$R_i = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a}\ (при\ постоянном\ U_c),$$

где ΔU_a — прирост анодного напряжения;

ΔI_a — прирост анодного тока.

Не следует забывать, что R_i всегда выражается в омах, поэтому при определении внутреннего сопротивления необходимо токи подставлять в амперах, а напряжение в вольтах.

В рассмотренном примере изменение анодного напряжения на 10 В вызвало изменение анодого тока на 5 мА. Если бы при тех же условиях анодный ток изменился не на 5, а на 2,5 мА, то R_i оказалось бы в два раза больше.

Таким образом, чем меньше влияние анодного напряжения на анодный ток, тем больше R_i лампы.

Внутреннее сопротивление триодов в зависимости от их устройств может быть в пределах 1 000—100 000 Ом.

Коэффициент усиления показывает, во сколько раз сильнее действует на анодный ток напряжение на сетке по сравнению с напряжением на аноде.

Вернемся опять к рис. 90. Изменение анодного тока на 5 мА можно получить изменением анодного напряжения на 10 В (с $U_a=90$ В до $U_a=100$ В) или изменением напряжения на сетке на 2 В (с $U_c=-2$ В до $U_c=0$). Сеточное напряжение в этом случае действует на анодный ток в 5 раз сильнее по сравнению с напряжением на аноде. Таким образом, коэффициент усиления

$$\mu=\frac{10}{2}=5,$$

или в общем виде

$$\mu=\frac{\Delta U_a}{\Delta U_c}\ (\text{при постоянном } I_a).$$

Коэффициент усиления лампы равен отношению изменения напряжения на аноде к изменению напряжения на сетке, которые вызывают одно и то же увеличение или уменьшение анодного тока. Так как коэффициент усиления представляет собой отношение двух напряжений, то он является величиной отвлеченной.

Величина μ зависит главным образом от устройства сетки: чем гуще сетка, тем больше коэффициент усиления.

Коэффициент усиления у триодов лежит в пределах 4—100.

Величина, обратная коэффициенту усиления μ, называется *проницаемостью* D $\left(D=\frac{1}{\mu}\right)$; она также относится к параметрам лампы.

Произведение трех параметров — S, R_i и D — равно единице:

$$SR_iD=\frac{\Delta I_a}{\Delta U_c}\frac{\Delta U_a}{\Delta I_a}\frac{\Delta U_c}{\Delta U_a}=1;$$

$$SR_iD=1.$$

Это уравнение называется основным уравнением триода.

Выразив D через μ, получим

$$\mu=SR_i.$$

Таким образом, по двум известным параметрам триода можно найти третий.

Мощность рассеивания на аноде

Электроны при своем движении от катода развивают большие скорости и с силой ударяются об анод. Энергия движения электронов при ударе их о поверхность анода преобразуется в тепло (т. е. тратится на раскачку атомов металла анода) подобно тому, как энергия движения пули преобразуется в тепло в момент ее удара о броню (пуля может расплавиться). В результате «электронной бомбардировки» температура анода повышается. На нагрев анода затрачивается электрическая энергия, или, как принято говорить, на аноде *рассеивается мощность* P_a, поступающая от источника анодного напряжения.

Сила ударов электронов об анод зависит от их скорости, которая определяется напряжением на аноде $U_а$. Чем больше напряжение на аноде, тем сильнее удары электронов.

Число ударов электронов об анод зависит от величины анодного тока $I_а$. Чем больше ток, тем больше ударов в секунду.

Мощность, рассеиваемая на аноде, подсчитывается путем умножения анодного напряжения на анодный ток:

$$P_а = U_а I_а.$$

При большом напряжении на аноде и большом анодном токе анод лампы может сильно накалиться и даже расплавиться. Чтобы этого не произошло, для каждой лампы устанавливается предельная мощность рассеивания на аноде, превышать которую нельзя.

Для увеличения предельной мощности рассеивания аноды изготовляются из тугоплавких материалов и искусственно охлаждаются. В мощных лампах применяется водяное охлаждение анодов.

Триоды имеют два недостатка. Во-первых, у них сравнительно небольшой коэффициент усиления, так как управляющая сетка лишь незначительно экранирует катод от влияния анода. Делать же триоды с очень густой сеткой нельзя, так как она будет препятствовать движению электронов к аноду, вследствие чего анодный ток будет мал, а сеточный ток велик. Во-вторых, триоды имеют сравнительно большую емкость между анодом и сеткой, оказывающую вредное влияние на работу лампы в диапазоне высоких частот.

Оба эти недостатка триода устраняются при введении еще одной сетки между анодом и управляющей сеткой лампы.

Понятие о динамическом режиме

В практических схемах использования триодов в анодную цепь лампы включается какая-либо нагрузка, например активное сопротивление (резистор) $R_а$ (рис. 91). Рассмотрим, как зависит анодный ток лампы от напряжения на сетке при наличии сопротивления нагрузки в анодной цепи и как связаны между собой величина анодного тока и напряжение на аноде. Режим, получающийся при наличии сопротивления нагрузки в анодной цепи лампы, называется *динамическим* или *рабочим*.

При наличии анодного тока лампы на резисторе $R_а$ создается падение напряжения

$$U_{R_а} = I_а R_а.$$

Полярность этого напряжения показана на рис. 91. Напряжение на аноде лампы $U_а$ будет меньше напряжения $E_а$ анодного источника на величину падения напряжения $U_{R_а}$ на сопротивлении:

$$U_а = E_а - U_{R_а} = E_а - I_а R_а.$$

Чем больше анодный ток, тем больше получается падение напряжения на резисторе R_a и тем меньше напряжение на аноде лампы. Если изменить напряжение U_c на сетке лампы, то будет изменяться и анодный ток, а это приведет к изменению напряжения на аноде лампы. Поэтому в динамическом режиме изменение напряжения на сетке вызывает изменение анодного напряжения лампы. Следовательно, величина анодного тока в динамическом режиме зависит не только от напряжения на сетке, но и от напряжения на аноде, которое изменяется.

Анодно-сеточной динамической характеристикой называется кривая, показывающая зависимость анодного тока лампы от напряжения на сетке при наличии сопротивления нагрузки в анодной цепи. Напряжение анодного источника и сопротивление нагрузки остаются постоянными. Динамическая анодно-сеточная характеристика, снятая при чисто активном сопротивлении нагрузки, имеет вид, подобный статической характеристике, но всегда проходит более полого.

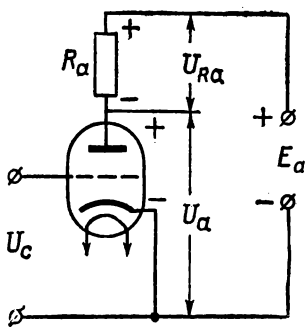


Рис. 91. Включение сопротивления нагрузки в анодную цепь триода

При малых значениях анодной нагрузки падение напряжения на ней небольшое, и напряжение на аноде лампы при возрастании анодного тока уменьшается незначительно. В этом случае крутизна анодно-сеточной динамической характеристики близка к крутизне статической характеристики. Чем больше сопротивление нагрузки, тем больше падение напряжения создается на нем и тем сильнее уменьшается напряжение на аноде при увеличении анодного тока. Следовательно, чем больше сопротивление анодной нагрузки, тем меньше крутизна анодно-сеточной динамической характеристики.

ЧЕТЫРЕХЭЛЕКТРОДНАЯ ЛАМПА

Добавочная сетка, введенная в триод между анодом и управляющей сеткой, называется экранирующей сеткой. Лампы с четырьмя электродами называются четырехэлектродными лампами или тетродами.

Введение экранирующей сетки повышает коэффициент усиления тетрода. Обе сетки лампы (управляющая и экранирующая) не густые и не препятствуют движению электронов с катода на анод. Для получения такого же усиления на триоде потребовалось бы сделать управляющую сетку очень густой, что сильно затруднило бы движение электронов к аноду. Анодный ток при этом резко уменьшился бы, а сеточный увеличился, что совершенно недопустимо.

Как и в триоде, анодный ток в тетроде больше зависит от напряжения на управляющей сетке, чем от напряжения на аноде. Кроме того, анодный ток зависит и от напряжения на экранирующей сетке. А так как эта сетка находится ближе к катоду, чем анод, то ее влияние на анодный ток сильнее влияния анода.

Напряжение на экранирующей сетке всегда остается постоянным, так как она присоединена непосредственно к части анодной батареи. Таким образом, величина анодного тока будет в меньшей степени зависеть от изменения анодного напряжения, вызванного изменением величины падения напряжения на анодном сопротивлении. Следовательно, экранирующая сетка в значительной степени устраняет так называемое явление анодной реакции, которое приводит к уменьшению крутизны характеристики.

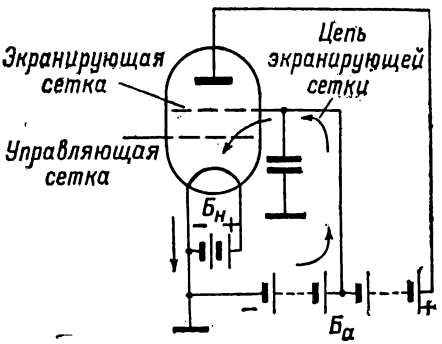


Рис. 92. Схема включения тетрода

Чтобы избежать большого тока в цепи экранирующей сетки, напряжение на ней выбирается несколько меньше напряжения на аноде.

Внутреннее сопротивление тетрода — сотни тысяч ом — больше внутреннего сопротивления триода, так как в тетроде изменение анодного напряжения мало влияет на анодный ток. А мы знаем, что внутреннее сопротивление лампы определяется отношением $\frac{\Delta U_а}{\Delta I_а}$.

Междуэлектродная емкость анод — управляющая сетка с 3—5 пФ (для триодов) уменьшается до сотых и даже тысячных долей пикофарады. Это очень важно при работе лампы в диапазоне высоких частот.

Схема включения тетрода показана на рис. 92.

Напряжение между экранирующей сеткой и катодом обозначается $U_э$. Его величина обычно равна 20—50% напряжения на аноде. При этом экранирующая сетка не снижает сильно анодного тока.

Тетрод по сравнению с триодом имеет еще одну цепь, называемую цепью *экранирующей сетки*. Направление тока в этой цепи показано на рис. 92 стрелками.

Недостатки, присущие триоду, устранены в тетроде, но в нем появляется свой недостаток: возникает динатронный эффект (вторичная эмиссия).

Электроны при своем движении к аноду приобретают определенную кинетическую энергию. Попадая на анод, электроны отдают эту энергию. Часть ее превращается в тепло, а часть при определенных условиях может пойти на освобождение из поверх-

ности анода новых, так называемых *вторичных электронов*. Другими словами, электроны, попадающие на анод, вызывают вторичную эмиссию электронов, или *динатронный эффект*.

Явление динатронного эффекта существует во всех лампах. В диодах и триодах оно не мешает работе, так как выбитые электроны притягиваются обратно анодом. Оно также не мешает работе тетрода, если напряжение на экранирующей сетке меньше напряжения на аноде.

При работе лампы в схеме напряжение на аноде изменяется и в отдельные промежутки времени может оказаться меньше, чем напряжение на экранирующей сетке. В этом случае вторичные электроны, выбитые из анода, будут притягиваться к сетке. Появится ток вторичных электронов, называемый током вторичной эмиссии. Направление его противоположно направлению анодного тока (тока первичных электронов), поэтому последний уменьшится, что нарушит нормальную работу лампы. Возникнут амплитудные искажения в усиливаемых сигналах.

Из-за динатронного эффекта тетрод не нашел широкого практического использования.

Этот серьезный недостаток тетродов устранен в пятиэлектродных лампах.

ПЯТИЭЛЕКТРОДНАЯ ЛАМПА

Чтобы устранить динатронный эффект, в тетроде между анодом и экранирующей сеткой была введена еще одна сетка, называемая *защитной* или *противодинатронной*. Таким образом была получена пятиэлектродная лампа, или пентод. Схема включения пентода приведена на рис. 93.

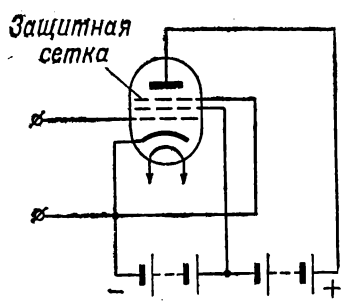


Рис. 93. Схема включения пентода

Защитная сетка соединяется с катодом лампы, следовательно, по отношению к аноду она имеет отрицательный потенциал. В этом случае вторичные электроны, выбитые из анода, отталкиваются защитной сеткой и возвращаются обратно на анод. Действие анода защитная сетка ослабляет незначительно, так как она делается довольно редкой. Ток вторичной эмиссии в пентоде возникнуть не может даже в том случае, если напряжение на аноде меньше напряжения на экранирующей сетке.

Пентоды — наиболее совершенные из рассмотренных типов лампы. Основными электродами в пентоде, как и в обычном триоде, служат катод, анод и управляющая сетка. Две другие сетки — экранирующая и защитная — вспомогательные.

Электронный поток в пентоде подобно потоку в тетроде создается за счет постоянного электрического поля экранирующей сетки. В пентоде динатронный эффект возникнуть не может, поэтому на экранирующую сетку подается более высокое положительное напряжение, чем в тетроде. Это приводит к увеличению плотности электронного потока в лампе и повышает крутизну характеристики.

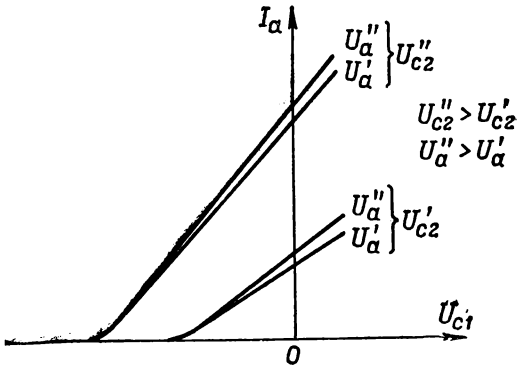


Рис. 94. Анодно-сеточные характеристики пентода

Междуэлектродная паразитная емкость анод — управляющая сетка у пентода еще меньше, чем у тетрода, вследствие дополнительного экранирующего действия защитной сетки. Она составляет тысячные доли пикофарады.

Напряжение на экранирующую сетку подается обычно от анодного источника через делитель напряжения или через гасящее сопротивление, так же как у тетрода.

Коэффициент усиления пентодов доходит до сотен и даже нескольких тысяч; внутреннее сопротивление составляет сотни тысяч и миллионы ом.

Анодно-сеточная характеристика пентода показывает зависимость анодного тока от напряжения на управляющей сетке при постоянных значениях напряжения на аноде, экранирующей и защитной сетках (рис. 94).

На пути электронного потока в пентоде находятся три сетки. Анодное напряжение в нормальном режиме практически не влияет на интенсивность электронного потока и величину анодного тока пентода, так как электрическое поле анода почти полностью перехватывается сетками. Из рисунка видно, что анодно-сеточные характеристики, снятые при различных значениях анодного напряжения, мало чем отличаются одна от другой. Характеристики, снятые при различных напряжениях на экранирующей сетке, значительно различаются: анодный ток сильно зависит от напряжения на экранирующей сетке. Характеристики, снятые при более высоком напряжении на экранирующей сетке, расположены левее, и крутизна

их больше. Одновременно с увеличением анодного тока увеличивается и ток в цепи экранирующей сетки, так как некоторая часть электронов перехватывается этой сеткой.

Иногда в практических схемах усилителей сверхвысокой частоты для увеличения крутизны характеристики напряжение на экранирующей сетке берут выше, чем напряжение на аноде.

Значения основных параметров пентода — S, μ, R_i зависят от напряжения на экранирующей сетке. Плотность и скорость электронного потока возрастают при увеличении этого напряжения. При большом электронном потоке сетка управляет большим анодным током и крутизна характеристики возрастает.

С другой стороны, при большой плотности электронного потока анодное напряжение сильнее влияет на величину анодного тока, поэтому коэффициент усиления и внутреннее сопротивление уменьшаются.

Лампы с удлиненной характеристикой

При приеме дальних станций, когда сигналы слабые, желательно, чтобы лампы имели большой коэффициент усиления.

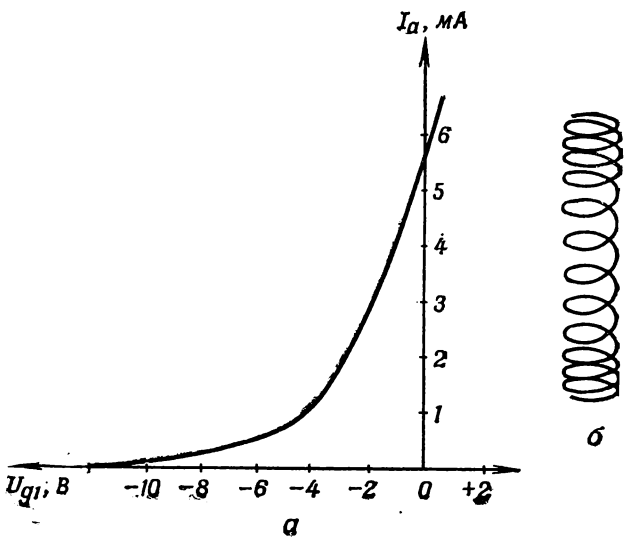


Рис. 95. Лампа с удлиненной характеристикой:
а — характеристика лампы; *б* — устройство управляющей сетки

При приеме же местных станций лампы с большим усилением создают сильные искажения.

Чтобы можно было регулировать усиление в зависимости от силы принимаемых сигналов, применяются лампы с *переменной крутизной характеристики*, или, как их обычно называют, *лампы с удлиненной характеристикой*. Характеристика такой лампы приведена на рис. 95, *а*. Чтобы получить такую характеристику, доста-

точно управляющую сетку лампы изготовить с переменным шагом (рис. 95, *б*). При больших отрицательных напряжениях на управляющей сетке густые участки ее (по краям) не работают. В этом случае работает только редкая часть сетки, что дает характеристику с малой крутизной. Картина меняется, если на сетке небольшие отрицательные напряжения. При этом работает вся сетка, причем густые участки ее оказывают сильное влияние на анодный ток, что дает характеристику с большой крутизной.

Лампу с удлиненной характеристикой можно рассматривать как сочетание двух ламп с различными параметрами. С помощью такой лампы можно автоматически регулировать усиление. Эти лампы широко применяются в приемниках.

Лучевые тетроды

Наряду с пентодами в усилителях низкой частоты широко применяются так называемые *лучевые тетроды* (рис. 96). Влияние вторичной эмиссии в этих лампах устранено не путем

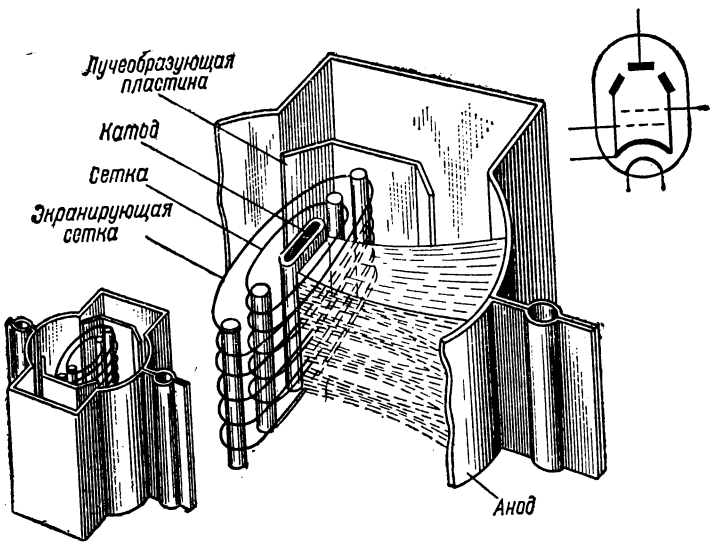


Рис. 96. Устройство, принцип действия и условное обозначение лучевого тетрода

введения добавочной сетки, как в пентодах, а увеличением расстояния между рабочей поверхностью анода и экранирующей сеткой. За счет этого влияние экранирующей сетки на вторичные электроды, выбиваемые с анода, ослаблено.

В направлении траверз (стержней, к которым крепятся сетки лампы) расположены металлические лучеобразующие пластины. Эти пластины имеют нулевой потенциал, так как они соединены с катодом, и поэтому препятствуют движению электронов в на-

правлении траверз. Электроны летят к аноду в виде лучей (отсюда название лучевая лампа). Для получения более направленных электронных лучей витки управляющей и экранирующей сеток устанавливаются точно один против другого. Число витков в обеих сетках одинаковое. На управляющую сетку всегда подается постоянное отрицательное напряжение смещения, поэтому электроны огибают ее витки. Так как витки экранирующей сетки расположены против витков управляющей сетки, а расстояние между сетками мало, то число электронов, падающих на экранирующую сетку, мало и ток этой сетки невелик. Это позволяет подавать на экранирующую сетку высокое положительное напряжение, за счет чего в лампе создается интенсивный электронный поток и получается высокое значение крутизны характеристики.

Во время работы лампы напряжение на аноде изменяется в широких пределах. В процессе этих изменений потенциал анода становится значительно ниже потенциала экранирующей сетки. В зоне, где плотность электронов наибольшая, получается минимум потенциала, что равносильно наличию в данной зоне отрицательно заряженной сетки. Потенциал точек этой зоны оказывается ниже, чем потенциал анода. Вторичные электроны вследствие недостаточного запаса кинетической энергии не могут преодолеть отталкивающего действия направленных электронных пучков, летящих к аноду. Вторичные электроны не достигают экранирующей сетки, они возвращаются на анод. Этому способствует большое расстояние между экранирующей сеткой и анодом.

Концентрация электронных лучей и, как следствие, малое число электронов, попадающих на экранирующую сетку, приводят к сильному уменьшению величины ее тока. А поскольку ток экранирующей сетки почти всегда бесполезный, то в этом несомненное преимущество лучевых тетродов.

Лучевые тетроды применяются в передатчиках в качестве генераторных ламп.

КОМБИНИРОВАННЫЕ ЛАМПЫ

Каждая из рассмотренных нами ламп может выполнять вполне определенную задачу. Кроме этих ламп существуют еще *комбинированные лампы*. В баллоне комбинированной лампы смонтированы две или три обычные лампы, поэтому она может выполнять несколько различных задач.

Большинство радиотехнических устройств содержит большое число ламп. Применение комбинированных ламп в таких устройствах уменьшает их габариты, вес, упрощает монтаж и снижает стоимость.

На рис. 97 дано условное изображение комбинированных ламп.

Двойной диод (рис. 97, *а*). В одном баллоне лампы смонтированы два диода. Катоды и аноды лампы выведены отдельно, это дает возможность использовать каждый диод самостоятельно. Эта лампа используется главным образом в качестве детектора.

Двойной триод (рис. 97, *б*). В одном баллоне лампы смонтированы два триода. На такой лампе можно, например, собрать два каскада усиления по низкой частоте.

Двойной диод — триод (рис. 97, *в*). Этот тип ламп представляет собой комбинацию двойного диода, используемого для детектирования, и триода, используемого обычно в качестве усилителя низкой частоты.

Двойной диод — пентод (рис. 97, *г*). Этот тип ламп представляет собой комбинацию двойного диода и пентода.

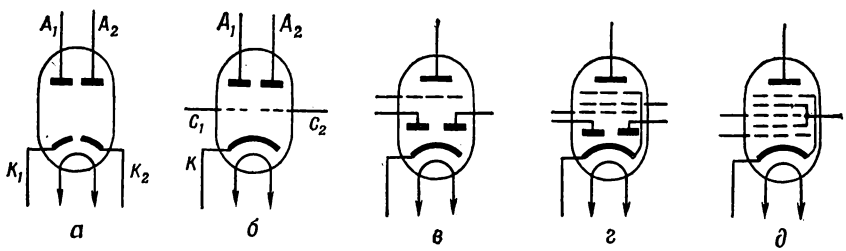


Рис. 97. Условное изображение комбинированных ламп:
а — двойной диод; *б* — двойной триод; *в* — двойной диод-триод; *г* — двойной диод-пентод; *д* — гептод-смеситель.

В отдельную группу среди комбинированных ламп можно выделить лампы с двойным управлением электронным потоком. Отличительной особенностью их является наличие двух управляющих сеток. Электронный поток в многосеточных лампах находится под действием двух управляющих сеток.

Переменное напряжение, поступающее на эти сетки, имеет различную частоту (поступает от различных источников). В цепи анода кроме токов этих частот появятся переменные токи с частотами, равными сумме и разности частот, действующих переменных напряжений, а также токи других частот. Разностная частота, называемая промежуточной, обычно и выделяется в анодной цепи лампы из всех других частот.

Лампы с двойным управлением используются в супергетеродинных приемниках. Они предназначены для преобразования частоты приходящего сигнала в промежуточную частоту. О преимуществах такого преобразования сказано ниже.

В радиостанциях применяются обычно гептод-смеситель и гептод-преобразователь.

Слово «гептод» означает «семиэлектродная лампа». Иногда гептод называют «пентагридом», что означает «пятисеточная лампа».

На рис. 97, *д* условно изображен гептод-смеситель. Эта лампа представляет собой пентод, в который добавлены еще две сетки — управляющая и экранирующая. Дополнительная экранирующая сетка устраняет емкостную связь между первой и третьей управ-

ляющими сетками. Основная и дополнительная экранирующие сетки внутри лампы соединены между собой, защитная сетка — с катодом.

ПОНЯТИЕ ОБ ИОННЫХ ПРИБОРАХ

Наряду с электронными лампами нашли применение *газоразрядные,* или *ионные, приборы.* Рассмотрим, как они работают.

После откачки воздуха баллон ионного прибора наполняется газом под небольшим давлением (значительно ниже атмосферного). В качестве такого газа обычно используются пары ртути, водород или инертный газ (неон, аргон). Первоначально молекулы газа электрически нейтральны. При движении электронов от катода к аноду они сталкиваются с молекулами газа и, если их скорость достаточна, выбивают из последних один или несколько вторичных электронов. Потеряв электроны, молекула газа перестает быть нейтральной. Она становится положительно заряженной молекулой, т. е. ионом. Электроны с большой скоростью движутся к аноду, а ионы сравнительно медленно движутся к катоду, так как масса иона больше массы электрона.

Электроны, получившиеся в результате расщепления молекулы газа, при своем движении к аноду сами принимают участие в дальнейшем процессе ионизации. Процесс ионизации нарастает лавинообразно, и в приборе быстро устанавливается большой электронно-ионный ток.

Процесс ионизации наступает при определенном напряжении, называемом *напряжением зажигания.* Это напряжение зависит от вида газа, его давления в баллоне и расстояния между электродами.

Одновременно с процессом ионизации происходит процесс восстановления ионов в нейтральные молекулы. При этом газ светится, так как восстановление молекул сопровождается выделением энергии в виде света (выделяется энергия, которая была затрачена при расщеплении). Ртутные пары дают синеватое свечение, неон — красное, аргон — сиреневое.

В ионных приборах источником первичных электронов является катод. Применяются нагретые и холодные катоды. Использование нагретого катода как источника получения первичных электронов понятно: нагретая нить выделяет электроны. Использование холодных катодов основано на том, что при определенной (сравнительно большой) разности потенциалов между анодом и катодом с поверхности катода вырывается некоторое количество электронов, которых достаточно для начала ионизации.

Наиболее часто встречаются следующие ионные приборы: газотроны, применяемые для выпрямления переменного тока; тиратроны, применяемые в различных схемах автоматического управления и регулирования и, кроме того, для выпрямления переменного тока; ртутные колбы; газосветные лампы; газонаполненные стабилизаторы напряжения (стабилитроны).

Газотроны и тиратроны относятся к приборам с нагретыми катодами, газосветные лампы и стабилитроны — к приборам с холодными катодами.

Неоновые газосветные лампы применяются в качестве индикаторов (указателей) напряжения высокой частоты в контурах радиопередатчика или антенне. На рис. 98 приведено условное изображение неоновой лампы.

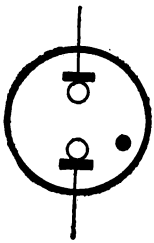


Рис. 98. Условное изображение неоновой лампы

При напряжении между электродами, равном или большем напряжения зажигания, возникает ионизация газа (лампа начинает светиться) и через лампу проходит ток. Свечение лампы усиливается по мере повышения напряжения, поэтому ее можно использовать в качестве индикатора настройки контура в резонанс.

При некотором напряжении, несколько меньшем, чем напряжение зажигания, лампа гаснет. Процесс ионизации лавинообразно прекращается, происходит восстановление ионов в нейтральные молекулы газа.

Величина тока в неоновых лампах изменяется от долей миллиампера (в момент зажигания) до десятков миллиампер (при более высоком напряжении). Чтобы избежать порчи лампы, ее необходимо включать в цепь через сопротивление, предназначенное для ограничения проходящего тока. Часто это сопротивление монтируется в цоколе лампы при ее изготовлении.

Газонаполненные стабилизаторы напряжения (стабилитроны) стабилизируют напряжение (поддерживают напряжение постоянным) на зажимах источника тока, а следовательно, и на нагрузке.

Простейший стабилитрон имеет два электрода — анод и катод, более сложные — несколько электродов. Электроды помещаются в стеклянном баллоне, наполненном неоном или аргоном.

Работа стабилитрона основана на использовании явления тлеющего разряда. Если при тлеющем разряде через прибор проходит ток, не превышающий определенной величины, то напряжение между электродами остается постоянным при изменении величины тока в некоторых пределах.

На рис. 99 приведена схема включения двухэлектродного стабилитрона. В данном случае нагрузка R подключена параллельно стабилитрону. Между источником тока и стабилитроном включен балансный резистор r, величина которого подбирается такой, чтобы при среднем напряжении генератора через стабилитрон проходил ток определенной величины (в зависимости от типа стабилитрона).

Допустим, что напряжение на зажимах источника тока увеличилось, тогда увеличится и ток, проходящий через стабилитрон. Увеличение тока в известных пределах не вызовет изменения напряжения на стабилитроне, следовательно, все увеличенное напряжение источника тока окажется приложенным к резистору r. Итак,

увеличение напряжения источника тока приведет к увеличению падения напряжения на балансном сопротивлении резистора r, а напряжение на нагрузке (на стабилитроне) останется постоянным. При уменьшении напряжения на источнике тока уменьшится падение напряжения на резисторе r, а напряжение на нагрузке опять останется постоянным.

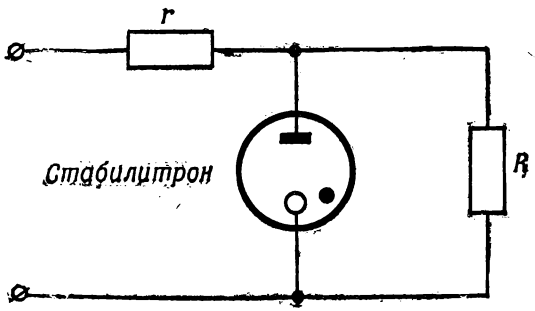


Рис. 99. Схема включения двухэлектродного стабилитрона

Если напряжение источника тока постоянно, а изменяется величина нагрузки (сопротивление резистора R), то при наличии стабилитрона напряжение на нагрузке и в этом случае не будет изменяться.

Допустим, что сопротивление резистора R увеличится, тогда ток, проходящий через резисторы R и r, уменьшится; это вызовет уменьшение падения напряжения на резисторе r и увеличение напряжения на стабилитроне. Через стабилитрон потечет большой ток, а это приведет к увеличению падения напряжения на резисторе r и к уменьшению напряжения на стабилитроне до прежней величины.

Для стабилизации тока накала применяются безразрядные электровакуумные приборы, называемые бареторами. Баретор состоит из железной проволоки, помещенной внутри стеклянного баллона, наполненного водородом. Включается баретор последовательно с нитью накала. При повышении напряжения накала температура проволоки возрастает, ее сопротивление увеличивается и величина тока в цепи остается постоянной.

Тиратрон

Трехэлектродный (или четырехэлектродный) управляемый газоразрядный прибор называется *тиратроном*. Управляющий электрод (сетка) дает возможность управлять моментом возникновения разряда. Имеется два типа тиратронов: тиратрон дугового разряда и тиратрон тлеющего разряда.

Тиратрон дугового разряда имеет накаливаемый катод. Электрическое поле анода попадает на катод только через сетку, в про-

тивном случае она потеряла бы возможность управлять моментом зажигания тиратрона.

Как только тиратрон заработает, сетка теряет свое управляющее свойство, так как происходит нейтрализация отрицательного заряда сетки положительными ионами, осевшими на ней. Поскольку источник сеточного напряжения включен, то на сетку поступают отрицательные заряды, которые все время нейтрализуются положительными ионами. Потенциал сетки все время практически равен нулю, но в цепи сетки протекает сеточный ток.

Сеточный ток тиратрона, возникающий при отрицательном напряжении на сетке, является ионным.

Зажечь тиратрон, т. е. вызвать ионизацию, можно увеличением положительного напряжения на аноде или уменьшением отрицательного напряжения на сетке.

В тиратроне тлеющего разряда катод не накаливается. При зажигании тиратрона сетка также теряет свое управляющее действие.

ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫЕ ТРУБКИ

Электронно-лучевая трубка является разновидностью электровакуумного прибора. Узкий поток электронов, двигаясь с большой скоростью, при ударе о флуоресцирующий экран, вызывает его свечение. Так как масса электронов ничтожна, электронный луч под воздействием электрического или магнитного поля может почти мгновенно изменять направление своего движения.

Основное применение электронно-лучевые трубки имеют:

— в телевидении для получения изображений на экране трубки;

— в электронных осциллографах для визуального наблюдения электрических процессов, происходящих в различных электрических цепях;

— в радиолокации для определения координат цели.

По способу управления электронным лучом электронно-лучевые трубки делятся на трубки с электростатическим управлением и трубки с магнитным управлением.

Трубки с электростатическим управлением

В электронно-лучевых трубках с электростатическим управлением фокусировка электронного луча и его отклонение осуществляются с помощью электрических полей. Устройство такой трубки и схема ее питания показаны на рис. 100.

Электронно-лучевая трубка состоит из трех основных частей:

— электронной пушки (ЭП), создающей узкий электронный луч, направленный вдоль оси трубки;

— отклоняющей системы (ОС), позволяющей отклонять электронный луч от оси трубки;

— флуоресцирующего экрана (Э), обладающего способностью светиться при бомбардировке его электронами луча.

Простейшая электронная пушка состоит из катода, управляющего электрода (УЭ), первого (A_1) и второго (A_2) анодов.

Катод создает поток электронов. При наличии высокого положительного напряжения на анодах электроны, излучаемые катодом, летят с большой скоростью в направлении к экрану.

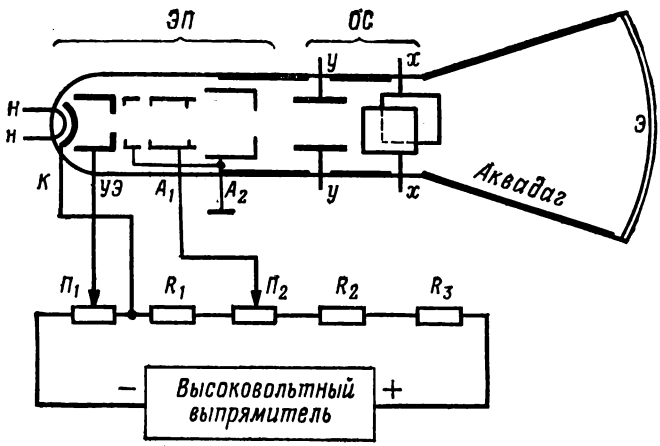


Рис. 100. Устройство электронно-лучевой трубки с электростатическим управлением и схема ее питания

Управляющий электрод предназначен для регулировки яркости светящегося пятна на экране. Регулировка яркости производится изменением величины отрицательного напряжения на управляющем электроде с помощью потенциометра $П_1$. Фокусировка электронного луча производится изменением напряжения на первом аноде с помощью потенциометра $П_2$.

Влияние управляющего электрода и первого анода на ток луча аналогично влиянию управляющей сетки и анода на анодный ток в электронных лампах.

Под действием напряжений на электродах электронной пушки электроны луча с большой скоростью летят вдоль оси трубки, вызывая свечение в центре экрана. Для перемещения светящегося пятна по экрану трубки между вторым анодом и экраном имеется отклоняющая система, состоящая из двух взаимно перпендикулярных пар пластин *xx* и *yy*. Пластины *xx* отклоняют электронный луч в горизонтальной плоскости, а пластины *yy* — в вертикальной.

При подаче напряжения на пластины *xx* луч будет отклоняться в горизонтальной плоскости в сторону положительно заряженной пластины. Если на пластины подавать периодически изменяющееся напряжение, то на экране образуется светящаяся горизонтальная линия. Если одновременно подавать напряжение на обе пары пластин, то на экране образуется определенная фигура.

Экран трубки предназначен для получения на его поверхности изображений. Он покрывается специальным веществом, обладающим способностью флуоресцировать, т. е. светиться при бомбардировке его электронами. Чем больше скорость электронов и плотность потока луча, тем ярче будет светиться экран трубки.

Электроны луча, падая с большой скоростью на экран, выбивают с его поверхности вторичные электроны. Чтобы вторичные электроны не создавали вблизи экрана пространственного заряда, они улавливаются специальным графитовым слоем, нанесенным на внутреннюю поверхность конической части баллона и горловину трубки. Этот слой называется *аквадагом.*

Кроме того, аквадаг выполняет роль электростатического экрана, предохраняя электронный поток трубки от воздействия внешних электрических полей, так как он внутри баллона соединен с корпусом.

Трубка с магнитным управлением

В трубках с магнитным управлением устройство и назначение катода, управляющего электрода и экрана такие же, как и трубок с электростатическим управлением.

Основное отличие трубок с магнитным управлением от трубок с электростатическим управлением заключается в методах фокусировки и отклонения электронного луча.

Фокусировка электронного луча осуществляется магнитным полем, создаваемым специальной фокусирующей катушкой. Чаще всего фокусирующая катушка наматывается на стальное кольцо специальной формы, надеваемое на горловину трубки. Питается фокусирующая катушка постоянным током. Внутри трубки она создает неоднородное магнитное поле. Под действием этого поля траектории электронов отклоняются к оси трубки, в результате чего электроны собираются в одну точку (фокус). Изменением тока в фокусирующей катушке можно перемещать фокус вдоль оси трубки, добиваясь его совмещения с поверхностью экрана.

Отклоняющая система трубки с магнитным управлением состоит или из одной вращающейся, или из двух взаимно перпендикулярных пар неподвижных катушек, расположенных на горловине трубки. Отклонение луча производится однородным магнитным полем, создаваемым током, протекающим по этим катушкам.

Величина отклонения луча зависит от напряженности магнитного поля, т. е. от величины тока в катушках. Чем больше ток, тем больше напряженность магнитного поля и тем больше отклонение луча.

Глава 8

ВЫПРЯМИТЕЛИ

В радиотехнике широко используются выпрямители для питания цепей ламп передатчиков, приемников, а также для зарядки аккумуляторов.

Выпрямителем называется устройство, предназначенное для преобразования переменного тока в постоянный. В качестве выпрямителей применяются двухэлектродные лампы — кенотроны.

КЕНОТРОННЫЙ ВЫПРЯМИТЕЛЬ

На рис. 101, *а* приведена принципиальная схема кенотронного выпрямителя. Источник переменного тока *Г*, кенотрон *Л* и сопротивление нагрузки резистор *R* включены последовательно.

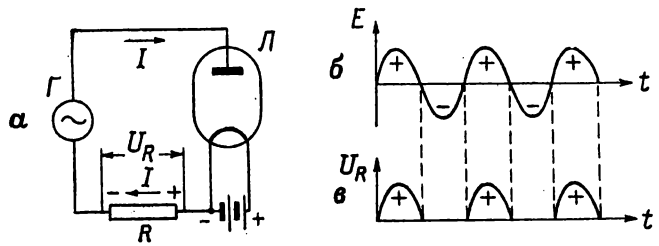


Рис. 101. Принцип действия кенотронного выпрямителя:
а — принципиальная схема кенотронного выпрямителя; *б* — график изменения напряжения источника тока; *в* — график изменения напряжения на сопротивлении

Напряжение источника тока меняется по величине и направлению (рис. 101, *б*), следовательно, также будет меняться напряжение между анодом и катодом лампы.

При положительных полупериодах напряжения на аноде кенотрона в его цепи проходит анодный ток, который создает падение напряжения U_R на резисторе *R* (рис. 101, *в*). При отрицательных полупериодах напряжения на аноде ток в цепи отсутствует и никакого падения напряжения на резисторе *R* не происходит.

Таким образом, при наличии кенотрона в цепи источника переменного тока появляется пульсирующий ток.

ОДНОПОЛУПЕРИОДНЫЙ ВЫПРЯМИТЕЛЬ

На рис. 102, *а* приведена принципиальная схема однополупериодного выпрямителя. Однополупериодным он называется потому, что полезно используются только полупериоды переменного тока одного направления.

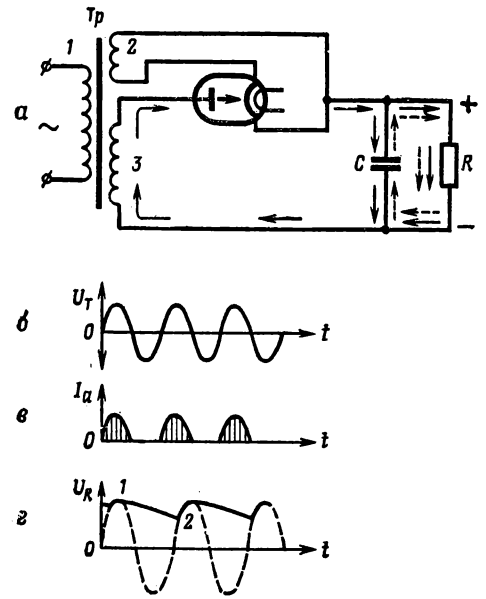


Рис. 102. Схема однополупериодного выпрямителя и графики, иллюстрирующие физические процессы в его цепях:

а — схема однополупериодного выпрямителя; *б* — изменение напряжения на вторичной обмотке трансформатора; *в* — ток в анодной цепи кенотрона; *г* — напряжение на нагрузке

Обычно ламповый выпрямитель состоит из кенотрона, трансформатора и фильтра. Кенотрон имеет одностороннюю проводимость, благодаря чему и выполняет свою основную задачу — преобразование переменного тока в ток одного направления.

Трансформатор *Тр* состоит из одной первичной обмотки и двух вторичных. К первичной обмотке *1* подводится переменное напряжение, подлежащее выпрямлению. Вторичная обмотка *2* (понижающая) служит для питания цепи накала кенотрона. Вторичная обмотка *3* в зависимости от назначения выпрямителя может быть повышающей или понижающей. Через вторичную обмотку питается анодная цепь лампы выпрямителя.

Для сглаживания пульсаций выпрямленного тока применяются фильтры, включаемые между лампой и нагрузкой.

Рассмотрим принцип действия выпрямителя (рис. 102, *а*). Фильтром в этом выпрямителе служит конденсатор *C*. К первичной обмотке *1* трансформатора подводится синусоидальное напряжение. Синусоидальное напряжение будет и на вторичной обмотке *3* трансформатора (рис. 102, *б*). За положительный полупериод напряжения на аноде в анодной цепи лампы появится ток (рис. 102, *в*), который будет проходить через диод, сопротивление нагрузки (резистор *R*) и вторичную обмотку *3* трансформатора. В это же время произойдет и заряд конденсатора *C*.

За отрицательный полупериод напряжения на аноде в анодной цепи тока не будет, но через сопротивление нагрузки (резистор *R*) будет проходить ток разряда конденсатора *C*. Направление тока разряда совпадает с направлением анодного тока. Так как верхняя обкладка конденсатора заряжена положительно (т. е. к катоду

диода приложен плюс), то ток разряда через диод проходить не будет.

За четверть периода конденсатор зарядится до максимальной величины переменного напряжения (точка *1* на рис. 102, *г*). После этого переменное напряжение падает, и в следующий полупериод оно становится отрицательным.

Конденсатор в цепи частично разряжается через сопротивление. Количество заряда, которое конденсатор теряет, зависит от величины сопротивления резистора *R* и емкости конденсатора *C*.

Как только переменное напряжение достигает величины *2* в следующий период, конденсатор принимает дополнительный заряд до максимальной величины, затем вновь частично разряжается и весь процесс повторяется.

Таким образом, через резистор *R* проходит ток одного направления, создающий выпрямленное напряжение на его зажимах.

Следовательно, в выпрямителе с конденсатором наблюдаются периодический заряд и частичный разряд конденсатора *C*, вследствие чего напряжение на конденсаторе колеблется около средней величины *U*. Эта средняя величина представляет постоянное напряжение, вырабатываемое выпрямителем.

Постоянное напряжение, которое создается выпрямителем при наличии конденсатора, выше, чем без него. Конденсатор *C* образует резервуар электронов, и в течение отрицательной полуволны переменного напряжения он поддерживает ток через сопротивление нагрузки *R*. Поэтому конденсатор *C* называется накопительным или буферным конденсатором.

Величина постоянного напряжения зависит также от сопротивления в цепи самого выпрямителя, которое состоит из активного сопротивления трансформатора и внутреннего сопротивления выпрямительной лампы. Чем больше ток берется от источника питания, тем большее напряжение падает на этих сопротивлениях и меньшая величина постоянного напряжения приходится на полезную нагрузку.

Наряду с постоянным напряжением имеется и переменное напряжение с частотой, равной частоте выпрямляемого тока. Это переменное напряжение часто называется пульсирующим напряжением. Оно появляется в результате изменений заряда конденсатора *C* и будет тем больше, чем больше это изменение.

При уменьшении сопротивления резистора *R* возрастет ток (при данном напряжении), увеличится изменение заряда конденсатора, а следовательно, пульсирующее напряжение также увеличится. Пульсирующее напряжение также будет возрастать при уменьшении емкости конденсатора *C*.

Величину пульсирующего напряжения для однополупериодного выпрямителя можно подсчитать по следующему приближенному соотношению:

$$\text{Пульсирующее напряжение} = 4{,}5\,\frac{\text{отбираемый ток в мА}}{\text{емкость буферного конденсатора в мкФ}}.$$

Для тока 60 мА и емкости буферного конденсатора 50 мкФ пульсирующее напряжение составит

$$4{,}5\,\frac{60}{50} = 5{,}4 \text{ В (действующее значение).}$$

ДВУХПОЛУПЕРИОДНЫЙ ВЫПРЯМИТЕЛЬ

На рис. 103 приведена схема двухполупериодного выпрямителя. Если в однополупериодном выпрямителе полезно используется только один полупериод переменного тока, то здесь

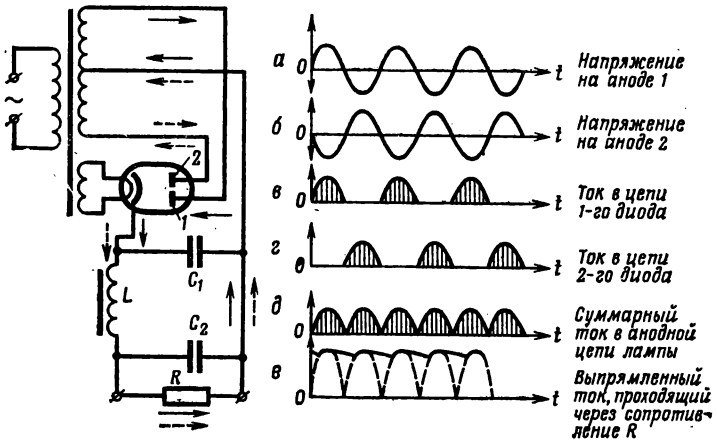


Рис. 103. Схема двухполупериодного выпрямителя и графики, иллюстрирующие физические процессы в его цепях

используются оба полупериода, так как на одну и ту же нагрузку поочередно работают два кенотрона. Это одно из преимуществ двухполупериодного выпрямителя перед однополупериодным.

На практике вместо двух отдельных кенотронов обычно используется двуханодный кенотрон, представляющий собой два кенотрона, заключенные в одном общем баллоне.

Вторичная повышающая обмотка трансформатора имеет вывод от средней точки. Между средней точкой повышающей обмотки трансформатора и катодом лампы подключается нагрузка — резистор *R*. По отношению к средней точке потенциалы крайних точек обмотки поочередно меняются.

Предположим, что в первую половину периода верхний конец обмотки (по схеме) имеет положительный потенциал, а нижний — отрицательный. В анодной цепи диода *1* появится ток, показанный сплошными стрелками. Во вторую половину периода будет работать диод *2*, ток которого показан пунктирными стрелками.

На рис. 103, *а*, *б*, *в* и *г* изображены кривые напряжения на анодах *1* и *2* и токи в анодных цепях. Через сопротивление на-

грузки R токи первого и второго диодов поочередно проходят в одном и том же направлении, создавая суммарный пульсирующий ток (рис. 103, *д*). Такой выпрямленный ток получается при отсутствии сглаживающего фильтра.

Если такое напряжение подать непосредственно на усилительные лампы, то в громкоговорителе будет прослушиваться фон переменного тока, вызванный пульсирующим напряжением.

Фильтр для сглаживания пульсаций выпрямленного тока состоит из конденсаторов C_1 и C_2 и дросселя L. Как и в однополупериодном выпрямителе, конденсаторы поддерживают постоянное значение тока, проходящего через нагрузку. В первую четверть периода они заряжаются, во вторую четверть — разряжаются через нагрузку и т. д. Дроссель L предназначен для лучшего сглаживания пульсаций тока. При возрастании и убывании тока, проходящего через него, возникает э. д. с. самоиндукции, препятствующая в первом случае возрастанию, а во втором случае убыванию выпрямленного тока.

Работу фильтра можно объяснить и по-другому. Пульсирующий ток можно рассматривать как ток, состоящий из двух слагающих: постоянной (постоянного тока) и переменной (переменного тока). В задачу фильтра и входит отделить эти два тока один от другого: постоянный ток пропустить через нагрузку, переменному току преградить путь через нее. Дроссель не пропускает к нагрузке переменную слагающую анодного тока, она свободно проходит через конденсаторы, минуя нагрузку.

Добиться идеального сглаживания выпрямленного тока нельзя. Оно получилось бы, если бы сопротивление дросселя для переменной составляющей было бесконечно велико или сопротивление конденсатора для этой составляющей бесконечно мало. Добиться практически того или другого невозможно. Вследствие большого сопротивления дросселя и малого сопротивления конденсатора через нагрузку проходит переменная составляющая небольшой величины, не вызывая заметного фона переменного тока. Чтобы фон переменного тока не мешал приему, достаточно ослабить переменную составляющую в 50—70 раз. Это практически осуществить легко.

Один и тот же сглаживающий фильтр тем лучше выполняет свою задачу, чем выше частота переменной составляющей выпрямленного тока. Она зависит не только от частоты выпрямляемого переменного тока, но и от схемы выпрямителя. В схемах двухполупериодного выпрямления частота переменной составляющей в два раза больше, чем в схемах однополупериодного выпрямления. В этом состоит другое преимущество двухполупериодного выпрямителя перед однополупериодным.

На рис. 103, *е* приведен график изменения выпрямленного тока, проходящего через нагрузку R.

Иногда вместо дросселя применяют активное сопротивление, но такие фильтры имеют тот недостаток, что под нагрузкой на сопротивлениях происходит падение напряжения постоянной составляю-

щей выпрямленного тока. Следовательно, на нагрузке понижается постоянное напряжение, т. е. увеличиваются потери напряжения в выпрямителе.

Этого недостатка у дроссельных фильтров нет. Дроссель имеет большое индуктивное сопротивление, поэтому он почти полностью не пропускает переменную составляющую выпрямленного тока. Для постоянной составляющей дроссель имеет относительно небольшое сопротивление, а следовательно, на нем получается небольшое падение напряжения.

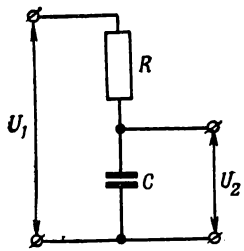


Рис. 104. Цепь сглаживающего фильтра, содержащая сопротивление и конденсатор

Для подсчета пульсирующего напряжения в двухполупериодном выпрямителе при наличии одного буферного конденсатора используется следующее соотношение:

$$\text{Пульсирующее напряжение} = 1{,}7\,\frac{\text{отбираемый ток в мА}}{\text{емкость буферного конденсатора в мкФ}}.$$

Если подставить данные, приведенные выше при подсчете пульсирующего напряжения для однополупериодного выпрямителя, то получим пульсирующее напряжение, равное примерно 2 В. Таким образом, пульсирующее напряжение в двухполупериодном выпрямителе значительно ниже, чем в однополупериодном.

В радиоприемниках наиболее широкое распространение получили фильтры, состоящие из сопротивления и конденсатора (рис. 104). Величина сопротивления резистора R должна быть как можно больше по сравнению с сопротивлением конденсатора C. Отношение напряжений $U_2 : U_1$ мы можем заменить отношением сопротивлений $X_C : R$.

Подсчитаем, какую часть напряжения U_1 составит напряжение U_2 при $R = 1200$ Ом и $C = 50$ мкФ. Для однополупериодного выпрямителя $f = 50$ Гц. Реактивное сопротивление $X_C = 64$ Ом. Таким образом, уменьшение напряжения составит

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{X_C}{R} = \frac{64}{1200} \approx \frac{1}{20}.$$

При двухполупериодном выпрямлении частота пульсаций в два раза больше по сравнению с частотой сети, поэтому реактивное сопротивление будет в два раза меньше, т. е. составит 32 Ом. Напряжение на выходе уменьшится в 40 раз.

Чем больше R, тем лучше сглаживается пульсирующее напряжение. Однако при этом мы сталкиваемся с другой трудностью: происходит бо́льшее падение напряжения от постоянного тока. Для тока в 60 мА это падение напряжения составит $0{,}06 \cdot 1200 = 72$ В.

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ

Кроме кенотронных выпрямителей в современной технике широко применяются так называемые твердые или полупроводниковые выпрямители, из которых наиболее распространены меднозакисные (купроксные), селеновые, кремниевые и германиевые.

Выпрямляющее действие твердых выпрямителей основано на односторонней проводимости контакта между проводником и полупроводником.

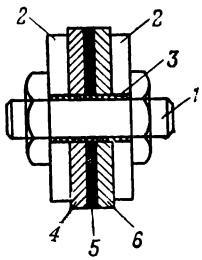


Рис. 105. Схематический разрез элемента меднозакисного выпрямителя:

1 — стягивающий болт; *2* — изолирующие прокладки; *3* — изолирующая втулка; *4* — медный диск; *5* — слой закиси меди; *6* — свинцовый диск

На рис. 105 схематически изображен в разрезе элемент меднозакисного выпрямителя. Проводником в этом элементе служит медный диск *4*, полупроводником — слой закиси меди *5*, получаемый на поверхности медного диска при особой технологической обработке. Между медью и закисью меди образуется очень тонкий слой, обладающий свойствами диэлектрика и называемый запирающим слоем. На медный диск со стороны закиси меди для осуществления контакта накладывается свинцовый диск *6*, который является анодом. Катодом служит медный диск.

Если к аноду приложить положительный, а к катоду отрицательный потенциал источника тока, то разность этих потенциалов окажется приложенной к диэлектрику (запирающему слою). Так как толщина диэлектрика ничтожная (10^{-4}—10^{-5} мм), то в нем возникнет очень сильное электрическое поле, которое будет вырывать большое число свободных электронов с поверхности проводника, т. е. с медного диска. В цепи возникнет электрический ток.

Если положительный потенциал приложить к катоду, а отрицательный — к аноду, ток в цепи исчезнет. В этом случае электрическое поле будет стремиться вырвать электроны из полупроводника, т. е. из закиси меди. Так как в полупроводнике имеется ничтожное число свободных электронов, то в цепи может возникнуть лишь ничтожный ток, который практического значения не имеет.

Аналогичным образом устроен и селеновый выпрямитель. В нем применяется железная никелированная шайба, на одну сторону которой нанесен слой селена. На наружной стороне селенового слоя особым способом образуют запирающий слой, на который наносят слой из специального сплава. Слой из специального сплава (олово, кадмий, висмут) является катодом, к которому прижимается контактная латунная шайба. Анодом служит железная шайба с нанесенным слоем селена.

Выпрямляющее действие меднозакисного выпрямителя основано на односторонней проводимости контакта между слоем заки-

си меди и медью, а селенового выпрямителя — между слоем селена (химический элемент) и специальным сплавом.

На рис. 106 приведено условное изображение твердого выпрямителя.

Размеры пластин зависят от величины выпрямляемого тока: чем больше ток, тем больше должна быть площадь пластин.

Рис. 106. Условное изображение твердого выпрямителя

Наибольшее напряжение, которое можно подавать на один элемент, зависит от электрической прочности полупроводникового слоя (закиси меди или селена). Для меднозакисных выпрямителей это напряжение около 10 В, для селеновых — около 18 В.

Селеновые выпрямители надежнее, чем меднозакисные; при одной и той же мощности они имеют меньший вес. Этим объясняется их большое распространение.

По сроку службы меднозакисные и селеновые выпрямители во много раз превосходят ламповые, в работе очень устойчивы.

К недостаткам твердых выпрямителей относится большое внутреннее сопротивление, вследствие чего получаются большие потери при работе.

Отдельные элементы твердых выпрямителей могут собираться в схеме последовательно или параллельно, а это позволяет собрать выпрямитель на нужные ток и напряжение.

Глава 9

РАДИОПЕРЕДАЮЩИЕ УСТРОЙСТВА

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Радиопередатчиком называется устройство, предназначенное для создания электрических колебаний высокой частоты и излучения в пространство энергии этих колебаний в виде электромагнитных волн.

В состав передающего устройства обычно входят:

— генератор высокочастотных колебаний;

— усилитель мощности;

— устройство для управления генерируемыми колебаниями;

— антенное устройство;

— источники питания.

В качестве генераторов высокочастотных колебаний используются ламповые и транзисторные генераторы, а в радиоаппаратуре сверхвысоких частот — генераторы со специальными электронными приборами (магнетронами, клистронами, лампами бегущей волны и др.).

Ламповый генератор преобразовывает электрическую энергию постоянного тока в электрическую энергию переменного тока.

Слово «генератор» происходит от латинского слова «генераре», что означает «производить», «возбуждать».

Ламповые генераторы:

— генерируют незатухающие колебания от самых низких до самых высоких частот (от единиц до сотен миллионов герц);

— создают колебания различных мощностей (от долей ватта до сотен киловатт);

— допускают любой вид передачи (телеграфную, телефонную, телевизионную и др.);

— позволяют легко переходить при работе с одной волны на другую;

— устойчивы в работе и просты в эксплуатации.

Ламповые генераторы подразделяются на *генераторы с самовозбуждением* и *генераторы с независимым* (посторонним) *возбуждением.*

На рис. 107 приведена структурная схема двухкаскадного передатчика. Первым каскадом служит задающий генератор, являю-

щийся генератором с самовозбуждением. Задающим он называется потому, что в нем вырабатываются непрерывные колебания требуемой высокой частоты, которые как бы задаются последующему каскаду передатчика.

Вторым каскадом является усилитель мощности, усиливающий мощность колебаний, вырабатываемых первым каскадом.

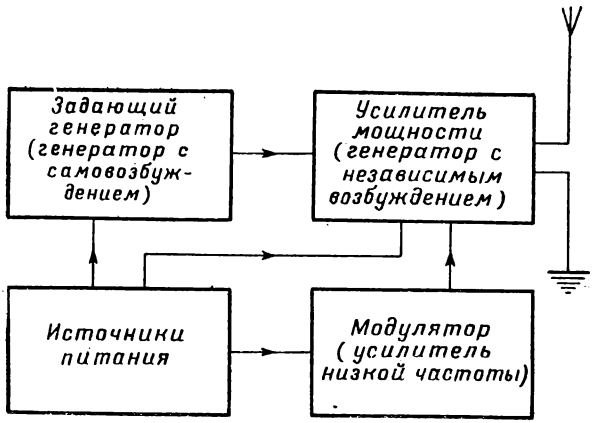


Рис. 107. Структурная схема двухкаскадного передатчика

Для управления генерируемыми колебаниями при телефонной работе применяется модулятор — усилитель колебаний более низких частот, например звуковых, получаемых от микрофона.

Антенное устройство служит для излучения электромагнитной энергии в пространство.

Источники питания обеспечивают энергией постоянного тока анодные цепи и цепи накала ламп радиопередатчика.

Постоянство (стабильность) частоты колебаний радиопередатчика в большой степени зависит от задающего генератора. Задающий генератор может обеспечить достаточно высокую стабильность генерируемой частоты только при небольшой отдаваемой мощности. Поэтому для получения нужной мощности применяют каскады усиления.

Кроме того, для повышения стабильности частоты задающий генератор проектируют иногда на более низкие частоты, чем те, на которых работает передатчик. В этом случае вводят дополнительный каскад для умножения частоты.

ЛАМПОВЫЙ ГЕНЕРАТОР

Рассмотрим получение незатухающих колебаний высокой частоты в колебательном контуре с помощью электронной лампы, т. е. рассмотрим работу *лампового генератора*.

В состав лампового генератора (рис. 108) входят:

— электронная лампа *Л*;

— колебательный контур, состоящий из катушки индуктивности $L_к$ и конденсатора $C_к$;

— катушка обратной связи $L_{св}$ (или конденсатор);

— источники питания $Б_а$ и $Б_н$.

При включении анодного напряжения (напряжение накала уже включено) в цепи анода возникает ток, который начинает заряжать конденсатор колебательного контура $C_к$ через лампу. Нижняя обкладка конденсатора будет заряжаться положительно, а верхняя отрицательно.

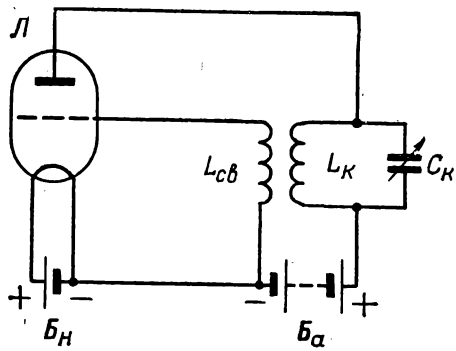


Рис. 108. Схема лампового генератора с самовозбуждением

Далее конденсатор начнет разряжаться через катушку $L_к$. В контуре возникнут свободные колебания, которые при отсутствии катушки $L_{св}$ очень быстро затухают. Для поддержания этих колебаний необходимо восполнять потери энергии, происходящие при каждом колебании.

Чтобы в контуре установились незатухающие колебания, пополнение энергии должно происходить каждый период. Эту задачу и выполняет электронная лампа при наличии электрической связи между колебательным контуром и управляющей сеткой. Указанная связь осуществляется через катушку $L_{св}$, поэтому она и называется *катушкой обратной связи.*

Ток разряда конденсатора, проходя через катушку индуктивности $L_к$, создает переменное магнитное поле, которое наводит в катушке $L_{св}$ э. д. с. взаимоиндукции той же частоты, что и частота свободных колебаний в контуре. Между сеткой и катодом возникает переменное напряжение, которое вызовет изменение анодного тока. В анодной цепи появится пульсирующий анодный ток, частота пульсаций которого будет равна частоте колебаний в контуре. Импульсы анодного тока поддерживают колебания в контуре незатухающими.

Незатухающие колебания в контуре возникнут в том случае, если импульсы анодного тока в катушке совпадут с направлением разрядного тока конденсатора и тем самым будут компенсировать потери в цепи. Если ток анодных импульсов в катушке будет направлен навстречу разрядному току конденсатора, незатухающие колебания не возникнут.

Таким образом, возникшие в контуре колебания действуют на сетку лампы, а лампа в свою очередь — на контур, пополняя его энергией от анодной батареи. За каждый период колебаний по-

тери в контуре компенсируются, и в нем устанавливаются незатухающие колебания.

Энергия источника анодного напряжения поступает в контур небольшими порциями в течение какой-то части каждого периода колебаний.

Электронная лампа служит как бы малоинерционным переключателем, который управляет цепью обратной связи, и каждый период подает в колебательный контур порции энергии от источника питания.

Колебания переменного тока в цепи анода лампы получаются за счет энергии источника постоянного тока. Поэтому ламповый генератор рассматривают как преобразователь энергии постоянного тока в энергию переменного тока.

Обратной связью называется электрическая связь между анодной и сеточной цепями лампы. При наличии такой связи колебания, подведенные к сетке лампы, усиливаются ею, выделяются на колебательном контуре, включенном в анодную цепь, и с помощью элемента обратной связи вновь поступают на управляющую сетку лампы.

Частота колебаний в контуре зависит от индуктивности катушки и емкости конденсатора. Обычно частота колебаний в контуре изменяется с помощью конденсатора переменной емкости.

Условия получения незатухающих колебаний в ламповом генераторе, или, как говорят, *условия самовозбуждения,* следующие.

1. Частота переменного напряжения на сетке должна равняться частоте собственных колебаний контура, или, как принято говорить, частоте, на которую настроен контур.

Выполнение этого условия в разобранной выше схеме генератора (рис. 108) обеспечивается катушкой обратной связи $L_{св}$. С этой катушки на сетку снимается напряжение, частота которого равна частоте колебаний в контуре.

2. Подводимое к сетке напряжение должно вызывать изменения анодного тока в такт с колебаниями в контуре. Это достигается правильным включением катушки $L_{св}$. При неправильном включении концов катушки $L_{св}$ колебания в контуре не возникнут.

3. Величина переменного напряжения в цепи сетки должна быть достаточно большой, чтобы вызванные ею импульсы анодного тока компенсировали потери колебательной энергии в контуре. Это условие выполняется при правильном выборе числа витков катушки обратной связи и правильном ее расположении по отношению к катушке контура.

Эти условия получения незатухающих колебаний в контуре формально совпадают с условиями поддержания колебаний маятника. Чтобы колебания маятника не затухали, необходимо:

— подталкивать его с частотой собственных колебаний;

— подталкивать в те моменты, когда направления толчка и движения маятника совпадают;

— подталкивать его с такой силой, чтобы энергия, которая сообщается ему, покрывала потери за один период.

Итак, мы получили переменный ток высокой частоты (высокочастотные колебания) с помощью лампового генератора. Теперь достаточно подвести этот переменный ток к антенне, чтобы получить радиоволну в пространстве.

Как отмечалось выше, задающий генератор работает в таких условиях, при которых отдаваемая им мощность мала. Поэтому приходится колебания задающего генератора усиливать, перед тем как их подводить к антенне.

УСИЛИТЕЛЬ МОЩНОСТИ

Усилитель мощности (рис. 109), по существу, является ламповым генератором с посторонним возбуждением.

При отсутствии напряжения возбуждения U_c в анодной цепи лампы проходит постоянный ток I_0 (рис. 110, *б*), соответствующий нулевому значению напряжения на сетке. Катушка контура для постоянного тока почти не представляет никакого сопротивления. Поэтому все напряжение источника тока приложено между анодом и катодом лампы и вся мощность, отдаваемая источником, бесполезно расходуется на нагрев анода.

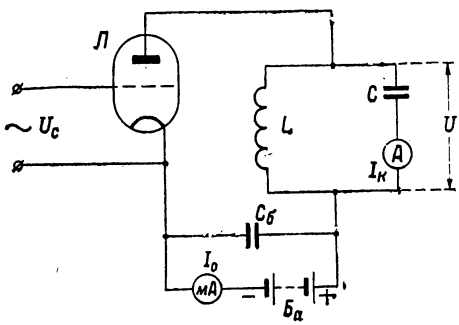


Рис. 109. Схема усилителя мощности

Если к сетке лампы подвести переменное напряжение U_c (рис. 110, *а*) от задающего генератора, то в анодной цепи возникнет пульсирующий ток, изменяющийся в такт с приложенным напряжением.

Таким образом, в анодной цепи появилась *переменная составляющая* анодного тока, частота которой равна частоте переменного напряжения возбуждения U_c. Эта составляющая проходит по следующей цепи: лампа, колебательный контур (обе ветви) и так называемый блокировочный конденсатор $C_б$, предназначенный для того, чтобы переменная составляющая анодного тока не создавала бесполезного падения напряжения на внутреннем сопротивлении источника тока.

Колебательный контур для переменной составляющей (для переменного тока) представляет определенное сопротивление, поэтому на контуре возникает переменное напряжение U. Это напряжение вызывает появление в контуре вынужденных колебаний. Чтобы получить наибольшее переменное напряжение U на контуре и тем самым получить возможно большие колебания, сопротивление его должно быть наибольшим. Это произойдет в момент резонанса между подводимыми колебаниями (колебаниями задающего генератора) и собственными колебаниями контура. Здесь мы

имеем дело с резонансом тока. Момент наступления резонанса определяется по наибольшему току в контуре.

На рис. 110, *в* показано изменение напряжения на аноде лампы. Если анодный ток возрастает, то возрастает и напряжение на контуре, следовательно, напряжение на аноде уменьшается. Наоборот, при уменьшении анодного тока уменьшается напряжение на контуре, а напряжение на аноде увеличивается. Между переменным напряжением на аноде и сетке имеется сдвиг по фазе на 180° (на полпериода).

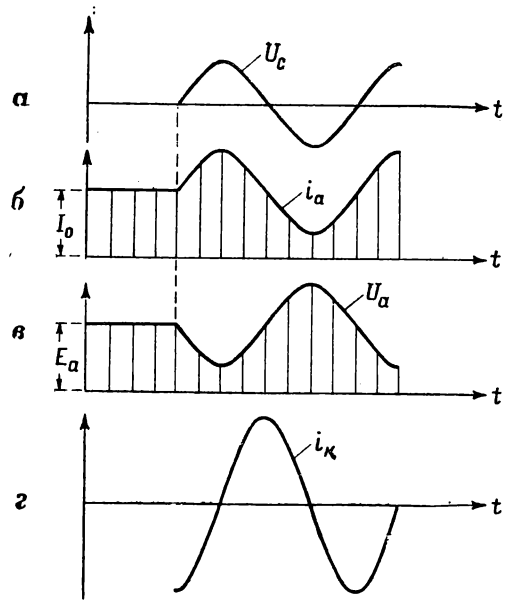


Рис. 110. Графическое изображение процессов, происходящих в цепях усилителя мощности

На рис. 110, *г* изображена кривая, характеризующая колебательный ток в контуре. Этот ток в несколько раз превышает величину переменной составляющей анодного тока и сдвинут по фазе по отношению к нему приблизительно на четверть периода (90°).

Колебания в анодном контуре усилителя получаются значительно большей мощности, чем в цепи сетки, т. е. достигается усиление мощности колебаний.

В зависимости от назначения передатчика можно применить несколько ступеней (каскадов) усиления. Число ламп с колебательными контурами определяет число каскадов.

В усилителях мощности обычно применяют пентоды или тетроды, имеющие малую емкость между анодом и управляющей сеткой. При этом связь между анодной и сеточной цепями лампы усилителя, а следовательно, и связь между контуром усилителя и контуром задающего генератора уменьшается. В результате этого стабильность частоты колебаний задающего генератора возрастает, а опасность самовозбуждения усилителя уменьшается. Допускать самовозбуждение в усилителях мощности нельзя, так как возникающие при этом колебания не совпадают по частоте с колебаниями задающего генератора.

Кроме того, пентоды позволяют получить большую мощность усиления по сравнению с триодами при одной и той же мощности задающего генератора.

В тех случаях, когда в усилителях мощности приходится ис-

пользовать триоды, применяют нейтрализацию, которая компенсирует вредное влияние емкости анод — сетка. При этом схема несколько усложняется.

РЕЖИМЫ РАБОТЫ ЛАМПОВОГО ГЕНЕРАТОРА

Работа любого генератора характеризуется его полезной мощностью и коэффициентом полезного действия (к. п. д.). По-

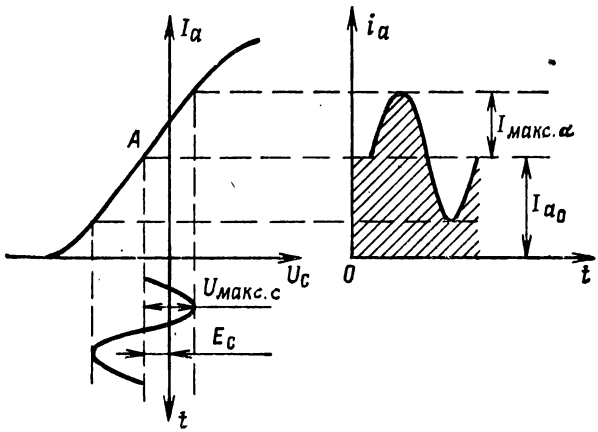


Рис. 111. Графики, характеризующие режим колебаний без отсечки анодного тока

лезная мощность и к. п. д. генератора зависят от режима его работы.

Различают два основных режима работы лампового генератора.

Режим колебаний первого рода. Часто этот режим работы называется режимом колебаний без отсечки анодного тока. Исходная рабочая точка *A* на характеристике лампы находится на середине прямолинейного участка, как показано на рис. 111. Форма колебаний анодного тока совпадает с формой переменного напряжения на сетке, т. е. в анодной цепи лампы протекает пульсирующий ток, величина которого меняется приблизительно синусоидально.

Режим колебаний второго рода. Этот режим работы называется режимом колебаний с отсечкой анодного тока. Под отсечкой следует понимать прекращение анодного тока в течение какой-то части периода колебаний. Режим колебаний второго рода характеризуется тем, что при отсутствии переменного напряжения на сетке лампы (напряжения возбуждения) рабочая точка *A* находится на нижнем изгибе характеристики лампы, как показано на рис. 112. Для этого на управляющую сетку лампы подается большое отрицательное смещение E_{c0}. При колебаниях

с отсечкой в анодной цепи лампы протекает пульсирующий ток в виде отдельных импульсов.

Генератор, работающий в режиме колебаний первого рода, имеет значительную величину постоянной составляющей анодного тока, протекающую в течение всего периода колебания. Таким образом, часть подводимой мощности бесполезно рассеивается в

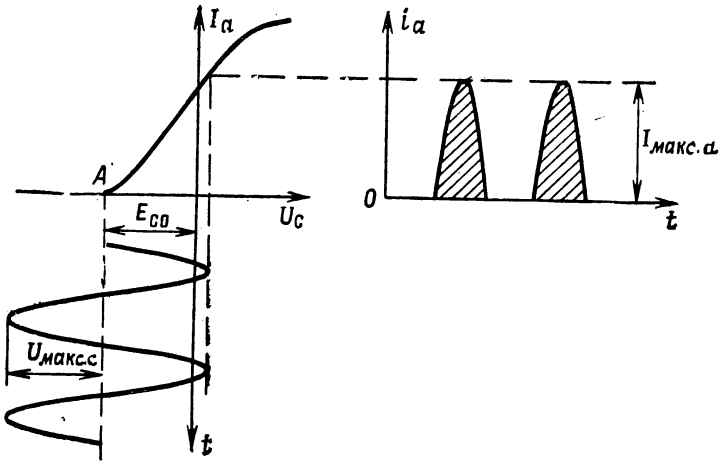


Рис. 112. Графики, характеризующие режим колебаний с отсечкой анодного тока

виде тепла на аноде лампы. Практический к. п. д. таких генераторов не превышает 40—50%.

При работе генератора в режиме колебаний второго рода к. п. д. возрастает до 70—80%. Кроме того, при снятии напряжения возбуждения анодный ток уменьшается почти до нуля, поэтому потери на аноде получаются ничтожными.

Режим работы второго рода устанавливается выбором отрицательного напряжения смещения на сетке лампы.

Способы получения отрицательного смещения

Существует три способа получения отрицательного напряжения смещения на сетке генераторной лампы:

— смещение от отдельного источника напряжения, включаемого между сеткой и катодом лампы;

— автоматическое смещение за счет катодного тока лампы;

— автоматическое смещение за счет сеточного тока.

Первый способ требует специального источника, поэтому он применяется редко, в тех случаях, когда нельзя применить автоматическое смещение,

Второй способ обычно применяется в схемах усилителей. Особенно он удобен при использовании ламп с подогревным катодом.

Наиболее распространен в ламповых генераторах способ автоматического смещения за счет сеточного тока лампы.

УМНОЖЕНИЕ ЧАСТОТЫ

Умножители частоты предназначены для расширения диапазона волн передатчика при одном и том же диапазоне задающего генератора и для повышения стабильности частоты. По

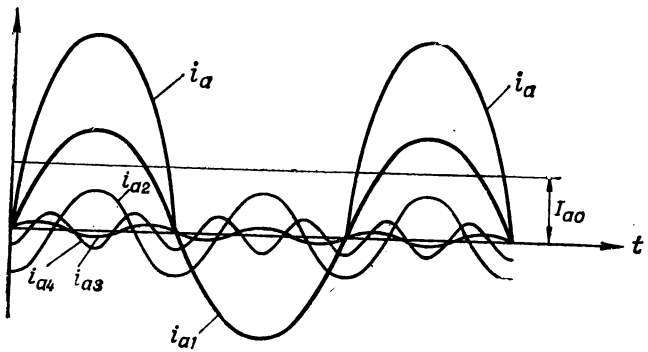


Рис. 113. Разложение импульсов анодного тока на постоянную составляющую и гармоники

своей схеме умножители частоты ничем не отличаются от лампового генератора с независимым возбуждением.

При работе лампового генератора в режиме колебаний второго рода анодный ток проходит в виде отдельных импульсов сложной формы, которые представляют собой сумму нескольких простых синусоидальных колебаний (гармоник), имеющих разную частоту и амплитуду (рис. 113).

Частоты гармоник всегда в целое число раз больше частоты сложного колебания. Если частота сложного колебания равна, например, 300 кГц, то его первая гармоника имеет частоту, также равную 300 кГц, вторая гармоника имеет частоту, вдвое большую (600 кГц), третья — втрое большую (900 кГц) и т. д. Обычно более высокие гармоники имеют меньшие амплитуды. Иногда некоторые гармоники среди составляющих сложного колебания могут отсутствовать.

Рассмотрим, за счет чего получается расширение диапазона волн передатчика. Пусть задающий генератор работает в диапазоне частот 2,5—5 МГц.

Если анодный контур генератора настроен на первую гармонику анодного тока, то этот генератор будет работать как обычный усилитель мощности. В этом случае диапазон передатчика будет соответствовать диапазону задающего генератора.

Если же анодный контур генератора настроен на вторую гармонику анодного тока, то мы получим удвоение частоты подводимых к сетке лампы колебаний. В рассматриваемом случае диапазон частот передатчика будет 5—10 МГц.

Любой усилитель мощности можно превратить в умножитель частоты путем перестройки его колебательного контура в анодной цепи и изменения режима работы генератора.

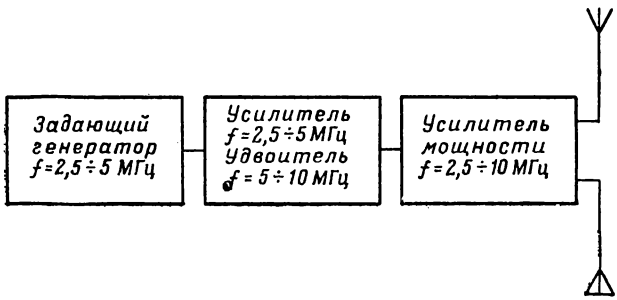


Рис. 114. Структурная схема передатчика с удвоением частоты

Колебания от генератора с самовозбуждением подаются на усилитель. На управляющую сетку лампы подается отрицательное смещение, которое обеспечивает работу усилителя в режиме колебаний второго рода. Контур, включенный в анодную цепь усилителя, настраивается в резонанс на частоту одной из высших гармоник анодного тока, которая и создает на нем наибольшее падение напряжения. Остальные гармоники отфильтровываются, так как для них контур представляет малое сопротивление и создаваемые ими напряжения очень малы. Обычно используется удвоение частоты и реже — утроение.

Изменением длительности и формы анодного импульса можно добиться наибольшей амплитуды первой, второй, третьей и т. д. гармоник. Настройкой контура в резонанс на нужную гармонику осуществляется получение в нем наибольшей колебательной мощности.

На рис. 114 приведена структурная схема передатчика, работающего в диапазоне частот 2,5—10 МГц. Задающий генератор работает в диапазоне частот 2,5—5 МГц. Более широкий диапазон передатчика получается в результате того, что второй каскад в диапазоне 5—10 МГц работает в качестве удвоителя частоты.

Полезная мощность генератора, работающего в качестве умножителя частоты, в несколько раз меньше мощности при работе его в качестве усилителя. Поэтому приходится вводить дополнительный каскад усиления по мощности.

Уменьшение диапазона частот задающего генератора, а также его работа на более низких частотах по сравнению с рабочим диапазоном частот передатчика повышают стабильность работы

задающего генератора. Кроме того, устойчивость частоты передатчика повышается вследствие уменьшения вредной паразитной связи между отдельными каскадами (вредная паразитная связь уменьшается, так как колебательные контуры при умножении частоты настроены на разные частоты).

Умножение частоты наиболее широко применяется в области коротких волн. Здесь особое значение приобретает понижение частоты задающего генератора. Например, обеспечить кварцевую стабилизацию (о чем будет сказано ниже) в диапазоне волн короче нескольких десятков метров без умножения частоты нельзя, так как трудно изготовить кварцевые пластинки, которые выдерживали бы механические колебания, не разрушаясь.

СХЕМЫ ПИТАНИЯ ГЕНЕРАТОРОВ

В зависимости от способа питания анодных цепей различают генераторы с последовательным и параллельным анодным питанием.

При последовательном анодном питании (рис. 115) лампа *Л*, контур $L_к C_к$ и анодная батарея $Б_а$ включены последовательно. Постоянная составляющая анодного тока проходит от плюса батареи через индуктивность контура $L_к$, лампу *Л* к минусу батареи. Таков был бы путь и переменной составляющей анодного тока, если бы не было блокировочного конденсатора $C_б$.

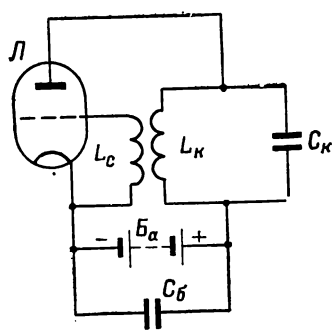


Рис. 115. Схема генератора с последовательным анодным питанием

Конденсатор $C_б$ включается параллельно анодному источнику тока, а его емкость подбирается с таким расчетом, чтобы величина $\frac{1}{\omega C}$ (емкостное сопротивление) была во много раз меньше внутреннего сопротивления батареи. Конденсатор $C_б$ для высокой частоты представляет небольшое сопротивление, следовательно, переменная составляющая анодного тока будет проходить через лампу, контур и блокировочный конденсатор.

Эта схема имеет существенные недостатки. Во-первых, контур относительно корпуса находится под высоким постоянным напряжением анодного источника.

Во-вторых, нельзя заземлять[1] ротор конденсатора контура. Обычно в схемах заземляются катод лампы и отрицательный полюс источника анодного питания. Заземление ротора конденсатора в этом случае привело бы к короткому замыканию анодного источника.

---

[1] Заземлением часто называется не только соединение того или иного элемента цепи с землей, но и соединение его с металлическим экраном или корпусом аппаратуры.

При параллельном анодном питании (рис. 116) лампа *Л*, контур $L_к C_к$ и анодная батарея $Б_а$ соединены параллельно.

Физические процессы, происходящие в генераторах последовательного и параллельного питания, одинаковые. То же самое назначение имеют и основные элементы. В момент включения анодной батареи происходит заряд конденсатора $C_к$ через конденсатор $C_р$, поэтому в контуре возникают свободные колебания, которые поддерживаются так же, как и при последовательном питании.

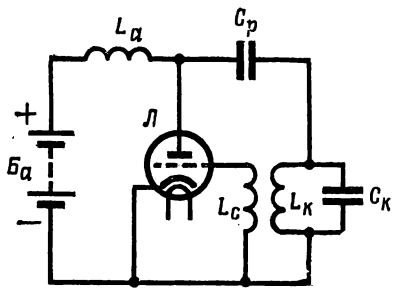


Рис. 116. Схема генератора с параллельным анодным питанием

Различие этих схем состоит в том, что при параллельном питании постоянная составляющая анодного тока не проходит через контур. Через контур проходит только переменная составляющая.

Между батареей $Б_а$ и анодом лампы включена катушка индуктивности $L_а$, называемая дросселем[1] высокой частоты. Дроссель предназначен для того, чтобы переменная составляющая анодного тока не замыкалась через анодную батарею. При отсутствии дросселя возникновение колебаний было бы невозможно, так как переменная составляющая тока замыкалась бы через источник анодного тока, не поступая на питание контура.

Индуктивное сопротивление $\omega L_а$ дросселя должно быть очень велико. Емкость между витками должна быть как можно меньше, чтобы переменная составляющая анодного тока не ответвлялась через нее; поэтому дроссели наматываются в один ряд или делаются секционированными.

Генераторы, работающие в диапазоне волн 50—200 м, имеют индуктивность дросселя 1—2 мГн.

Между анодом лампы и контуром включается разделительный конденсатор $C_р$. Он предназначен для того, чтобы не было короткого замыкания анодной батареи через катушку индуктивности контура $L_к$ и дроссель $L_а$, которые обладают небольшим сопротивлением для постоянного тока. Для переменной составляющей высокой частоты конденсатор $C_р$ представляет малое сопротивление. В диапазоне волн 50—200 м емкость разделительного конденсатора может быть 1000 пФ и больше.

Итак, постоянная составляющая анодного тока проходит по цепи: плюс анодной батареи, дроссель, лампа и минус анодной батареи; переменная составляющая анодного тока проходит по цепи: анод лампы, разделительный конденсатор, контур, катод лампы.

---

[1] Катушки индуктивности, предназначенные для разделения постоянного и переменного тока или токов низкой и высокой частоты, называются дросселями.

Наибольшее применение в практике получила схема параллельного анодного питания. Она имеет два существенных преимущества.

Во-первых, катушка и конденсатор контура не находятся под постоянным анодным напряжением, которое в мощных передатчиках очень высокое и поэтому опасно для жизни обслуживающего персонала. Напряжение высокой частоты, имеющееся на контуре, не опасно для жизни человека.

Во-вторых, можно непосредственно заземлить одну из пластин переменного конденсатора $C_к$. Это приведет к уменьшению влияния руки радиста на частоту колебаний генератора при его настройке (приближение руки к контуру с незаземленной пластиной изменяет его емкость, отсюда изменяется частота).

Основные недостатки параллельного питания следующие:

— шунтирование дросселем колебательного контура;

— наличие добавочных деталей (дросселя и разделительного конденсатора).

Преимущества параллельного питания имели значение до освоения диапазона коротких волн. На коротких волнах начинает резко сказываться шунтирующее действие дросселя. Как бы мы ни старались уменьшить его междувитковую емкость, она остается, и ее влияние особенно сильно проявляется на УКВ. Поэтому параллельная схема на этих волнах почти не применяется.

Рассмотренные выше генераторы имеют индуктивную связь между цепями анода и сетки. Перейдем к рассмотрению других, наиболее часто встречающихся в практике схем генераторов.

СХЕМЫ ГЕНЕРАТОРОВ

Генератор с автотрансформаторной связью

На рис. 117 приведена схема генератора с автотрансформаторной обратной связью. В этой схеме напряжение обратной связи снимается с части витков катушки контура.

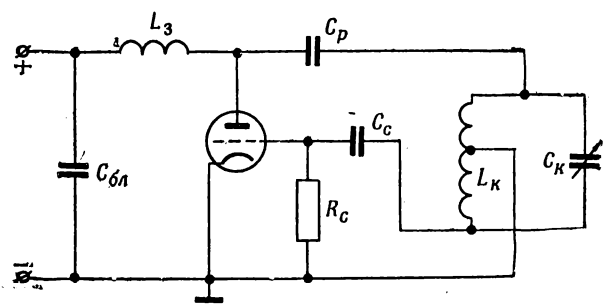


Рис. 117. Схема генератора с автотрансформаторной обратной связью и параллельным анодным питанием

Чтобы собранный по данной схеме генератор работал, три точки катушки контура должны быть подключены к электродам лампы, поэтому такую схему часто называют *трехточечной*. Один ко-

нец катушки через разделительный конденсатор $C_р$ подключен к аноду, другой через конденсатор $C_с$ — к сетке, средняя точка подведена к катоду. При этом сдвиг фазы между переменным напряжением на катоде и переменным напряжением на сетке составляет 180° и энергия в контуре пополняется в такт с его собственными колебаниями. Под средней точкой не следует понимать середину катушки. Обычно число витков обратной связи (витки, подключенные между сеткой и катодом) содержит небольшую часть всех витков катушки.

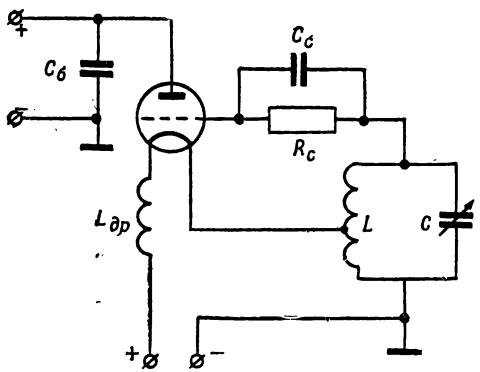


Рис. 118. Схема генератора с катодной связью и последовательным питанием на лампе с катодом прямого накала

Частота колебаний генератора определяется полной индуктивностью $L_к$ и емкостью $C_к$ контура.

Процесс возникновения и поддержания незатухающих колебаний в контуре подобен процессу в генераторе с индуктивной обратной связью. Переменная составляющая тока проходит через разделительный конденсатор $C_р$ и колебательный контур, поддерживая в нем незатухающие колебания.

Генератор с автотрансформаторной обратной связью может быть с параллельным или последовательным анодным питанием.

Схема генератора с автотрансформаторной обратной связью проще, чем с индуктивной связью: в ней используется только одна катушка. Но она имеет и недостаток: нельзя заземлить ротор переменного конденсатора и тем самым устранить влияние руки оператора на изменение частоты колебаний при настройке. Заземление ротора привело бы к замыканию сеточных витков при параллельном питании и к короткому замыканию анодной батареи при последовательном питании.

Этот недостаток легко устраняется путем некоторого видоизменения схемы. Видоизмененная схема генератора с автотрансформаторной обратной связью называется схемой с *катодной связью* (рис. 118). Эта схема получила широкое распространение на практике.

С точки зрения получения незатухающих колебаний схема с катодной связью ничем не отличается от схемы, приведенной на рис. 117. Колебательный контур присоединен к лампе следующим образом: одним концом через землю и блокировочный конденсатор $C_б$ к аноду лампы, противоположным концом к сетке, средняя точка катушки подведена к катоду.

Итак, схема с автотрансформаторной связью отличается от

схемы с катодной связью только тем, что у последней катод лампы непосредственно не заземлен. Следовательно, во второй схеме между катодом и землей существует напряжение высокой частоты.

Назначение дросселя $L_{др}$ состоит в том, чтобы не пропускать переменную составляющую анодного тока через батарею накала на катод, минуя колебательный контур. Если бы не было этого дросселя, то пополнения энергии в контуре не происходило бы и колебания в нем затухли.

Переменная составляющая анодного тока проходит по следующей цепи: анод лампы, блокировочный конденсатор $C_б$ (так как сопротивление его значительно меньше внутреннего сопротивления анодной батареи), земля, колебательный контур, катод лампы. Если бы дроссель $L_{др}$ отсутствовал, то переменная составляющая анодного тока, минуя контур, замкнулась бы на катод через батарею накала.

Эта схема в конструктивном отношении также имеет преимущество перед первой. В ней заземляется крайняя точка катушки, а не средняя, поэтому катушку и конденсатор можно непосредственно крепить к корпусу передатчика без изоляторов.

На рис. 117 приведена параллельная схема получения напряжения смещения за счет постоянной составляющей сеточного тока. Резистор $R_с$ включен параллельно с участком лампы сетка — катод. Емкость конденсатора $C_с$ берется такой, чтобы его сопротивление для первой гармоники сеточного тока было намного меньше, чем сопротивление резистора $R_с$. В этом случае через резистор $R_с$ будет проходить только постоянная составляющая сеточного тока.

При положительном напряжении на сетке лампы в ее цепи появляется сеточный ток, направленный от катода через резистор к сетке и затем к катоду (вспомним, что электроны движутся от катода к сетке). На резисторе создается падение напряжения, минус которого приложен к сетке, а плюс — к катоду. Чем больше величина сеточного тока, тем больше напряжение смещения.

В течение положительного полупериода конденсатор $C_с$ заряжается. В течение отрицательного полупериода конденсатор медленно разряжается через резистор $R_с$, поскольку сопротивление его достаточно велико, создавая таким образом постоянное отрицательное напряжение на сетке лампы.

На рис. 118 приведена последовательная схема получения напряжения смещения за счет постоянной составляющей сеточного тока.

Напряжение смещения возникает только при подаче возбуждающего напряжения. Величина напряжения смещения пропорциональна амплитуде входного напряжения.

Генератор с емкостной связью

На рис. 119 приведена схема генератора, в котором обратная связь между контуром и сеткой лампы осуществляется че-

рез емкость конденсатора C_2. С точки зрения физического процесса в генераторе совершенно безразлично, какая осуществлена связь — индуктивная или емкостная.

Приведенная схема также трехточечная и называется схемой с *емкостной обратной связью*. Колебательный контур состоит из конденсатора C_1 и C_2 и индуктивности L. Здесь подобно автотрансформаторным схемам средняя точка контура соединена с катодом лампы, а две противоположные точки — с анодом и сеткой.

Напряжение обратной связи снимается с конденсатора C_2.

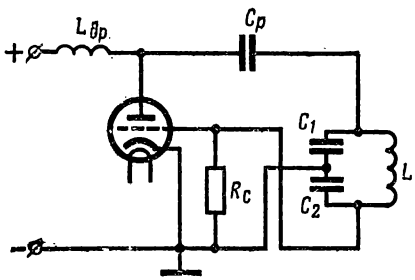


Рис. 119. Схема генератора с емкостной связью

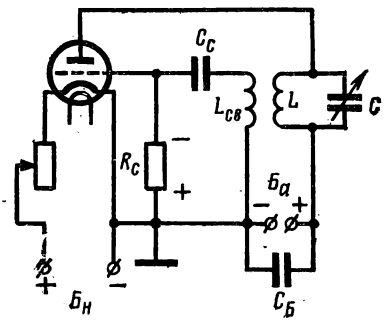


Рис. 120. Схема генератора с индуктивной обратной связью

При последовательном анодном питании эта схема работать не может, так как путь постоянной составляющей анодного тока был бы прегражден конденсатором C_1.

По сопротивлению R_c электроны, накапливающиеся при положительном полупериоде напряжения на сетке, «стекают» на катод, поэтому оно называется сопротивлением утечки сетки.

Если сопротивление R_c отсоединить, то на сетке накопятся заряды (сетка зарядится отрицательно) и анодный ток прекратится.

Кроме того, это сопротивление выполняет и другую функцию: оно создает постоянное отрицательное напряжение на сетке.

В схемах генераторов с индуктивной и автотрансформаторной обратной связью электроны с сетки могут «стекать» на катод через катушку индуктивности. В этих схемах сопротивление утечки включается только для того, чтобы создать отрицательное напряжение смещения на сетке лампы.

На рис. 120 приведена практическая схема генератора с индуктивной обратной связью. Назначение разделительного конденсатора C_c состоит в том, чтобы не пропускать сеточный ток через катушку обратной связи $L_{св}$, так как ее сопротивление значительно меньше сопротивления R_c. Если бы разделительного конденсатора не было, то сеточный ток прошел бы мимо резистора R_c и никакого напряжения смещения не получилось бы. Для высокой частоты конденсатор C_c оказывает незначительное сопротивление.

В схеме, приведенной на рис. 119, роль разделительного конденсатора выполняет конденсатор обратной связи C_2.

RC-генератор синусоидальных колебаний

RC-генератор синусоидальных колебаний называют генератором с реактивными элементами одного знака.

Мы познакомились с генераторами синусоидальных колебаний с резонансными контурами (*LC*-генераторами). Однако синусоидальные колебания могут возникать и в других схемах.

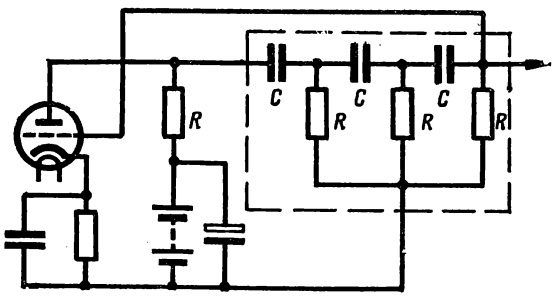


Рис. 121. Схема генератора с реактивным сопротивлением одного знака

Усилитель на резисторе можно превратить в генератор с самовозбуждением, если часть усиленного напряжения с анодной нагрузки лампы подавать на управляющую сетку со сдвигом по фазе на 180° по сравнению с переменной составляющей анодного напряжения. Для получения требуемого сдвига фаз можно использовать цепочки *RC* (из резисторов и конденсаторов). С помощью одной цепочки практически можно получить сдвиг фаз, близкий к 60°. Поэтому три цепочки (рис. 121) могут обеспечить на некоторой частоте ω сдвиг фаз, равный 180°. С последней цепочки напряжение подается на управляющую сетку лампы.

При прохождении через систему *RC*-элементов сигнал ослабляется, но это ослабление компенсируется усилением лампы.

Частота генерируемых колебаний

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{6}RC}.$$

Частоту в генераторах данного типа при одном и том же конденсаторе переменной емкости можно изменять в значительно больших пределах, чем в генераторе с колебательными контурами, где она изменяется обратно пропорционально квадратному корню из емкости.

Можно создать и генераторы типа *RL*, но они по сравнению с типом *RC* имеют большую массу и меньшую стабильность частоты. Поэтому практического распространения они не получили.

Генератор с электронной связью

Это двухконтурный генератор с электронной связью, где связь между контурами осуществляется через электронный поток лампы (рис. 122).

Применение такой схемы дает возможность сократить потребление энергии, кроме того, передатчик получается малогабаритным и легким.

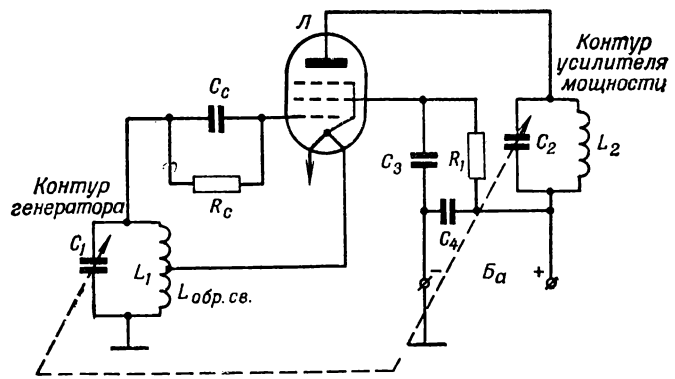


Рис. 122. Схема двухконтурного генератора с электронной связью между контурами

На одной лампе (пентоде) собраны задающий генератор и усилитель мощности.

Задающий генератор собран по автотрансформаторной схеме с катодной связью. Генерирование колебаний происходит в контуре L_1C_1 в цепи управляющей сетки. Анодом задающего генератора служит экранирующая сетка. Таким образом, катод, управляющая сетка и экранирующая сетка образуют триод, на котором работает задающий генератор.

Усиление колебаний происходит в контуре L_2C_2, включенном в анодную цепь лампы. Анодом в усилителе мощности служит анод лампы.

При включении питания лампы в контуре L_1C_1 возникают собственные колебания. Переменное напряжение с верхней части катушки L_1 подается на сетку лампы. Это напряжение управляет электронным потоком лампы, и в цепях анода и экранирующей сетки появляются переменные составляющие токов.

Путь переменной составляющей анодного тока: анод лампы, колебательный контур L_2C_2, конденсатор C_4, земля, часть катушки L_1 ($L_{обр.\,св}$), катод. Путь переменной составляющей тока экранирующей сетки: экранирующая сетка, конденсатор C_3, земля, часть катушки L_1, катод. Таким образом, переменные составляющие анодного тока и тока экранирующей сетки проходят через витки катушки $L_{обр.\,св}$, т. е. через эти витки осуществляется пита-

ние контура L_1C_1, и в контуре поддерживаются незатухающие колебания.

Так как переменная составляющая анодного тока питает и анодный контур L_2C_2, то, следовательно, в этом контуре также создаются незатухающие колебания, частота которых определяется частотой контура L_1C_1.

Напряжение и мощность во втором контуре получаются больше, чем в первом.

Итак, рассмотренная схема является двухконтурным самовозбуждающимся генератором с электронной связью между контурами. В отличие от рассмотренных ранее генераторов с самовозбуждением эта схема имеет большую устойчивость частоты колебаний. В этом отношении она равноценна двухкаскадным схемам генераторов других видов. Небольшие изменения параметров анодного контура не отразятся заметно на частоте колебаний, так как между контурами нет других видов связи, кроме электронной.

СТАБИЛИЗАЦИЯ ЧАСТОТЫ

Необходимое условие надежной радиосвязи — высокая устойчивость, или, как принято говорить, стабильность излучаемой частоты. Чем устойчивее частота радиостанций, тем большее их число может одновременно работать в определенном диапазоне волн, не мешая одна другой. Необходимо также, чтобы частота передатчика точно соответствовала заданному значению. Это позволит быстрее входить в связь.

Связь будет надежная, если не потребуется «искать» корреспондента и подстраивать приемник в процессе работы.

Устойчивость частоты повышается при кварцевой стабилизации передатчика. При этом устойчивость частоты сохраняется с точностью до десятков и даже единиц герц.

Кристаллический кварц относится к числу самых твердых минералов. Размеры кварца практически не изменяются при изменении температуры в широких пределах, и он почти не подвергается химическим влияниям.

Кварцевая пластинка, вырезанная соответствующим образом из кристалла, обладает пьезоэлектрическим свойством, т. е. способностью при сжатии или растяжении образовывать электрические заряды на своих поверхностях.

При сжатии пластинки на одной ее стороне образуются положительные заряды, на другой отрицательные. При растяжении пластинки знаки зарядов на ней меняются (рис. 123). Таким образом, между поверхностями кварцевой пластинки появляется напряжение. Это напряжение будет переменным с затухающей амплитудой, если пластинке дать возможность совершать свободные колебания после ее сжатия. В такт со свободными затухающими механическими колебаниями появляются затухающие электрические колебания. В этом отношении кварцевая пластинка эквива-

лентна обычному колебательному контуру, состоящему из индуктивности и емкости.

Если кварцевую пластинку поместить между двумя металлическими обкладками, к которым подвести переменное напряжение, то пластинка будет сжиматься и расширяться с частотой подведенного переменного напряжения (рис. 124). На гранях пластинки появляются переменные электрические заряды.

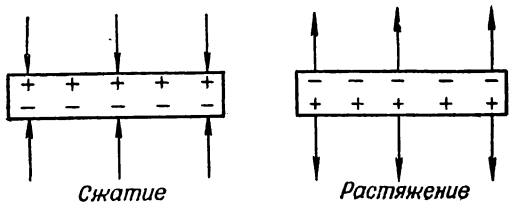


Рис. 123. Образование электрических зарядов при сжатии и растяжении пластинки кварца

Кварцевая пластинка, как и любая механическая система, имеет собственную резонансную частоту, которая определяется геометрическими размерами пластинки. При совпадении частоты подведенного к обкладкам напряжения с резонансной частотой

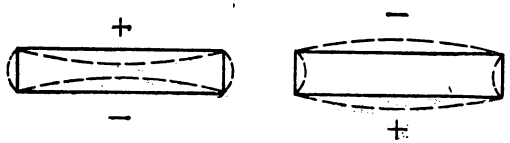


Рис. 124. Механическое колебание пластинки кварца при подведении к ней переменного напряжения

кварцевой пластинки амплитуда механических колебаний ее достигает наибольшей величины. Следовательно, и величина зарядов, появляющихся на гранях пластинки, в этом случае будет наибольшей, во много раз превышая величину зарядов при нерезонансной частоте.

Так как электрические колебания связаны с механическими, а последние определяются только размерами пластинки, которые остаются постоянными, то кварцевая пластинка имеет устойчивую частоту колебаний.

Длину волны свободных колебаний кварцевой пластинки можно определить по следующей приближенной формуле:

$$\lambda = 120d,$$

где d — толщина кварцевой пластинки, мм;

λ — длина волны свободных колебаний, м.

К кварцевой пластинке нельзя подводить большие мощности: она может очень сильно нагреться, потерять свои свойства и даже

лопнуть. Это является одним из недостатков кварца. Поэтому для непосредственной стабилизации частоты мощных каскадов передатчика кварц не применяется. Мощные передатчики, частота которых стабилизирована кварцем, имеют несколько каскадов, причем кварц[1] включается в задающий генератор.

Одна из схем генератора, стабилизированного кварцем, показана на рис. 125.

Кварц в качестве колебательного контура включен между управляющей сеткой и катодом лампы задающего генератора. Резистор R_c является сопротивлением утечки. Обратная связь между анодным контуром и кварцем (сеточный контур) осуществляется через междуэлектродную емкость лампы сетка — анод (C_{c-a}).

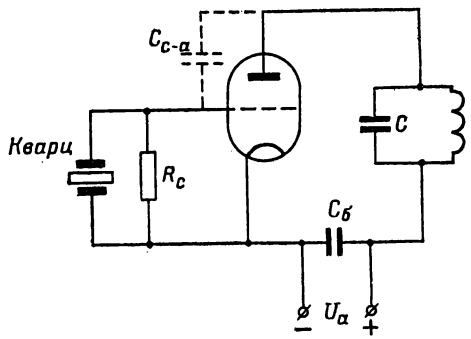


Рис. 125. Схема генератора, стабилизированного кварцем

При включении питания лампы в анодном контуре LC появляются свободные затухающие колебания. Возникшее на контуре переменное напряжение через междуэлектродную емкость лампы сетка — анод создает переменное напряжение той же частоты на обкладках кварца. Если частота свободных колебаний контура LC совпадает с резонансной частотой кварца, то последний возбудится, т. е. пластинка кварца начнет колебаться. В результате колебания на гранях кварца образуется переменное напряжение, которое подается на сетку лампы. Анодный ток лампы начнет пульсировать и будет поддерживать в анодном контуре незатухающие колебания.

При работе на длинных волнах величина междуэлектродной емкости может оказаться недостаточной для возбуждения колебаний. Тогда между управляющей сеткой и анодом лампы подключается полупеременный конденсатор небольшой емкости. При увеличении емкости обратная связь между анодным контуром и кварцем возрастает и схема возбуждается.

Для получения колебаний в генераторе с кварцем следует настраивать анодный контур в резонанс с частотой кварцевой пластинки.

СХЕМЫ ВЫХОДНЫХ КАСКАДОВ

Выходной каскад передатчика может быть собран по простой или сложной схеме.

---

[1] Под кварцем в данном случае следует понимать кварцевую пластинку, помещенную в кварцедержателе.

На рис. 126 приведена простая схема выхода передатчика. В этом случае антенна является частью колебательного контура, включенного в анодную цепь последней лампы передатчика. Этот контур состоит из индуктивностей L, L_A, собственной индуктивности и емкости антенны C_A. Для настройки его в резонанс с частотой задающего генератора служит переменная индуктивность L_A.

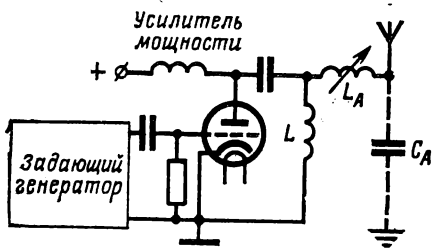


Рис. 126. Простая схема выхода передатчика

На рис. 127 приведена сложная схема выхода передатчика. Здесь антенна не включена непосредственно в анодную цепь. В анодной цепи последней лампы имеется колебательный контур, который в данном случае называется промежуточным. Связь между антенной и промежуточным контуром обычно индуктивная.

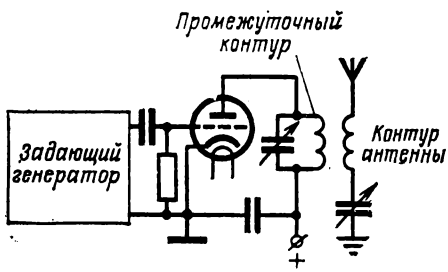


Рис. 127. Сложная схема выхода передатчика

Высокочастотные колебания, возникающие в промежуточном контуре, настроенном в резонанс, передаются через индуктивную связь в антенну (в антенный колебательный контур), которая создает радиоволну в пространстве. Для настройки антенны в резонанс включается переменный конденсатор или катушка с переменной индуктивностью.

Несмотря на то что в простой схеме выхода нет промежуточного контура, приходится очень часто отказываться от ее практического использования. Это объясняется следующими причинами.

Антенна имеет распределенную емкость, зависящую в сильной степени от местности, на которой устанавливается радиостанция, от качания антенны при ветре и т. д. Поскольку при простой схеме выхода антенна входит в состав колебательного контура, при изменении ее емкости параметры контура будут меняться, а в однокаскадных передатчиках будет меняться длина излучаемой волны. При этом связь будет неустойчивой.

Случайная же расстройка антенны или обрыв ее нарушат резонанс анодного контура, в результате потери на аноде резко возрастут, анод начнет перегреваться и лампа может выйти из строя.

При сложной схеме выхода антенна мало влияет на настройку анодного (промежуточного) контура.

Наконец, одно из важных преимуществ сложной схемы выхода заключается в том, что она дает значительно меньшее излучение высших гармоник, т. е. радиоволн, которые в 2—4 раза и больше

короче основной волны. Излучение на гармониках слабее излучения основной волны, но в мощных радиостанциях оно создает заметное мешающее действие радиостанциям, волны которых совпадают с волнами гармоник.

При простой схеме выхода антенна включена непосредственно в анодный контур и излучает все гармоники. При сложной схеме выхода антенна настраивается в резонанс на основную частоту промежуточного контура, т. е. в этом случае происходит подавление гармоник.

УПРАВЛЕНИЕ КОЛЕБАНИЯМИ ПЕРЕДАТЧИКА

Управление при радиотелеграфной работе

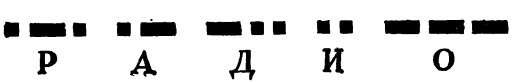
Для радиосвязи по телеграфной азбуке радиоволну необходимо излучать в течение определенных промежутков времени с различными интервалами. Следовательно, работой передатчика необходимо управлять, т. е. включать и выключать его в определенной последовательности. Такое управление передатчиком производится с помощью телеграфного ключа, разрывающего и замыкающего какую-либо цепь передатчика, и называется *манипуляцией*.

Если передатчик состоит из задающего генератора и усилителя мощности, то для стабильной работы прерывать колебания в задающем генераторе не рекомендуется. Ключ в этом случае включается в одну из цепей усилителя мощности.

Чаще всего ключ включается в цепь управляющей сетки, а в тетродах и пентодах его иногда включают в цепь экранирующей сетки.

Если во время работы на управляющую сетку не подается отрицательное смещение, то ключ можно включить в разрыв сеточной цепи. Если же отрицательное смещение подается, то разрывать цепь сетки ключом не рекомендуется, так как при этом возрастет анодный ток (при отжатом ключе смещение на сетке равно нулю) и анод может перегреться. В этом случае используется такая схема включения ключа, в которой при его отжатии подается дополнительное отрицательное смещение на сетку, достаточное для запирания лампы.

Чтобы передать точку, необходимо замкнуть и сейчас же разомкнуть ключ. При передаче тире ключ замыкается на более продолжительное время. Каждая буква алфавита обозначается точками, тире или их комбинацией. Между передачей отдельных букв дается пауза. Например, слово «радио» состоит из следующей комбинации точек и тире:



Р А Д И О

Таким образом, манипулируя ключом на передающей станции, оператор передает радиограмму.

Управление при радиотелефонной работе

Амплитудная модуляция

Для передачи речи по радио необходимо звуковые колебания наложить на колебания высокой (несущей) частоты. Для этого нужно колебания высокой частоты изменить по тому же закону, по которому изменяется э. д. с., полученная на вторичной

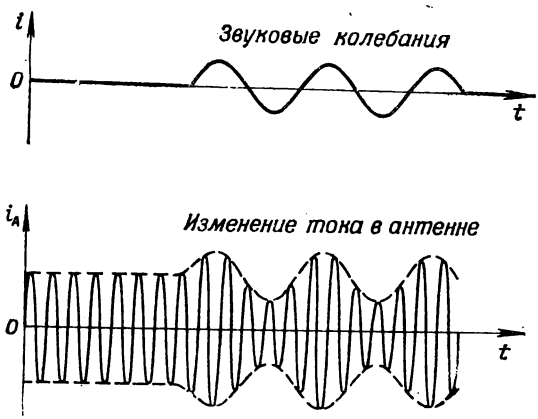


Рис. 128. Изменение тока в антенне передатчика при амплитудной модуляции

обмотке микрофонного трансформатора. Эта э. д. с., как мы уже знаем, изменяется в такт звуковым колебаниям, действующим на мембрану микрофона.

Процесс изменения тока (колебаний) высокой частоты в соответствии с передаваемыми колебаниями звуковой частоты называется *модуляцией*.

При *амплитудной модуляции* происходит изменение амплитуд тока высокой частоты по закону звуковой частоты. Частота несущего колебания при этой модуляции остается постоянной.

На рис. 128 показано, как изменяется ток в антенне при амплитудной модуляции. Если перед микрофоном нет источника звуковых колебаний, то в антенне существуют высокочастотные колебания, амплитуда которых остается постоянной. Как только появляются звуковые колебания, они преобразуются в переменную э. д. с. на вторичной обмотке трансформатора; эта э. д. с. подается на управляющую или экранирующую сетку лампы передатчика и, в конечном итоге, заставляет меняться по амплитуде высокочастотные колебания в антенне. Линия, проведенная через вершины всех колебаний тока в антенне, называется *огибающей высокочастотных колебаний*. Форма огибающей соответствует звуковым колебаниям при телефонной передаче. На несущую частоту как бы «накладываются» колебания низкой частоты.

Чем больше амплитуда звуковых колебаний, тем глубже будет модуляция и, наконец, наступит такой момент, когда амплитуда высокочастотных колебаний будет изменяться от двойного значения амплитуды высокочастотных колебаний при отсутствии модуляции до нуля. В этом случае говорят, что глубина модуляции равна 100%. Дальнейшее увеличение силы звука приведет к искажению передаваемой речи, так как огибающая переменных амплитуд высокочастотного колебания не будет воспроизводить полностью колебания низкой частоты.

В зависимости от того, на какой электрод лампы подается переменное напряжение низкой частоты (на сетку или анод), различают два вида модуляции: сеточную и анодную.

Принципиальная схема передатчика с сеточной модуляцией приведена на рис. 129.

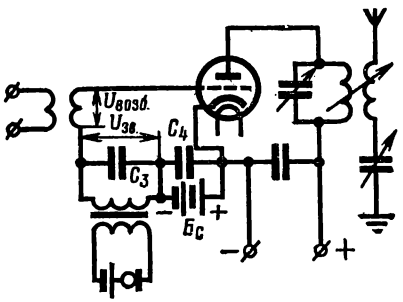


Рис. 129. Принципиальная схема передатчика с сеточной модуляцией

Напряжение звуковой частоты $U_{зв}$ с вторичной обмотки микрофонного трансформатора поступает на управляющую сетку лампы. На эту же сетку поступает напряжение возбуждения $U_{возб}$ (напряжение высокой частоты от задающего генератора) и отрицательное напряжение смещения E_c от батареи $Б_c$.

Чтобы избежать потери энергии высокочастотных колебаний на вторичной обмотке микрофонного трансформатора, ее шунтируют конденсатором C_3. Емкость этого конденсатора (500—1000 пФ) представляет незначительное сопротивление для тока высокой частоты и весьма большое сопротивление для тока низкой частоты.

С помощью конденсатора C_4 устраняется бесполезное падение напряжения высокой и звуковой частоты на внутреннем сопротивлении источника сеточного смещения. Емкость конденсатора C_4 достаточно большая (1—2 мкФ), и его сопротивление для токов низкой и тем более высокой частоты ничтожно мало.

Для осуществления модуляции необходимо на сетку лампы подавать отрицательное смещение. Генератор при этом работает с отсечкой анодного тока, т. е. анодный ток проходит в цепи в виде отдельных импульсов. Амплитуда импульсов изменяется под действием переменного напряжения звуковой частоты.

Из рис. 130, *а* видно, что при подаче на сетку переменного напряжения звуковой частоты напряжение смещения начинает изменяться с той же частотой.

На рис. 130, *б* показано совместное действие постоянного напряжения смещения и переменного напряжения высокой частоты. При этом в анодной цепи лампы появляются импульсы анодного тока постоянной амплитуды. В анодном контуре (следовательно,

и в антенне) возникнут высокочастотные колебания также с постоянной амплитудой.

На рис. 130, *в* показано совместное действие на сетку лампы трех напряжений: постоянного напряжения смещения, напряжений

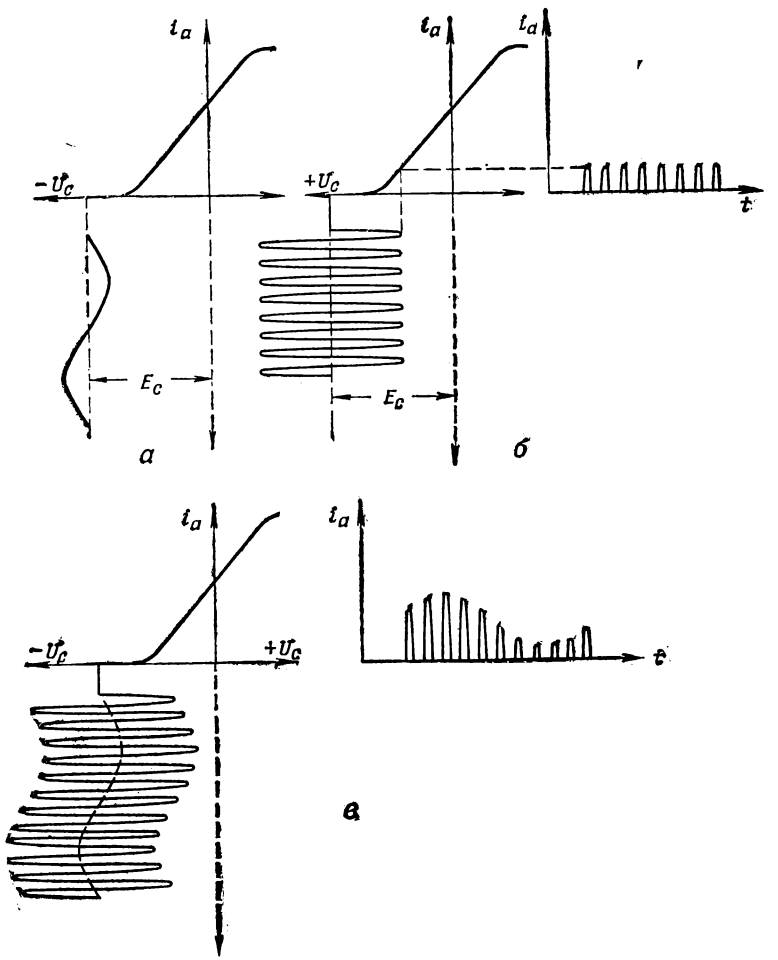


Рис. 130. Физические процессы в передатчике при сеточной модуляции

звуковой и высокой частот. Теперь в анодной цепи импульсы анодного тока меняются по амплитуде. В антенне появляются колебания высокой частоты, модулированные по амплитуде.

На рис. 131 приведена принципиальная схема передатчика с анодной модуляцией. В этой схеме вторичная обмотка микрофонного трансформатора включена в анодную цепь лампы. Следовательно, напряжение на аноде лампы будет складываться из по-

стоянного напряжения батареи и переменного напряжения звуковой частоты $U_{зв}$.

Когда микрофон не работает, напряжение на аноде остается постоянным ($U_а$). При наличии напряжения на сетке от задающего генератора ток в анодной цепи имеет форму импульсов с постоянной амплитудой. В антенне возникают колебания высокой частоты также с постоянной амплитудой.

Как только в анодной цепи появится переменное напряжение звуковой частоты, суммарное напряжение на аноде будет меняться от $U_а+U_{зв}$ до $U_а-U_{зв}$. При этом амплитуды импульсов анодного тока будут изменяться в такт звуковой частоте. В антенне появятся модулированные колебания высокой частоты.

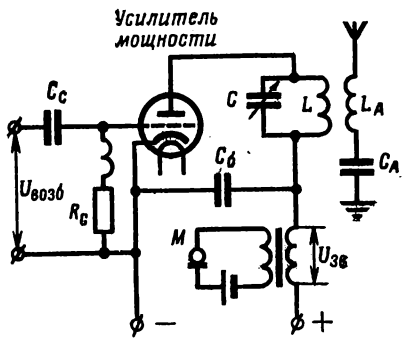


Рис. 131. Принципиальная схема передатчика с анодной модуляцией

Амплитудная модуляция в задающем генераторе обычно не осуществляется, чтобы не ухудшать стабильность частоты передатчика. При изменении режима задающего генератора частота его окажется нестабильной и наряду с необходимой амплитудной модуляцией появится ненужная в данном случае частотная модуляция. Амплитудная модуляция, как правило, осуществляется в одном из каскадов усиления мощности, чаще всего в выходном.

Частотная модуляция

При амплитудной модуляции частота тока остается постоянной, а амплитуда изменяется в такт звуковой частоте. При

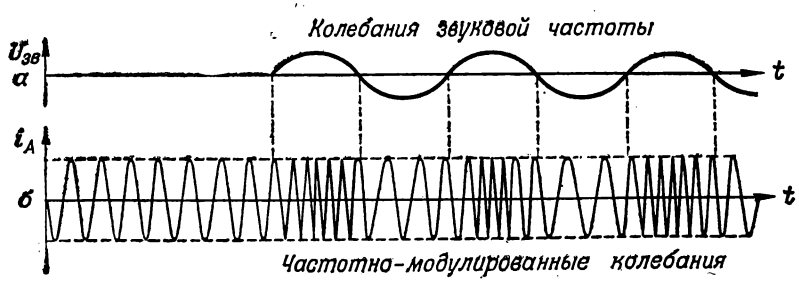


Рис. 132. График, поясняющий процесс частотной модуляции

частотной модуляции, наоборот, амплитуда тока остается постоянной, а частота его изменяется в такт звуковой частоте.

На рис. 132, *а* приведена кривая изменения напряжения на вторичной обмотке микрофонного трансформатора ($U_{зв}$), а на

рис. 132, *б* — кривая изменения тока в антенне передатчика. Из рисунка видно, что амплитуда тока остается все время постоянной, остается постоянной и частота тока при отсутствии модуляции (микрофон не работает). При работе микрофона частота в антенне изменяется в такт звуковой частоте.

При частотной модуляции происходит изменение частоты излучаемых передатчиком колебаний, поэтому модуляция осуществляется там, где эта частота «зарождается», т. е. в задающем гене-

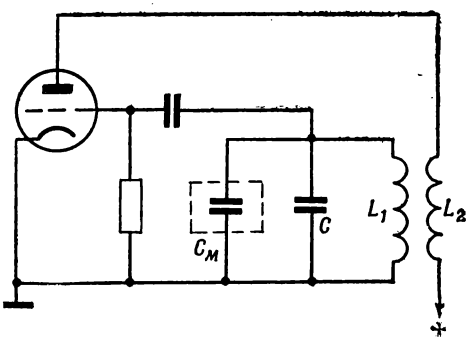


Рис. 133. Принцип получения частотной модуляции

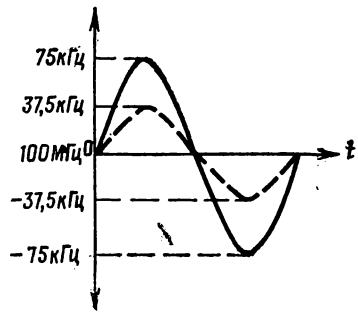


Рис. 134. Понятие о глубине частотной модуляции

раторе. Чтобы осуществить частотную модуляцию, необходимо изменять емкость (или индуктивность) колебательного контура задающего генератора в такт изменению звуковой частоты. Рассмотрим, как это происходит.

Наиболее простой способ генерирования частотно-модулированных колебаний показан на рис. 133. Конденсаторный микрофон $C_м$ подключается к резонансному контуру генератора. Как только начинают говорить в микрофон, емкость его меняется в такт с частотой речи. В результате настройка контура меняется, а следовательно, и резонансная частота генератора изменяется в такт со звуковой частотой.

При амплитудной модуляции изменение амплитуды зависит от глубины модуляции. А как обстоит дело с частотной модуляцией?

Несущие частоты широковещательных станций с частотной модуляцией лежат вблизи 100 000 кГц (100 МГц). Установлено, что максимальное наиболее желаемое изменение несущей частоты составляет ±75 кГц.

Если несущая частота 100 МГц, то в этом случае она будет меняться при полной модуляции от 100,075 МГц до 99,925 МГц. Это соответствует 100%-ной глубине амплитудной модуляции. Изменение частоты ±37,5 кГц соответствует глубине модуляции 50%.

Изменение частоты несущей волны обычно называется девиацией. Для частотной модуляции глубина модуляции определяется

как девиация частоты, деленная на максимальную девиацию и умноженная на 100%.

На рис. 134 сплошной линией показана глубина модуляции, равная 100%, а пунктирной линией — 50%.

Девиация частоты не зависит от частоты модулирующего сигнала, а зависит только от его силы. Если, например, модулирующий сигнал имеет частоту 1000 Гц и его величина достаточна, чтобы получить максимальную девиацию частоты, то это значит,

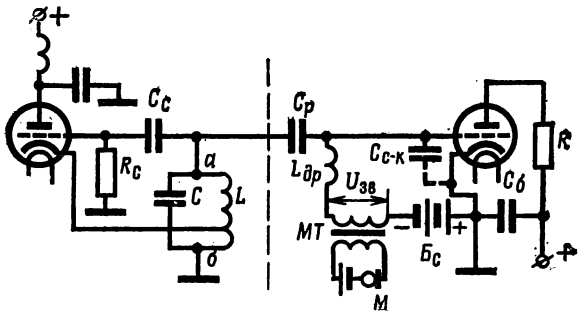


Рис. 135. Принципиальная схема передатчика с частотной модуляцией

что 1000 раз в секунду несущая частота будет изменяться на ±75 кГц. Если этот же модулирующий сигнал имеет половинную силу указанного выше сигнала, то несущая частота будет изменяться 1000 раз в секунду на ±37,5 кГц.

Таким образом, при максимальной частоте девиации 75 кГц станция с частотной модуляцией будет перекрывать диапазон частот 2×75=150 кГц. Следовательно, резонансные контуры в приемнике с частотной модуляцией должны иметь намного большую ширину полосы пропускания, чем контуры в приемнике с амплитудной модуляцией.

На рис. 135 приведена принципиальная схема передатчика с частотной модуляцией. В левой части рисунка изображен задающий генератор, в правой части — частотный модулятор. Между точками *а* и *б* контура задающего генератора подключена междуэлектродная емкость сетка — катод ($C_{с-к}$) лампы модулятора, т. е. параллельно емкости *C* контура подключена емкость $C_{с-к}$ лампы. Следовательно, частота задающего генератора определяется индуктивностью *L* и емкостями *C* и $C_{с-к}$. Если изменять величину емкости сетка — катод лампы модулятора в такт звуковой частоте, то при этом будет изменяться частота, генерируемая задающим генератором, т. е. будет осуществляться частотная модуляция.

В цепь сетки модуляторной лампы включена батарея смещения $Б_с$ и вторичная обмотка микрофонного трансформатора *МТ*. Когда микрофон не работает, то к сетке лампы приложено только постоянное напряжение смещения и емкость сетка — катод имеет постоянную величину. Величина этой емкости зависит от величины отрицательного смещения на сетке. Чем больше смещение на сетке,

тем сильнее она отталкивает электроны, вылетающие из катода, т. е. пространственный заряд как бы «прижимается» к катоду. При этом расстояние между сеткой и пространственным зарядом увеличивается (увеличивается расстояние между пластинами «конденсатора»), что приводит к уменьшению емкости сетка — катод. Уменьшение емкости $C_{с-к}$ вызывает увеличение частоты колебаний в контуре задающего генератора.

Изменение напряжения смещения производится за счет переменного напряжения звуковой частоты, возникающего на вторичной обмотке микрофонного трансформатора при работе микрофона.

Таким образом, изменение напряжения смещения на модуляторной лампе по закону звуковой частоты приводит к изменению генерируемой частоты по тому же закону. Так осуществляется частотная модуляция.

Рассмотрим назначение отдельных деталей, которые здесь встречаются впервые. Конденсатор $C_р$ предохраняет батарею смещения $Б_с$ от короткого замыкания через катушку индуктивности L. Для токов высокой частоты этот конденсатор оказывает незначительное сопротивление. Дроссель $L_{др}$ не пропускает высокую частоту по цепи вторичной обмотки трансформатора $МТ$ и батареи смещения $Б_с$. Для низкой частоты сопротивление дросселя очень мало, и он практически не оказывает никакого влияния на работу модулятора.

Резистор R в цепи анода служит для подбора необходимого напряжения на аноде лампы модулятора. Конденсатор $C_б$ обеспечивает замыкание переменных составляющих анодного тока на землю для того, чтобы устранить какое-либо влияние их на частоту задающего генератора.

Полоса частот передатчика

При амплитудной и частотной модуляции в антенне получаются колебания, значительно отличающиеся от синусоидальных.

Известно, что несинусоидальные колебания можно представить как сумму отдельных синусоидальных колебаний различных частот-гармоник. Поэтому при телеграфной и телефонной работе передатчик излучает не одну, а несколько частот, или, как говорят, спектр частот.

Если модулирование высокочастотных колебаний происходит одним тоном, то спектр модулированного колебания состоит из трех частот. Этот спектр можно представить графически следующим образом (рис. 136).

По горизонтальной оси откладывается частота, а по вертикальной оси — амплитуда колебаний. Колебание с частотой f_0, равной основной частоте передатчика, имеет наибольшую амплитуду. Частота $f_1=f_0-F$, где F — частота модулирующего звукового колебания. Частота $f_2=f_0+F$.

Предположим, что передатчик излучает колебания с частотой 1000 кГц, а частота модулирующего звукового колебания равна 1 кГц, т. е. $f_0=1000$ кГц, $F=1$ кГц, тогда $f_1=f_0-F=1000-1=$ $=999$ кГц, а $f_2=f_0+F=1000+1=1001$ кГц.

Частота f_0 называется *несущей частотой*, а f_1 и f_2 называются *боковыми частотами*.

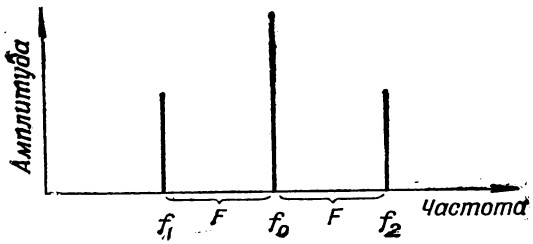


Рис. 136. Спектр модулированных колебаний

Так обстоит дело при модуляции одним тоном (одной звуковой частотой). Но при передаче речи и тем более концерта в модуляции участвует не одна частота, а целый спектр звуковых частот. В этом случае спектр модулированных колебаний состоит из несущей частоты и двух боковых полос частот (рис. 137).

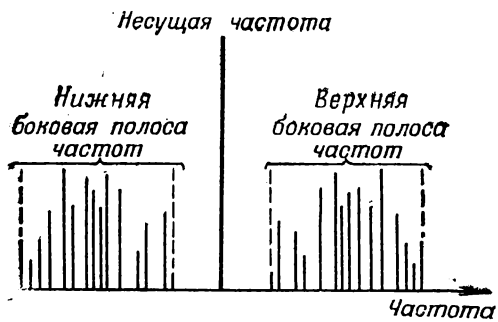


Рис. 137. Состав сложного модулированного колебания

Ширина каждой боковой полосы частот при амплитудной модуляции (при передаче человеческой речи) лежит в пределах 4—8 кГц. При частотной модуляции ширина полосы увеличивается.

Один из серьезных недостатков двухполосной передачи — излучение радиопередатчиком очень широкой полосы частот. Это препятствует одновременной работе большого числа радиостанции в заданном диапазоне волн из-за сильных взаимных помех.

Другой недостаток состоит в том, что мощность радиопередатчика расходуется весьма нерационально. Дело в том, что слышимость радиотелефонной связи зависит главным образом от мощ-

ности боковых полос. Однако на каждую из боковых полос приходится не более 17% полной мощности радиопередатчика, а большая доля этой мощности (до 66%) расходуется непроизводительно на излучение колебаний несущей частоты, почти не влияющих на слышимость радиостанции.

Этих недостатков можно избежать, если применить в радиостанциях радиотелефонную передачу с одной боковой полосой частот.

При телефонной работе с амплитудной модуляцией, когда излучаются одна несущая частота и две боковые полосы, сигнал на выходе обычного передатчика содержит значительно большее количество частотных составляющих, чем это требуется для неискаженной передачи речи. Установлено, что достаточно передать лишь одну боковую полосу, подавив несущую и вторую боковую полосу, чтобы на приемном пункте, вновь введя несущую частоту от местного генератора и продетектировав сигнал, получить передаваемую речь. Такой вид радиосвязи называется работой с одной боковой полосой или однополосной радиосвязью.

Вопросам однополосной связи уделяется большое внимание.

Переход на однополосную радиосвязь дает выигрыш, эквивалентный увеличению мощности передатчика приблизительно в 16 раз. Кроме того, сужение полосы частот сигнала позволяет на одном и том же участке диапазона коротких волн разместить вдвое больше радиостанций.

Недостаток радиостанций однополосной связи — сложность их устройства и громоздкость по сравнению с обычными радиостанциями. Применение полупроводниковых приборов и малогабаритных деталей дает возможность преодолеть этот недостаток.

ГЕНЕРАТОРЫ НЕСИНУСОИДАЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ

В радиотехнических устройствах широко используются генераторы электрических колебаний различной несинусоидальной формы. Такие колебания называются релаксационными.

Схема простейшего генератора релаксационных колебаний с неоновой лампой изображена на рис. 138, *а*.

При включении схемы конденсатор C заряжается от источника U через резистор R. Когда напряжение на конденсаторе достигает потенциала зажигания $U_{заж}$ неоновой лампы, в ней происходит ионизация газа, внутреннее сопротивление лампы становится весьма малым и конденсатор начинает разряжаться через лампу. Разряд происходит до тех пор, пока напряжение на конденсаторе не упадет до потенциала гашения $U_{гаш}$. Резистор R ограничивает ток, протекающий от источника, и не дает возможности поддерживать разряд в лампе, поэтому она гаснет и конденсатор начинает снова заряжаться от источника через резистор R.

Форма релаксационных колебаний в генераторе с неоновой лампой изображена на рис. 138, *б*. Период колебаний определяется

продолжительностью заряда конденсатора (при погасшей лампе) от напряжения погасания до напряжения зажигания и разрядом конденсатора в тех же пределах (при горящей лампе). Период колебаний поэтому можно изменять в широких пределах, изменяя R

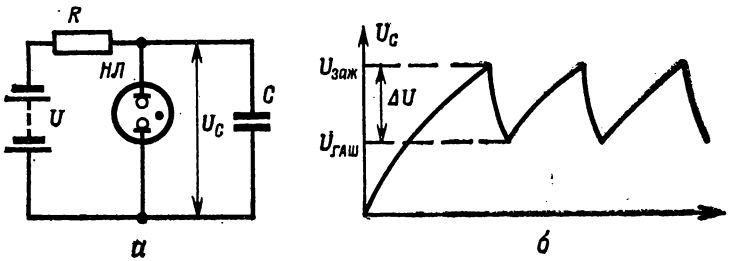


Рис. 138. Генератор релаксационных колебаний с неоновой лампой: *а* — схема; *б* — форма колебаний

и C (он близок к постоянной времени цепи). При заряде конденсатора через большое сопротивление резистора R процесс нарастания напряжения происходит медленно, а разряд через малое внутреннее сопротивление открытой лампы протекает во много раз быстрее.

Такой генератор используется сравнительно редко, так как потенциалы зажигания и гашения неоновой лампы нестабильны, и, кроме того, мала амплитуда колебаний: $\Delta U = U_{заж} - U_{гаш}$. Более стабильные генераторы несинусоидальных колебаний могут быть получены при использовании электронных ламп и полупроводниковых приборов.

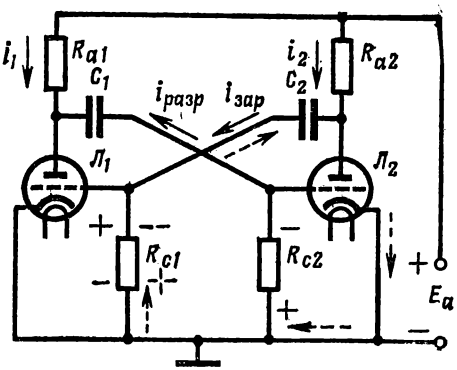


Рис. 139. Схема мультивибратора

Релаксационный генератор импульсов, в котором используются два триода, называется *мультивибратором* (рис. 139).

Пусть в некоторый момент времени в схеме имеется состояние электрического равновесия. Конденсаторы C_1 и C_2 заряжены до некоторых постоянных значений напряжений, напряжения на сетках ламп равны нулю и обе лампы открыты. Такое состояние равновесия схемы неустойчиво вследствие ничтожных случайных изменений электронного потока в лампах. Предположим, что анодный ток i_1 лампы $Л_1$ возрос; это приведет к увеличению напряжения на резисторе R_{a1}. Так как сумма напряжений на резисторе R_{a1} и лампе $Л_1$ всегда остается постоянной и равной напряжению источника питания:

$$U_{R_{a1}} + U_{a1} = E_a,$$

произойдет уменьшение анодного напряжения U_{a1}. Конденсатор C_1, подключенный через резистор R_{c2} параллельно лампе $Л_1$, начинает разряжаться. Ток разряда конденсатора C_1, направление которого показано на рисунке, создает падение напряжения на резисторе R_{c2} (минус вверху резистора, плюс внизу). На сетке лампы $Л_2$ по отношению к катоду появится отрицательное напряжение, которое приведет к уменьшению анодного тока лампы $Л_2$. Напряжение на резисторе R_{a2} уменьшается, а на лампе $Л_2$ увеличивается. Конденсатор C_2 начинает заряжаться, создавая на резисторе R_{c1} падение напряжения. Сетка лампы $Л_1$ по отношению к катоду получит положительный потенциал, а это будет способствовать дальнейшему нарастанию анодного тока этой лампы. Появление положительного напряжения на сетке лампы $Л_1$ вызовет сеточный ток. Следовательно, конденсатор C_2 заряжается также через участок сетка — катод лампы $Л_1$. В схеме существует положительная обратная связь, а это приводит к лавинообразному возрастанию тока лампы $Л_1$ и убыванию тока лампы $Л_2$.

Этот процесс завершается полным запиранием лампы $Л_2$ и отпиранием лампы $Л_1$ (через лампу $Л_1$ проходит большой ток). Однако такое состояние схемы сохранится недолго. По мере разряда конденсатора C_1 ток разряда будет уменьшаться, а это будет вызывать возрастание напряжения на сетке лампы $Л_2$. Наступит момент, когда это напряжение превысит напряжение запирания, в анодной цепи лампы появится ток и появится падение напряжения на резисторе R_{a2}, следовательно, анодное напряжение на лампе $Л_2$ начнет уменьшаться. Конденсатор C_2 начнет разряжаться через резистор R_{c1} (ток разряда показан на рисунке пунктирной стрелкой). Ток разряда создает отрицательное напряжение на сетке лампы $Л_1$, которое будет частично компенсировать положительный потенциал на сетке. Таким образом, напряжение на сетке лампы $Л_1$ будет уменьшаться, что в свою очередь приведет к уменьшению анодного тока этой лампы и увеличению напряжения на ее аноде. Конденсатор C_1 начнет заряжаться через резистор R_{c2}, напряжение на сетке лампы $Л_2$ растет, растет и ток через эту лампу. Происходит лавинообразное нарастание тока в лампе $Л_2$ и убывание в лампе $Л_1$. Произойдет запирание лампы $Л_1$ и отпирание лампы $Л_2$. Опять такое состояние схемы сохранится недолго.

Процесс будет периодически повторяться. Схема будет генерировать релаксационные колебания. На анодах ламп будут формироваться импульсы почти прямоугольной формы.

Длительность формируемых импульсов и период их повторения можно изменять изменением емкостей конденсаторов C_1 и C_2 и сопротивлений резисторов R_{c1} и R_{c2}.

Для получения коротких и мощных импульсов используются блокинг-генераторы. Одна из схем блокинг-генератора приведена на рис. 140. Она состоит из триода, трансформатора, обеспечивающего обратную связь между цепями анода и сетки, и цепочки RC. Постоянная времени сеточной цепи выбирается значительно больше периода свободных колебаний контура, образованного индук-

тивностью и распределенной емкостью обмотки трансформатора.

Первичная обмотка трансформатора со стальным или магнитодиэлектрическим сердечником включена в анодную цепь лампы. Вторичная обмотка подключена к сетке лампы. Автоматическое смещение на сетке создается цепью, состоящей из резистора R и конденсатора C. Обмотки трансформатора включены так, что при возрастании анодного тока на сетке лампы увеличивается положительный потенциал, т. е. между анодной и сеточной цепями имеется сильная положительная обратная связь.

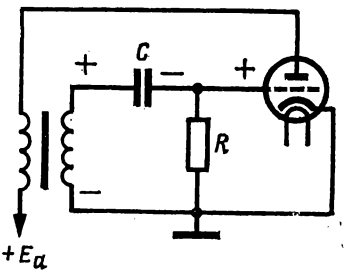


Рис. 140. Схема блокинг-генератора

При включении анодного напряжения в анодной цепи лампы появляется ток. С ростом анодного тока растет положительное напряжение на сетке, которое приводит к дальнейшему увеличению анодного тока. Возникает лавинообразное нарастание анодного тока, которое обычно длится сотые доли микросекунды. Этот процесс происходит до тех пор, пока действие обратной связи не будет ограничено нелинейностью лампы.

В результате уменьшения крутизны характеристики лампы рост анодного тока замедляется, напряжение на сетке перестает увеличиваться. При положительном напряжении на сетке протекает сеточный ток, который быстро заряжает C. По мере заряда конденсатора напряжение на сетке уменьшается, что приводит к убыванию анодного тока. Уменьшение анодного тока вызывает возникновение отрицательного напряжения на вторичной обмотке трансформатора, подключенной к сетке, напряжение на управляющей сетке от положительных значений быстро переходит к отрицательным, что способствует дальнейшему уменьшению анодного тока. Происходит лавинообразный процесс спада анодного тока, заканчивающий запиранием лампы.

Резкое уменьшение анодного тока до нуля создает большой кратковременный импульс напряжения на вторичной обмотке трансформатора. После его окончания конденсатор C, заряженный сеточным током, начинает разряжаться через резистор R и обмотку трансформатора. Так как сопротивление R велико, то разряд идет медленно, медленно возрастает и напряжение на управляющей сетке. Через относительно длительное время напряжение на сетке достигнет величины, когда вновь появится анодный ток в лампе. Возникает новый кратковременный импульс.

Длительность импульса определяется характеристикой лампы, величиной сеточного тока и емкостью конденсатора, длительность интервала между импульсами — постоянной времени разряда конденсатора RC. Изменяя R, можно менять частоту повторения импульсов.

Глава 10

ГЕНЕРАТОРЫ ДЕЦИМЕТРОВЫХ И САНТИМЕТРОВЫХ ВОЛН

Дециметровые и сантиметровые волны широко применяются в радиолокации, радионавигации и радиосвязи.

Дециметровые и сантиметровые волны имеют следующие преимущества.

1. В их диапазоне можно разместить большое число фиксированных волн, что позволяет работать одновременно большому числу радиостанций без взаимных помех.

2. На этих волнах возможна многоканальная связь, т. е. одновременное осуществление на одной несущей частоте нескольких телефонных разговоров, телеграфных буквопечатающих передач, передач изображений и т. д.

3. Небольшие по размерам и простые по устройству антенные системы позволяют вести остронаправленную радиопередачу. При малой мощности передатчиков достигается связь на большие расстояния.

4. Помехи (соседних радиостанций, промышленные, атмосферные и т. д.) мало влияют на устойчивость радиосвязи.

Радиопередатчики, предназначенные для генерирования дециметровых и сантиметровых волн, существенно отличаются от радиопередатчиков более длинных волн по устройству отдельных узлов и по принципу их действия.

Колебательный контур

Обычный колебательный контур, состоящий из катушки индуктивности и конденсатора, для дециметровых и сантиметровых волн непригоден.

С укорочением волны емкость и индуктивность контура приходится уменьшать. Наконец, они становятся настолько малыми, что выполнить их в виде катушки и конденсатора становится невозможно. Например, уже для волны длиной 1 м колебательный контур представляет собой виток проводника с небольшим конденсатором. Такой контур в натуральную величину изображен на рис. 141.

Для волн короче 40—30 см приходится применять новые виды колебательных контуров, так называемые резонансные линии и объемные резонаторы.

Рис. 141. Колебательный контур (в натуральную величину для волны 1 м)

Резонансные линии

Вибратор, длина которого равна половине длины волны, во многом напоминает обычный колебательный контур. В вибраторе, как и в обычном контуре, могут возникнуть свободные колебания, частота которых зависит от длины вибраторов. При совпадении частоты свободных колебаний с частотой питающего напряжения наступает явление резонанса.

Если согнуть вибратор пополам, то получится четвертьволновая короткозамкнутая линия, которая может быть использована в качестве колебательного контура (рис. 142).

Таким образом, отрезок короткозамкнутой двухпроводной линии длиной в четверть волны является резонансной системой.

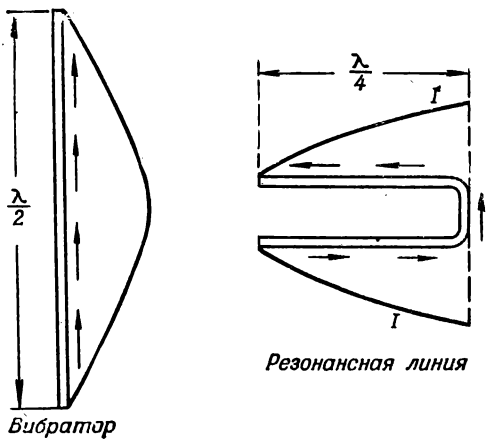


Рис. 142. Переход от полуволнового вибратора к резонансной линии

Из рис. 142 видно, что токи в проводах линии направлены в противоположные стороны, следовательно, магнитные поля, создаваемые проводами, взаимно уничтожаются, поэтому двухпроводная линия почти не излучает энергии в окружающее пространство.

На рис. 143 изображена короткозамкнутая линия и показано распределение тока и напряжения в ней при питании от источника э. д. с. с длиной волны, равной 4 l, т. е. учетверенной длине отрезка линии. Напряжение между короткозамкнутыми концами линии равно нулю.

Настройка двухпроводной линии на разные волны осуществляется короткозамыкающей перемычкой. При передвижении перемычки вправо собственная длина волны линии увеличивается, т. е. резонансная частота уменьшается, и наоборот.

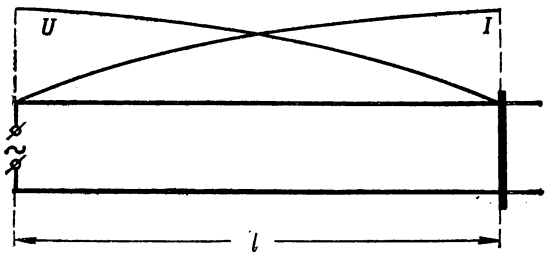


Рис. 143. Распределение тока и напряжения в четвертьволновой короткозамкнутой линии

Помимо двухпроводной линии (из двух параллельных проводов) в качестве контуров применяются *коаксиальные (концентрические) резонансные линии.*

Коаксиальная линия также состоит из двух проводов. Один провод представляет собой трубу, вдоль оси которой расположен другой провод (рис. 144). Настраивать линию можно короткозамыкающим поршнем или специальным конденсатором, как показано на рисунке. Коаксиальная линия практически энергию не излучает, так как электромагнитное поле находится внутри линии.

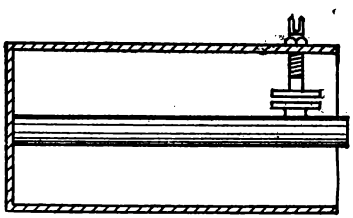


Рис. 144. Коаксиальная резонансная линия

Широкое распространение в качестве контуров резонансные линии получили в диапазоне дециметровых волн. Применять резонансные линии для этой цепи в диапазоне метровых волн практически неудобно, так как размеры линий получаются очень большие.

Объемные резонаторы

На волнах короче 10 см в качестве колебательных контуров используются так называемые *объемные резонаторы.*

Проследим постепенный переход от обычного колебательного контура к объемному резонатору.

На рис. 145, *а* изображен обычный колебательный контур, состоящий из катушки индуктивности L и конденсатора C. С укорочением волны нужно уменьшить индуктивность и емкость контура, и для какой-то волны контур превратится в две пластины конденсатора и один виток проводника (рис. 145, *б*).

Дальнейшее уменьшение индуктивности осуществляется параллельным присоединением нескольких витков к краям обкладок конденсатора (рис. 145, *в*). Если витки заменить металлическими пластинками (рис. 145, *г*) и постепенно увеличивать ширину

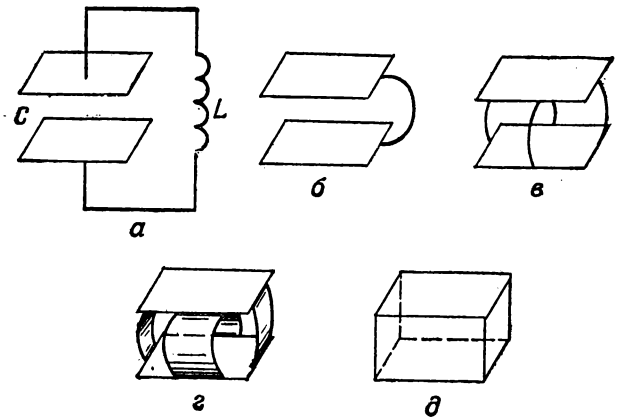


Рис. 145. Постепенный переход от обычного контура к объемному резонатору прямоугольной формы

последних (что приводит к еще большему уменьшению индуктивности контура), то можно в конце концов получить замкнутый прямоугольный объемный резонатор (рис. 145, *д*) в виде коробки.

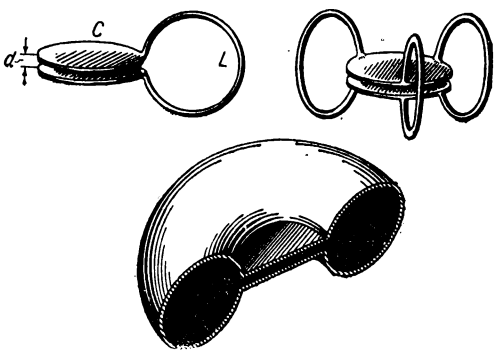


Рис. 146. Постепенный переход от обычного контура к объемному резонатору тороидальной формы

Форма объемных резонаторов может быть различной. Если вместо прямоугольных пластин конденсатора взять круглые пластины, то получится объемный резонатор в форме круглого цилиндра.

На рис. 146 показан постепенный переход от обычного контура, состоящего из конденсатора *C* (с круглыми пластинами) и индук-

тивности L в виде одного витка, к объемному резонатору тороидальной формы.

Собственная частота колебаний объемного резонатора определяется его размерами. Чем меньше объем резонатора, тем выше его собственная частота, и наоборот.

Для возбуждения электромагнитных колебаний в объемном резонаторе внутрь его обычно помещают виток провода или штырек, питаемый переменным током.

Объемные резонаторы обладают очень высокой добротностью (их добротность может быть даже выше добротности кварца), что дает большое усиление напряжения при резонансе и высокую устойчивость частоты колебаний.

Объемные резонаторы не нуждаются в дополнительной экранировке, так как колебания происходят внутри них, переменных напряжений на наружных поверхностях не создается.

Как уже отмечалось, частота собственных колебаний резонатора определяется объемом, изменение которого приводит к изменению частоты.

Электронные лампы

Обычные электронные лампы, рассмотренные нами выше, для работы на дециметровых и сантиметровых волнах непригодны.

Прежде всего сказывается индуктивность выводов на сверхвысоких частотах. Как бы ни были малы выводы, соединяющие внешнюю цепь с электродами ламп, их индуктивность оказывает влияние на работу схемы.

В первых лампах для дециметровых волн делалось по нескольку параллельных и притом коротких выводов к одному и тому же электроду, что приводило к уменьшению общей индуктивности.

Большое влияние оказывают в этом диапазоне также емкости между электродами и их выводами. На длинных и коротких волнах эти емкости практически не влияют на общую емкость контура, так как их величина очень мала. На дециметровых волнах междуэлектродные емкости становятся соизмеримыми с емкостью контура, что приводит к заметному изменению настройки контуров, появлению дополнительных связей между различными частями схемы и т. д. В лампах, предназначенных для работы в дециметровом диапазоне волн, применяют специальные меры для уменьшения указанных емкостей: электроды делают небольших размеров, выводы от них разносят дальше один от другого, сами выводы делают короткими и т. д.

Наконец, в диапазоне дециметровых и особенно сантиметровых волн время пролета электрона с катода на анод становится соизмеримо с периодом колебаний. Для пролета электронов с катода на анод требуется около одной миллиардной доли секунды. При работе лампы на длинных и коротких волнах с этим временем можно не считаться, так как оно значительно меньше периода колебаний.

На дециметровых и тем более сантиметровых волнах период колебаний становится соизмеримым с временем пролета электронов. Так, для волны 30 см период колебаний равен одной миллиардной доле секунды, т. е. равен времени пролета электрона. На волнах короче 30 см величина периода колебаний меньше времени пролета электронов. Это приводит к тому, что электронный поток не успевает следовать за изменениями напряжения на управляющей сетке, вследствие чего анодный ток лампы не будет изменяться одновременно с изменением напряжения на ней. Пока электроны летят к аноду, переменное напряжение на сетке успеет измениться по величине и знаку. Будет происходить уменьшение амплитуды и мощности генерируемых колебаний, и даже возможно прекращение генерирования вообще.

Практически считается, что лампа работает неудовлетворительно, если время пролета электронов через нее составляет больше одной десятой периода колебаний.

Лампы с обычным сеточным управлением, применяемые для дециметровых волн, имеют специальную конструкцию. Расстояние между электродами в этих лампах очень мало. Чтобы не допускать увеличения расстояния между катодом и анодом, применяют обычно только триоды. Введение дополнительных сеток привело бы к увеличению расстояния.

Пентоды используют (хотя и крайне редко) для приемных устройств, работающих на волнах не короче 70—60 см.

Триоды с дисковыми выводами

Триоды с дисковыми выводами бывают двух типов: металлокерамические и металлостеклянные. Внешний вид металло-

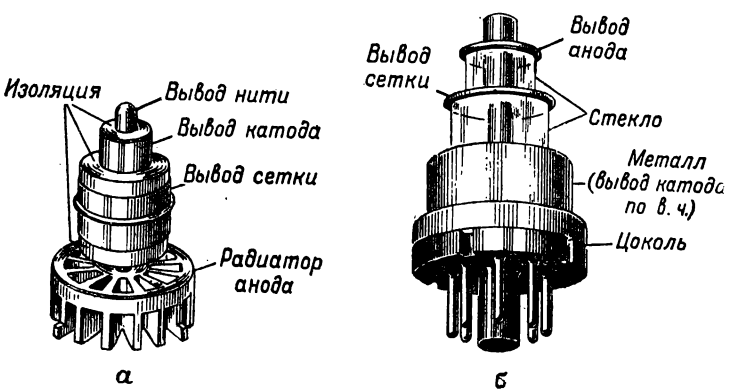


Рис. 147. Триоды с дисковыми выводами для дециметровых волн:
а — металлокерамический триод; *б* — металлостеклянный триод

керамического триода для дециметровых волн приведен на рис. 147, *а*, металлостеклянного — на рис. 147, *б*. Эти триоды хорошо работают на волнах не короче 10 см. Специальная конструк-

ция их позволила уменьшить индуктивность выводов и время пролета электронов.

Принципиально эти триоды между собой не различаются. На рис. 148 схематически показано устройство металлостеклянного триода. Он имеет плоские электроды. Анод и катод выполнены в виде цилиндров, между торцами которых расположена сетка. Это

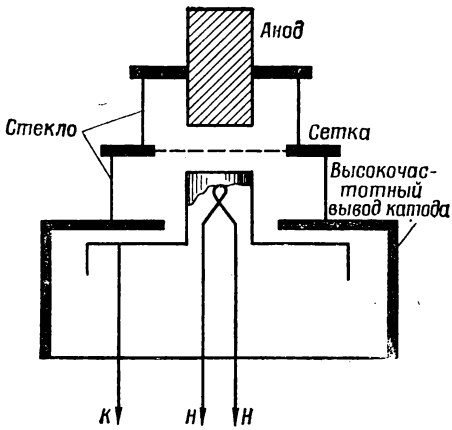


Рис. 148. Схематическое устройство металлостеклянного триода

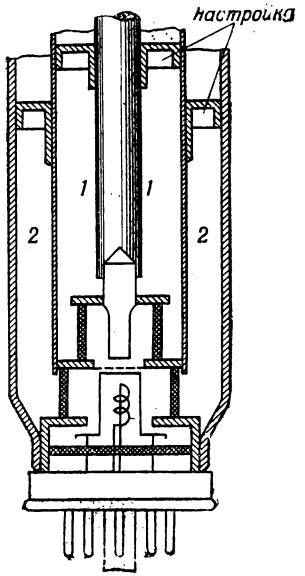


Рис. 149. Схематическое устройство генератора на триоде с дисковыми выводами

дает возможность установить небольшие расстояния между электродами (доли миллиметра), что значительно уменьшает время пролета электронов. Через емкость между металлическими дисками катод имеет отдельный вывод по высокой частоте.

Дисковые выводы электродов в форме колец разного диаметра позволяют соединять лампу с колебательными контурами непосредственно, без дополнительных проводов. Сами же диски имеют ничтожную индуктивность.

В генераторе диски входят в специальные полые металлические цилиндры, которые и служат колебательными системами в цепях ламп (рис. 149). Линия *1* включена между сеткой и анодом, а линия *2* — между сеткой и катодом. Сверху отверстия между трубами закрыты металлическими перемычками, замыкающими накоротко резонансные линии. Передвижением этих перемычек осуществляется настройка линий на определенную волну.

К недостаткам триода относится плохая отдача тепла вследствие небольшого размера анода. При работе нагревшиеся элек-

троды могут коснуться один другого. Чтобы избежать этого, на анод навинчивается ребристый радиатор, охлаждаемый обычно воздухом. Все это, конечно, усложняет конструкцию триода.

КЛИСТРОН

Для генерирования сантиметровых волн короче 10 см непригодны и триоды с дисковыми вводами. Вообще говоря, от ламп с электростатическим управлением электронным потоком в

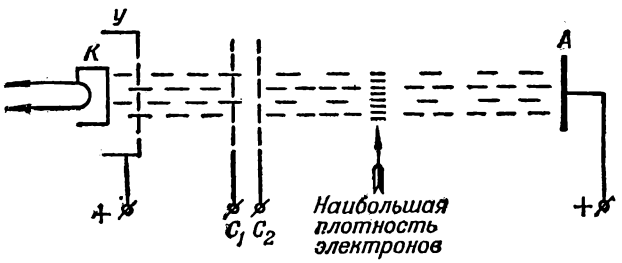


Рис. 150. Принцип образования электронных групп в клистроне

диапазоне сантиметровых волн нельзя получить больших колебательных мощностей вследствие малых размеров самих электродов. Кроме того, из-за малых междуэлектродных расстояний производство этих ламп довольно сложно.

Электронные приборы с динамическим управлением электронным потоком позволяют получить большую мощность и более высокую частоту колебаний. В этих приборах равномерный электронный поток преобразуется в электронный поток с переменной плотностью, т. е. в пульсирующий электрический ток. Это преобразование осуществляется с помощью переменного электрического поля.

Лампу и объемные колебательные системы в диапазоне сантиметровых волн пришлось объединить в одну систему. *Клистрон* и представляет собой одну из таких генераторных систем.

Клистроны различных конструкций применяют как для генерирования, так и для усиления колебаний сверхвысоких частот.

Рассмотрим принцип работы клистрона (рис. 150). Катод *К* излучает поток электронов, которые под действием положительного напряжения на ускоряющем электроде *У* получают ускорение и, пройдя сетки C_1 и C_2, попадают на собирающий электрод *А* (анод). Электрод *А* находится под высоким положительным потенциалом (свыше 1000 В).

Если на сетках C_1 и C_2 нет переменного напряжения, то в лампе установится равномерный поток электронов, летящий с какой-то скоростью *V*.

Предположим, что между сетками C_1 и C_2 действует переменное напряжение высокой частоты. Когда на сетке C_2 будет положительное напряжение, а на сетке C_1 — отрицательное, электроны,

находящиеся между сетками, получат ускорение ΔV и будут продолжать движение со скоростью $V+\Delta V$.

Когда же на сетке C_1 будет положительное напряжение, а на сетке C_2 — отрицательное, электроны получат замедление и, пройдя сетки, будут двигаться со скоростью $V-\Delta V$.

Пройдя сетки, электроны летят с разными скоростями к аноду. Электроны, летящие со скоростью V, догоняют электроны, летящие со скоростью $V-\Delta V$. Электроны, летящие со скоростью $V+\Delta V$, догоняют электроны, летящие со скоростью V. На определенном расстоянии от сеток, зависящем от величины напряжения на ускоряющем электроде $У$ и частоты переменного напряжения на сетках C_1 и C_2, происходит образование отдельных групп электронов, или, как говорят, *группирование электронов.* Затем группы электронов снова расходятся.

Таким образом, в клистроне равномерный поток электронов небольшой плотности превращается в поток, состоящий из отдельных групп электронов значительной плотности, т. е. в пульсирующий ток. Частота пульсаций зависит от частоты переменного напряжения, подводимого к сеткам C_1 и C_2.

Эти группы электронов могут отдавать большую энергию отдельными импульсами.

Итак, модуляция электронного потока по скорости преобразуется в процессе группирования электронов в модуляцию потока по плотности.

Таким образом, от катода K до сеток C_1—C_2 протекает постоянный ток. В цепи электрода A протекает пульсирующий ток, и если в эту цепь включить колебательный контур, настроенный на частоту пульсаций, то в контуре возникнут незатухающие колебания. Мы получим генератор с независимым возбуждением, или усилитель. Подведя часть колебательной энергии от контура к сеткам C_1—C_2 для создания на них переменного модулирующего напряжения, мы получим генератор с самовозбуждением.

Время полета электронов от катода к аноду в приборах со скоростной модуляцией не препятствует получению колебаний в диапазоне сантиметровых волн, как в лампах с электростатическим управлением. Наоборот, время пролета электронов от сеток C_1—C_2 до электрода A должно быть достаточно большим, чтобы электроны успели сгруппироваться в отдельные группы большой плотности: оно должно быть в несколько раз больше периода возбуждаемых колебаний.

Приборы со скоростной модуляцией выгодно применять в диапазоне сантиметровых волн. В диапазоне более длинных волн эти приборы не применяются, так как они становятся слишком громоздкими и работают неустойчиво по сравнению с обычными лампами.

На участке наибольшей плотности электронов (рис. 151) помещается объемный резонатор. Группы электронов, пролетая через сетки резонатора, индуктируют в нем переменные электрические заряды, в результате чего по стенкам резонатора протекает пере-

менный электрический ток. При совпадении частоты следования групп электронов с собственной частотой резонатора наступает явление резонанса. В резонаторе устанавливаются незатухающие колебания, которые и используют.

В обычном ламповом генераторе колебательный контур пополняет свою энергию за счет периодического подзаряда конденсатора пульсирующим током батареи; пульсации создаются с помощью лампы. В клистроне колебательная энергия в объемном резона-

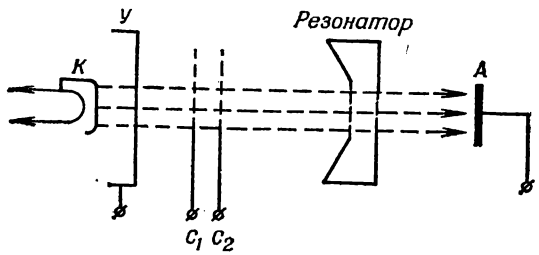


Рис. 151. Принцип работы клистрона

торе пополняется непосредственно пульсирующим электронным потоком. Электроны, попадая в поле резонатора, тормозятся, отдавая при этом часть своей кинетической энергии. Происходит передача энергии от электронов полю резонатора через наводимые в резонаторе заряды.

Отдавшие свою энергию электроны вылетают из резонатора с уменьшенными скоростями и собираются на электроде *А*, который обычно называют *коллектором*.

Рассмотрим, откуда поступает переменное напряжение высокой частоты на сетки клистрона. Если клистрон используется в качестве усилительного каскада, то напряжение поступает от задающего генератора. Обычно клистрон используется как генератор с самовозбуждением. В этом случае напряжение на сетки подается от резонатора через виток обратной связи.

Практически сетки C_1 и C_2 являются составной частью второго резонатора, который называется *группирователем*.

Большое распространение получил так называемый *отражательный клистрон* с одним резонатором. Он генерирует меньшую мощность, чем двухрезонаторный клистрон, и используется обычно в качестве гетеродина в схемах приемников сантиметровых волн.

Возникшие в резонаторе отражательного клистрона свободные колебания изменяют скорость пролетающих электронов. Обратная связь достигается вторичным прохождением уже сгруппировавшихся электронов через резонатор. Это осуществляется за счет отрицательного напряжения на отражающем электроде (рис. 152). При обратном (вторичном) прохождении сгруппировавшиеся электроны поддерживают в резонаторе незатухающие колебания.

Генерируемую частоту в клистронах изменяют изменением объема резонатора.

Генерирование и усиление сверхвысокочастотных колебаний для практических целей стало возможным с появлением клистронов. Это объясняется тем, что в клистронах используется метод скоростной модуляции для преобразования постоянного электронного потока в переменный, и, кроме того, осуществляется непосредственное взаимодействие электронного потока с электромагнитными полями колебательных систем (объемных резонаторов).

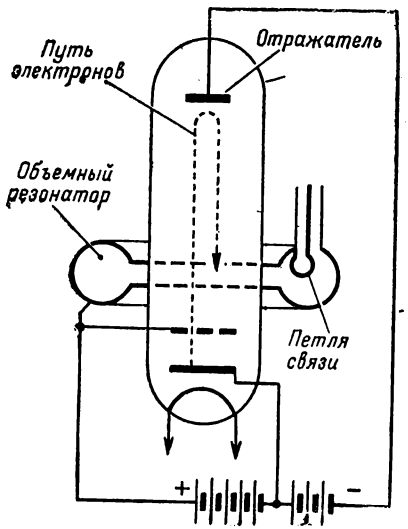


Рис. 152. Принцип работы отражательного клистрона

Но клистроны имеют и недостатки:

— кратковременность взаимодействия электронного потока с электромагнитным полем резонаторов, вследствие чего высокочастотному полю передается недостаточная часть энергии электронов;

— низкая чувствительность усилительных клистронов; это объясняется малой эффективностью взаимодействия электронного потока с электромагнитным полем при сравнительно высоком уровне собственных шумов в клистроне;

— недостаточно широкая полоса пропускания частот.

Эти недостатки до некоторой степени устраняются в лампах с бегущей волной.

ЛАМПА БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ

В клистронах электронный поток взаимодействует с электромагнитным полем, находящимся в ограниченном пространстве резонатора, в течение весьма короткого промежутка времени. В лампе бегущей волны происходит непрерывное взаимодействие электронов с электромагнитным полем, перемещающимся («бегущим») в направлении движения электронов приблизительно с той же скоростью, что и электроны. При таком одновременном перемещении электроны, находящиеся в той части поля, где они тормозятся, будут полностью отдавать свою энергию полю.

При ускоряющем напряжении 2—3 кВ скорость электронов составляет примерно 1/10 скорости света. Следовательно, чтобы получить электромагнитное поле, скорость которого была бы одного порядка со скоростью движения электронов, необходимо скорость поля замедлить примерно в 10 раз. Это делается с помощью коаксиальной линии, в которой внутренний провод свернут в форме спирали. При прохождении переменного тока по спирали электро-

магнитное поле его распространяется вдоль витков спирали со скоростью света, а вдоль оси спирали скорость распространения поля во столько раз меньше, во сколько раз шаг спирали короче длины витка:

$$\frac{V_0}{c} = \frac{l}{2\pi r},$$

где V_0 — скорость поля по оси;
c — скорость света;
l — шаг спирали (расстояние между витками);
r — радиус витка.

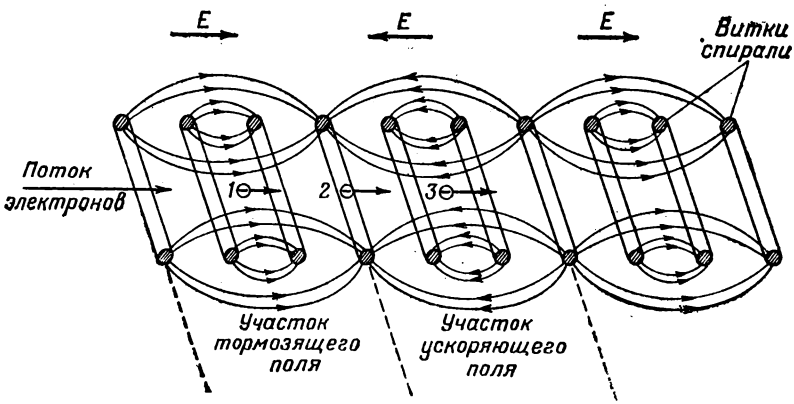


Рис. 153. Взаимодействие электронов с электрическим полем в лампе бегущей волны

На рис. 153 изображено мгновенное значение напряженности поля (с помощью силовых линий) вдоль оси спирали. Предположим, поле перемещается слева направо. Если по оси спирали в том же направлении будет двигаться поток электронов со скоростью поля, то электроны, находящиеся в точке *1*, будут все время тормозиться, электроны, находящиеся в точке *3*, — непрерывно ускоряться, а электроны, находящиеся в точке *2*, — двигаться со своей начальной скоростью (поле в осевом направлении равно нулю). Вследствие изменения скоростей электронов в областях *1* и *3* будет происходить сгруппирование электронного потока. Создающаяся в электронном потоке переменная составляющая тока будет индуктировать в спирали переменную э. д. с., частота которой равна частоте подводимых колебаний. Таким образом будет происходить непрерывное усиление колебаний от начала линии к ее концу.

Электроны, испытывающие ускорение, отбирают энергию от электромагнитного поля, а электроны, которые тормозятся электрическим полем, отдают ему свою энергию.

Лампы бегущей волны (ЛБВ) используются как для усиления, так и для генерирования высокочастотных колебаний. В за-

висимости от того, с какой волной (прямой или обратной) осуществляется взаимодействие, различают лампы прямой и обратной волны (ЛПВ и ЛОВ). В лампах прямой волны движение электромагнитной энергии совпадает с направлением движения электронного потока, в лампах обратной волны электромагнитная энергия движется навстречу электронному потоку.

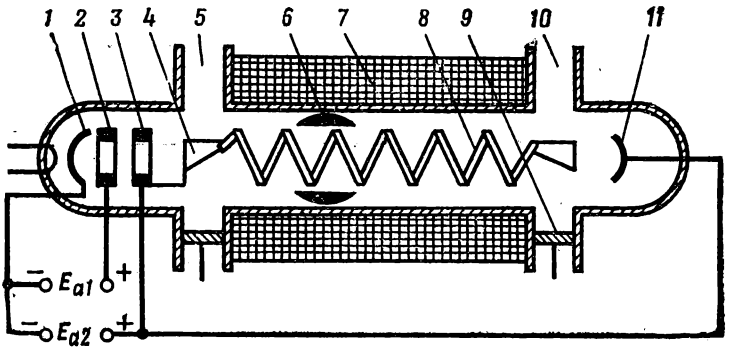


Рис. 154. Лампа бегущей волны — усилитель:

1 — катод; *2* — первый анод; *3* — второй анод; *4* — широкополосный приемный вибратор; *5* — входной волновод; *6* — поглотитель; *7* — фокусирующая катушка; *8* — спираль; *9* — согласующий шлейф; *10* — выходной волновод; *11* — коллектор

На рис. 154 показано схематическое устройство лампы прямой волны. Электронный поток создается устройством, состоящим из катода *1*, первого *2* и второго *3* анодов. По волноводу *5* на вход замедляющей линии *8* подается усиливаемый сигнал, который через конический широкополосный приемный вибратор *4* возбуждает бегущую волну в линии. Вдоль линии движется пучок электронов. В начале замедляющей линии под влиянием волны происходит скоростная модуляция электронного потока. Сгустки электронов отдают свою энергию волне, амплитуда которой многократно возрастает на пути к выходу. Электроны потока, прошедшие замедляющую систему, попадают на коллектор *11*, на котором рассеивается их кинетическая энергия, усиленная волна поступает в волновод *10*. Для предотвращения расхождения пучка электронов служит фокусирующая катушка *7*. В лампе предусмотрены согласующие шлейфы *9*.

Усилители на лампах бегущей волны имеют большой коэффициент усиления (до сотен тысяч раз). Если связать выход со входом, то лампу бегущей волны можно использовать в качестве генератора. Это можно осуществить рассогласованием на конце линии, тогда часть энергии будет отражаться и возвращаться на вход линии. Если отраженная волна совпадет по фазе с волной на входе, произойдет самовозбуждение. В усилителях самовозбуждения избегают, но поскольку некоторое рассогласование всегда

практически существует, то в средней части замедляющей системы ставят специальный поглотитель, гасящий обратные волны.

Полоса пропускания усилителя на лампе прямой волны широкая, поскольку отсутствуют резонансные системы. Область использования этих усилителей — дециметровые, сантиметровые и миллиметровые волны. В качестве генераторов лампы прямой волны используются редко, так как получение определенной фазы отраженной волны значительно сужает рабочий диапазон генерируемых частот. В этом отношении имеет преимущество лампа обратной волны.

Лампа обратной волны

Кроме спиралей в лампах бегущих волн применяются и другие замедляющие системы. Широкое распространение получили гребенчатые линии (рис. 155). Волна последовательно «обегает»

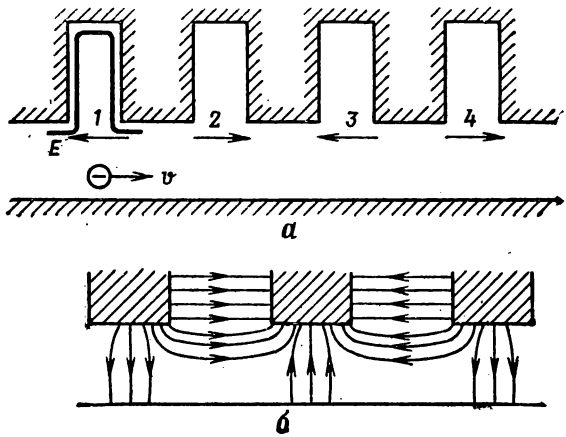


Рис. 155. Гребенчатая замедляющая система

щели гребенки, в результате чего и получается замедление. Бегущая волна создает между краями щели разность потенциалов и продольное поле (рис. 155, *а*), которое взаимодействует с потоком электронов.

Предположим, что в данный момент времени в щелях *1*, *3* и т. д. имеется максимальное тормозящее поле, созданное электромагнитной волной, распространяющейся вдоль гребенчатой системы справа налево. В спиральной замедляющей системе поток электронов, двигаясь навстречу волне, не смог бы с ней эффективно взаимодействовать, поскольку электроны подвергались бы воздействию то ускоряющего, то замедляющего поля. В данном случае эффективное взаимодействие возможно. Между краями щелей имеется максимальное продольное поле, а под зубцами его нет (рис. 155, *б*). Первую щель электрон проходит, находясь под воздействием тормозящего поля волны, отдавая ему часть своей энер-

гии. Под зубцом он проходит по инерции, не испытывая воздействия идущей навстречу волны, так как продольная составляющая поля там всегда равна нулю. Под первой щелью и зубцом электрон проходит за время, равное времени полупериода волны. Подходя ко второй щели, электрон снова попадает в продольное тормозящее поле волны. За полпериода направление поля изменилось, теперь оно стало тормозящим в щелях *2*, *4* и т. д. Следовательно, в такой замедляющей системе возможны как группирование потока электронов, так и передача энергии волне.

Периодические системы, на отдельных участках которых действует переменное электрическое продольное поле, а на других отсутствует, называют неоднородными системами. В спиралях на всех участках действуют поля, поэтому они называются однородными системами.

Приборы, в которых осуществляется энергетическое взаимодействие потока со встречной волной, распространяющейся вдоль неоднородной замедляющей системы, называют *лампами обратной волны*.

Для работы лампы обратной волны необходимо, чтобы скорости потока электронов и электромагнитной волны были равны по величине и обратны по знаку.

В качестве усилителя лампа обратной волны используется очень редко. Часть пути электроны не взаимодействуют с полем волны, усиление этих ламп меньше, чем ламп прямой волны. Кроме того, встречное движение потока и волны создают в приборе естественную обратную связь, что затрудняет устранение самовозбуждения. Поэтому лампы обратной волны главным образом используются в качестве генераторов.

Колебания в лампе обратной волны возникают так же, как в любом генераторе. При включении питающих напряжений в замедляющей системе возникает импульс тока заряда распределенных емкостей. Создаются колебания спектра частот, и вдоль системы бегут затухающие волны. Та из них, для которой будет выполнено условие самовозбуждения, начнет модулировать встречный поток по скорости. Образуются сгустки электронов, которые будут пополнять энергию этой волны, и колебания возникнут. Диапазоны использования лампы обратной волны те же, что и лампы прямой волны.

В рассмотренных генераторах бегущих волн преобразование энергии осуществляется торможением электронов (потерей ими части кинетической энергии, приобретенной под действием источника ускоряющего напряжения). Такие генераторы принято относить к классу О. В генераторах этого класса трудно получить высокий коэффициент полезного действия, так как электроны не могут терять большую долю кинетической энергии, поскольку это может привести к нарушению приблизительного равенства скоростей потока и волны. В мощных генераторах, которые относятся к классу М, взаимодействие потока с полем волны осуществляется в пересекающихся постоянных электрическом и магнитном полях.

МАГНЕТРОН

Для генерирования мощных колебаний в сантиметровом диапазоне служат электронные приборы, называемые магнетронами.

В отличие от всех остальных ламп, где электронным потоком управляет электрическое поле, в магнетроне электронным потоком управляет магнитное поле.

Мы знаем, что если в магнитное поле поместить проводник с током, то возникает сила, которая будет выталкивать проводник. Направление выталкивания проводника определяется по правилу левой руки. Так как ток в проводнике — это движение свободных электронов, то магнитное поле должно оказывать влияние на движение электронов в пространстве.

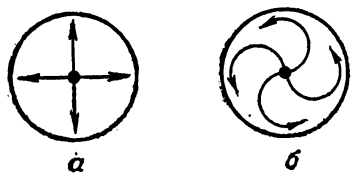


Рис. 156. Траектория электронов в магнетроне

Магнетрон представляет собой диод, находящийся между полюсами сильного постоянного магнита, поле которого направлено параллельно катоду. Катод расположен по оси цилиндрического анода. Электронный поток в магнетроне находится под действием двух полей — электрического и магнитного.

Если бы не было магнитного поля, то электроны, излучаемые катодом, летели бы к аноду по радиусам (рис. 156, *а*). Магнитное поле изменяет направление движения электронов: они как бы «закручиваются» вокруг катода (рис. 156, *б*). Степень отклонения электронов от прямолинейного движения по радиусам зависит от силы магнитного и электрического полей. Чем сильнее магнитное поле и слабее электрическое поле, тем больше искривляется путь электрона.

Магнитное поле не изменяет скорости электрона, оно только изменяет траекторию его движения. Скорость электрона зависит от величины электрического поля. Поэтому кинетическая энергия электрона в магнитном поле не изменяется.

Электроны вылетают из катода с разными скоростями, поэтому они описывают кривые разных радиусов. В пространстве между катодом и анодом образуется вращающийся вокруг катода поток электронов.

Магнетроны со сплошным анодом. Разберем работу магнетрона со сплошным неразрезным анодом (рис. 157). К аноду магнетрона приложено постоянное анодное напряжение U_0. Вдоль оси цилиндра приложено магнитное поле H. Между анодом и катодом магнетрона подключен колебательный контур в виде отрезка двухпроводной линии, собственная частота которого изменяется передвижением перемычки $П$. При настройке колебательного контура на частоту вращения магнитного потока в магнетроне в контуре возникают незатухающие колебания. Разделительные кон-

денсаторы C_1 и C_2 предотвращают замыкание источника анодного напряжения через контур. Дроссель *Др* не допускает замыкания высокочастотных колебаний через источник анодного напряжения.

При возникновении высокочастотных колебаний в контуре на постоянное анодное напряжение накладывается переменное напряжение колебательного контура. В результате взаимодействия электронов с переменным полем в контуре поддерживаются незатухающие колебания.

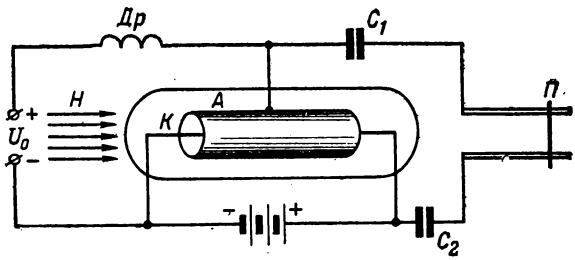


Рис. 157. Упрощенная схема магнетронного генератора со сплошным анодом

Не все электроны отдают свою энергию высокочастотному полю. Электроны, вылетающие из катода при положительном полупериоде переменного напряжения, т. е. когда напряжение на аноде больше постоянного напряжения U_0, получают ускорение, а следовательно, отбирают энергию от переменного поля. Если напряжение U_0 равно некоторому определенному напряжению, называемому критическим, то эти электроны дойдут до анода. Если же напряжение U_0 меньше критического, то электроны до анода не дойдут, они будут «закручены» магнитным полем и пойдут на катод. При своем движении к катоду электроны продолжают отбирать энергию. Они получают ускорение при отрицательном полупериоде переменного напряжения, когда напряжение анода уменьшается по сравнению с U_0. Таким образом, эти электроны в течение всего периода забирают энергию от переменного поля и, следовательно, играют отрицательную роль в колебательном процессе.

Иначе обстоит дело, когда электроны вылетают и летят при отрицательном полупериоде переменного напряжения. Электроны, ускоряемые постоянным напряжением U_0, тормозятся переменным отрицательным напряжением, отдавая при этом часть своей энергии. Скорость электронов уменьшается, до анода они не дойдут. При своем движении к катоду они продолжают тормозиться уже сменившимся положительным полупериодом переменного напряжения на аноде, т. е. продолжают отдавать свою энергию переменному полю. Не доходя до катода, электроны начинают повторное движение к аноду (рис. 158) и т. д. Электроны непрерывно отдают свою энергию вращательного движения переменному полю до тех пор, пока не отдадут ее всю. Если электроны отдадут всю

свою энергию, не дойдя до анода, то они начнут забирать энергию поля, т. е. начнут играть вредную роль. Для того чтобы удалить «отработавшие» электроны из пространства катод — анод, магнитное поле направляют под небольшим углом к оси магнетрона и устанавливают специальные коллекторные диски у торцовых концов анода.

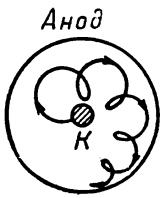


Рис. 158. Движение электронов в магнетроне со сплошным анодом

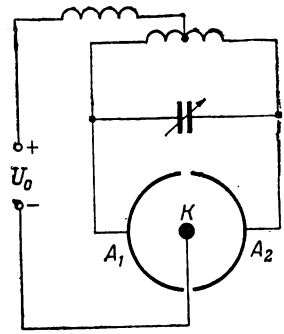


Рис. 159. Подключение колебательной системы к магнетрону с разрезным анодом

Электроны, вылетающие с неправильной фазой, забирают энергию у переменного поля в течение одного оборота (попадают на катод). Правильно сфазированные электроны отдают энергию полю в течение нескольких оборотов. Таким образом, поле получает от электронов энергии больше, чем отдает, поэтому в контуре возникают незатухающие колебания.

Магнетроны со сплошным анодом широкого распространения не получили, так как довольно трудно обеспечить правильную фазировку и удаление из междуэлектродного пространства «отработавших» электронов, вследствие чего мощность и к. п. д. магнетрона получаются небольшими.

Колебания в магнетроне возникают легче, если анод разрезать вдоль на две части и к ним подключить колебательную систему (рис. 159).

Для увеличения колебательной мощности аноды разрезают на четыре или шесть сегментов, которые соединяют между собой через один в две группы.

Многорезонаторный магнетрон. При практическом использовании магнетронов с разрезанными на несколько сегментов анодами и с одной внешней колебательной системой встретились трудности. Для уменьшения емкости между анодами и индуктивности соединений между ними необходимо было уменьшить размеры электродов, а это приводило к уменьшению полезной мощности магнетрона. Тогда стали применять несколько колеба-

тельных систем, подключенных между соседними анодами (рис. 160).

В этом случае можно уменьшить до малых значений емкость и индуктивность каждого контура при довольно больших электродах. Контуры настраиваются на одну частоту, и общая мощность получается большая.

Многорезонаторные магнетроны получили широкое распространение в качестве мощных генераторов сантиметровых волн в импульсных радиотехнических установках.

Устройство многорезонаторного магнетрона показано на рис. 161. В центральной части массивного анодного блока *1* вдоль его оси имеется широкая полость, в середине которой расположен катод *4*, прикрытый с торцов дисками *7*. Вокруг центральной полости в анодном блоке высверлено несколько отверстий (резонансных полостей *2*), соединенных с центральной полостью продольными щелями (пазами *3*). Внутренняя полость каждого отверстия с его щелью образует объемный резонатор. Частота собственных колебаний объемного резонатора определяется его размерами (размером отверстия в щели). Каждый резонатор подобен одному

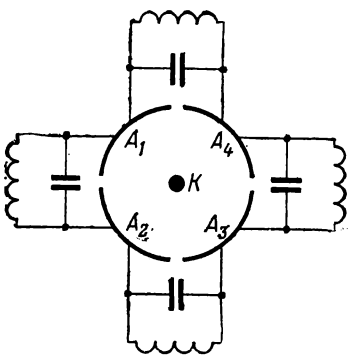


Рис. 160. Схема подключения колебательных систем между соседними анодами

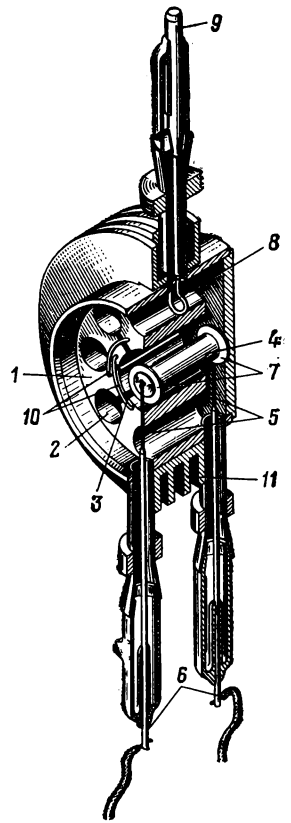


Рис. 161. Многорезонаторный магнетрон:

1 — анодный блок; *2* — резонансные полости; *3* — пазы резонаторов; *4* — катод; *5* — держатели катода; *6* — выводы накала; *7* — охранные диски катода; *8* — петля связи; *9* — вывод высокой частоты; *10* — связки анодного блока; *11* — радиатор

плоскому витку, подключенному в конденсатору. Конденсатором служат грани продольной щели. Все резонаторы электрически связаны между собой перемычками. Напряжение на резонаторах по отношению к катоду одно и то же.

Наиболее сильное электрическое поле высокой частоты резонатора создается в его щели, наиболее сильное высокочастотное магнитное поле резонатора — внутри цилиндрической поверхности. Все резонаторы своими полями сильно связаны между собой, поэтому для вывода высокочастотной энергии из магнетрона достаточно одного витка связи, помещенного внутри одного из резонаторов.

Токи высокой частоты проникают в глубь стенок резонатора на ничтожно малую величину, поэтому резонаторы электрически как бы изолированы один от другого толщей металла.

Подбором величины магнитного поля режим работы магнетронов устанавливают таким, чтобы электроны совершали свои повороты вблизи анода. В этом случае вокруг анода образуется кольцевой непрерывный электронный поток. Поток электронов движется настолько близко от анода, что небольшое нарушение равновесия в нем создает импульсы тока в анодной цепи. Эти импульсы тока при наличии колебательной системы способны создать режим незатухающих колебаний.

Расстояние между кольцевым электронным потоком и анодом невелико, поэтому время пролета электрона ничтожно, вследствие чего возможна генерация очень коротких волн (вплоть до долей сантиметра).

Чтобы получить незатухающие колебания в резонаторах за счет энергии потока электронов, необходимо, чтобы электроны последовательно пролетали мимо щелей резонаторов в тот момент, когда их поле будет тормозящим. В этом случае электроны будут отдавать свою энергию.

Наиболее выгодный режим работы магнетрона получается, когда колебания в соседних резонаторах сдвинуты по фазе на полпериода. В этом случае тормозящее поле появляется через полпериода, следовательно, за это время электроны должны пролететь расстояние между щелями. Это осуществляется подбором напряженности магнитного поля и анодного напряжения.

На рис. 162 электрон $Э_1$ вылетает в тот момент, когда он попадает в тормозящее поле резонатора *2*. Через полпериода картина колебательного процесса изменяется, но при этом изменяется и положение электрона: электрон $Э_1$ опять попадает в тормозящее поле резонатора *3* и т. д. Электрон $Э_1$ последовательно отдает свою энергию полю резонатора. Потеряв всю энергию, он попадает на анод.

Электроны получают энергию от источника анодного напряжения и отдают ее высокочастотному полю. Происходит преобразование энергии источника тока в высокочастотную.

Иначе обстоит дело с вылетевшим из катода электроном $Э_2$. Он попадает в ускоряющее поле резонатора *1*, следовательно, он

отбирает энергию у поля и попадает на катод. Кинетическая энергия падающего электрона переходит в тепловую энергию, катод нагревается.

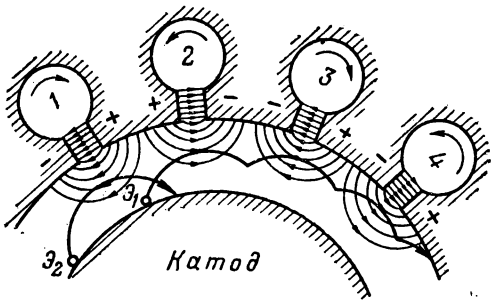


Рис. 162. Движение электронов в многорезонаторном магнетроне

В общей сложности электронный поток отдает высокочастотному полю больше энергии, чем ее отбирает, поэтому в магнетроне возникают незатухающие колебания.

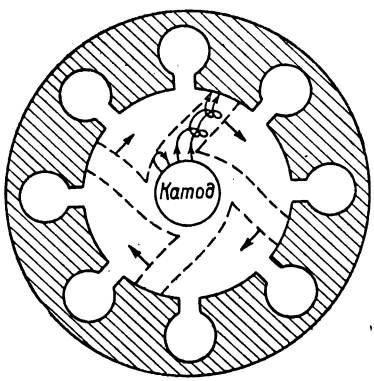


Рис. 163. Поперечный разрез многорезонаторного магнетрона

В пространстве между катодом и анодом происходит группирование электронов. Электроны, вылетающие из катода и попадающие в ускоряющее поле, после одного оборота возвращаются на катод. Поэтому против щелей, у которых в данный момент ускоряющее поле, электронов меньше, чем против щелей с тормозящим полем. Электронный поток разбивается на несколько сгустков («спиц») в зависимости от числа резонаторов в магнетроне (рис. 163).

Через полпериода направление поля в резонаторах меняется на противоположное, и сгустки электронов перемещаются на один резонатор.

Генерирование мощных колебаний в диапазоне сантиметровых волн осуществляется главным образом многорезонаторным магнетроном. Его к. п. д. значительно выше, чем у клистрона.

Более подробное изложение вопросов, связанных с техникой дециметровых и сантиметровых волн, читатель может найти в специальных пособиях.

ПЛАТИНОТРОН

Принцип работы платинотрона тот же самый, что и магнетрона. По конструкции они почти полностью совпадают.

В платинотроне (рис. 164) замедляющая система не образует замкнутую резонансную систему. В одном месте система связок, соединяющая резонаторы, разрывается, образуя вход и выход.

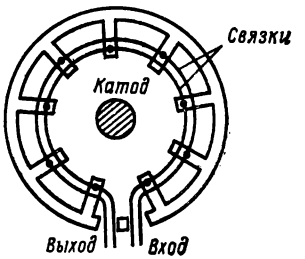


Рис. 164. Схематическое устройство платинотрона

Платинотрон, работающий в качестве усилителя, называют *амплитроном*. Платинотрон, работающий в автоколебательном режиме, называют *стабилитроном*.

К достоинствам платинотрона относятся: высокий коэффициент полезного действия, большая мощность, широкая полоса пропускания в режиме усиления, более низкое анодное напряжение по сравнению с клистронами и лампами бегущих волн, малые габариты и вес прибора.

К недостаткам платинотрона относится сравнительно невысокий коэффициент усиления.

В платинотроне также происходит преобразование энергии анодного источника постоянного тока предварительно в кинетическую энергию электронного потока, а затем в энергию электромагнитных колебаний. На предварительную группировку электронного потока затрачивается относительно небольшая энергия.

Глава 11

РАДИОПРИЕМНЫЕ УСТРОЙСТВА

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Основные задачи приемного устройства

Если в электромагнитном поле находится антенна, то в ней под влиянием этого поля появляется переменный ток, частота которого совпадает с частотой электромагнитных колебаний. Другими словами, в приемной антенне появляется переменный ток той же частоты, что и переменный ток в передающей антенне.

Первая задача приемного устройства — извлечь энергию радиоволны из пространства. Это осуществляется приемной антенной.

Вторая задача — выделить сигналы нужной станции из множества колебаний, создаваемых в антенне работающими радиостанциями. Свойство приемника выделять необходимые сигналы называется *избирательностью* (или селективностью).

Третья задача — усилить принятые колебания.

Радиостанция излучает волны во все стороны, к антенне принимающей станции приходит только ничтожно малая доля общей излученной энергии. С увеличением расстояния между передающей и принимающей станциями слышимость приема падает, и при каком-то расстоянии, зависящем от мощности передающей станции, прием становится невозможным.

Рассеивание энергии радиоволн с увеличением расстояния от передающей радиостанции происходит подобно рассеиванию световой энергии от обычного источника света. С увеличением расстояния освещенность уменьшается. Это объясняется тем, что объем пространства, в котором распространяется световая энергия, увеличивается. На долю одной и той же поверхности приходится меньше света.

Если учесть потери, которые получаются при распространении радиоволны, то становится очевидным, что использовать принятые колебания без предварительного их усиления практически невозможно. Усиливаются принимаемые колебания при помощи электронных ламп или полупроводниковых приборов.

Четвертая задача приемника — выделить из колебаний высокой частоты колебания низкой частоты (*детектирование* колебаний).

Выделенные колебания низкой частоты передаются непосредственно или после дополнительного усиления к телефону (к громкоговорителю) или к записывающей аппаратуре.

Радиоприемник состоит из каскадов (блоков), выполняющих различные функции. Приемники бывают различных типов, но все они представляют собой комбинации сравнительно небольшого числа отдельных элементов, рассмотрением которых мы и ограничимся. Зная работу и назначение этих элементов, легко разобраться в устройстве и работе любого радиоприемника.

Основные показатели приемников

К основным показателям приемников относятся:

— диапазон волн (или частот);
— чувствительность;
— избирательность;
— точность воспроизведения сигналов.

Диапазон волн

По диапазонам принимаемых волн приемники делятся на длинноволновые, работающие на длинных и промежуточных волнах, коротковолновые, работающие в коротковолновом диапазоне, и ультракоротковолновые, работающие в диапазоне метровых волн.

В приемниках с широким диапазоном волн применяется разбивка на поддиапазоны. Переход с одного поддиапазона волн на другой осуществляется обычно переключением катушек индуктивности (рис. 165). Настройка в пределах каждого поддиапазона производится чаще всего изменением емкости конденсатора.

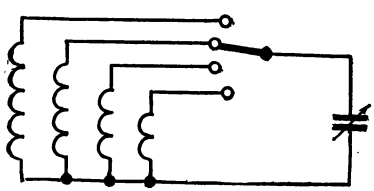


Рис. 165. Схема колебательного контура для широкого диапазона волн

На любой волне рабочего диапазона приемник должен иметь по возможности одинаковые чувствительность и избирательность.

Чувствительность

Одним из основных показателей приемника является его чувствительность. Если говорят, что приемник имеет более высокую чувствительность по сравнению с другим приемником, то это значит, что первый приемник способен принимать более слабые радиосигналы, чем второй.

Чувствительность приемника выражается наименьшей величиной э. д. с. в антенне, при которой на выходе приемника получается напряжение, необходимое для нормального воспроизведения приходящего сигнала в телефонах, громкоговорителе или записывающем устройстве.

Например, чувствительность приемника равна 10 мкВ. Это значит, что 10 мкВ является наименьшей величиной э. д. с. в антенне, при которой приемник работает нормально. При меньшей величине (например, при 5 мкВ) э. д. с. сигнала приемник будет работать плохо, т. е. прием сигналов будет затруднен.

Приемник, чувствительность которого равна 5 мкВ, вдвое чувствительнее приемника, чувствительность которого равна 10 мкВ.

Чувствительность приемника измеряется в микровольтах. Зависит она от коэффициента усиления приемника и величины его внутренних шумов. Чем больше коэффициент усиления приемника и чем меньше его внутренние шумы, тем выше чувствительность приемника. Коэффициент усиления приемника равен произведению коэффициентов усиления всех его каскадов и обычно бывает порядка 10^5—10^8.

Избирательность

Избирательность приемника получается за счет использования резонанса токов колебательного контура.

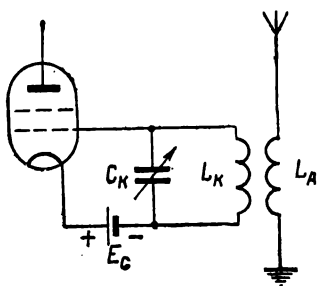


Рис. 166. Индуктивная связь антенны с колебательным контуром

На рис. 166 условно изображена антенна, индуктивно связанная с колебательным контуром. Эта антенна не настраивается на частоту принимаемой радиостанции. В ней наводятся э. д. с. всеми приходящими волнами. Все переменные токи, возникающие в антенне, будут проходить через катушку индуктивности L_A, включенную в антенну, и каждый будет создавать свое переменное магнитное поле. Каждое из этих магнитных полей, пересекая витки катушки контура $L_к$, будет наводить в ней свою э. д. с. В контуре возникнут вынужденные колебания различных частот.

Если изменять емкость переменного конденсатора $C_к$, то при этом начнет изменяться частота собственных колебаний контура, которая и устанавливается равной интересующей нас частоте. Другими словами, мы настраиваем контур в резонанс на частоту нужной станции. При этом одна из наведенных в катушке $L_к$ э. д. с. (а именно та, на частоту которой настроен контур) создаст в контуре наибольший ток, а следовательно, и наибольшее напряжение на его зажимах. Так произойдет выделение интересующего нас сигнала колебательным контуром приемника.

Возможность выделения резонансной частоты из нерезонансных частот характеризуется кривой резонанса контура. Чем острее кривая резонанса, тем лучше его избирательная способность.

Если бы не явление резонанса, то осуществить прием нужной станции было бы невозможно. Приемник в равной степени принимал бы одновременно большое количество различных сигналов. При радиотелефонном приеме результаты были бы такими же, как если бы вы сидели в аудитории и слушали одновременное выступление на разные темы большого числа докладчиков.

Итак, способность приемника отделять полезные сигналы от всех других сигналов и помех, воздействующих на приемную антенну, называется *частотной избирательностью.*

Чем больше ступеней усиления высокой частоты, тем острее суммарная кривая резонанса приемника в целом. Если, например, в первом контуре частоты, отстоящие от резонансной на 10 кГц, ослабляются в 2 раза, а во втором контуре те же частоты ослабляются еще в 3 раза, то общее ослабление этих частот по сравнению с резонансной будет равно 6.

Точность воспроизведения сигналов

Как уже отмечалось, чтобы увеличить избирательность приемника, необходимо иметь более острую кривую резонанса контуров (узкую полосу пропускания). Тогда более эффективно будет сказываться ослабление сигналов, частоты которых отличаются от резонансной частоты контура.

Следует иметь в виду, что чрезмерно высокая избирательность приводит к появлению *частотных искажений.* При узкой полосе пропускания качество воспроизведения может значительно ухудшиться. Передаваемая речь станет глухой, «бубнящей». Во многих случаях эту передачу можно разобрать, хотя она и будет сильно искаженной. При больших частотных искажениях передача может стать совершенно неразборчивой.

Для того чтобы передаваемые сигналы не искажались, радиоприемник должен пропустить не только колебания несущей частоты, но и колебания боковых частот. Следовательно, приемник должен обладать определенной полосой пропускания, т. е. он должен равномерно усиливать несущую частоту и обе боковые полосы частот.

Чем шире полоса пропускания приемника, тем меньше искажения принимаемых сигналов. Но при этом не следует забывать, что с расширением полосы пропускания увеличиваются помехи радиоприему. Поэтому выбирается какая-то оптимальная полоса пропускания.

Наилучшей избирательностью обладает тот приемник, у которого кривая избирательности имеет относительно плоскую верхушку и крутые спады.

Высокая избирательность приемника кроме устранения помех со стороны соседних по частоте станций ослабляет влияние атмосферных и промышленных помех.

УСИЛИТЕЛЬ ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ

Усилитель высокой частоты необходим по следующим причинам.

Для нормальной работы детектора требуется относительно большое напряжение высокой частоты, в то время как напряжение сигнала в антенне измеряется тысячными и миллионными долями вольта. Это первая причина, вызывающая необходимость усиления по высокой частоте.

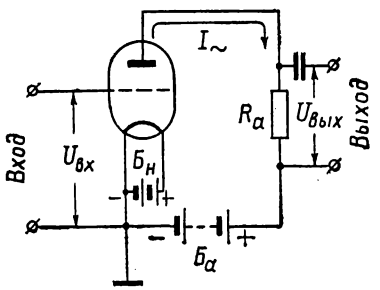


Рис. 167. Принципиальная схема усилительного каскада на сопротивлении

Кроме того, без усилителя высокой частоты потребовалось бы иметь усилитель низкой частоты с усилением напряжения в сотни тысяч и даже в миллионы раз. Практически изготовить такой усилитель очень трудно. Это вторая причина.

Третья причина заключается в том, что резонансные контуры усилителя высокой частоты обеспечивают получение высокой избирательности. Одного входного контура для этого недостаточно.

Рассмотрим принцип усиления напряжения с помощью электронной лампы.

Принцип работы усилителя наиболее просто можно уяснить при рассмотрении схемы на триоде. Необходимо заметить, что в настоящее время для усиления высокой частоты применяются почти исключительно многоэлектродные лампы [1].

В анодную цепь лампы, используемой в качестве усилителя, включается нагрузка в виде резистора, индуктивности или колебательного контура.

Рассмотрим схему усилительного каскада (рис. 167). Основными частями каскада являются лампа, источники питания ($Б_а$ и $Б_н$) и резистор нагрузки $R_а$, включенный в анодную цепь.

Переменное напряжение высокой частоты $U_{вх}$, которое нужно усилить, подается на сетку лампы (приложено между сеткой и катодом). Под влиянием этого напряжения (рис. 168) в анодной цепи лампы возникает пульсирующий ток, который, проходя через $R_а$, создает на нем пульсирующее падение напряжения.

Пульсирующее напряжение подобно пульсирующему току мож-

---

[1] Схемы усилителей высокой частоты на триодах иногда применяются в диапазоне ультракоротких волн.

но представить в виде постоянной и переменной составляющих (рис. 169). Полезной для нас будет переменная составляющая напряжения, возникающая на резисторе R_a. Это напряжение по фор-

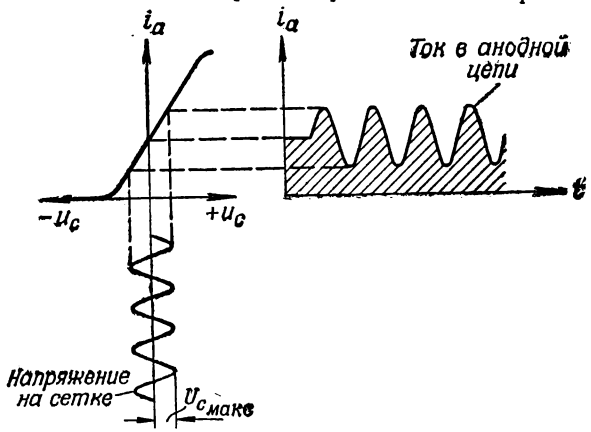


Рис. 168. Иллюстрация принципа работы усилительного каскада

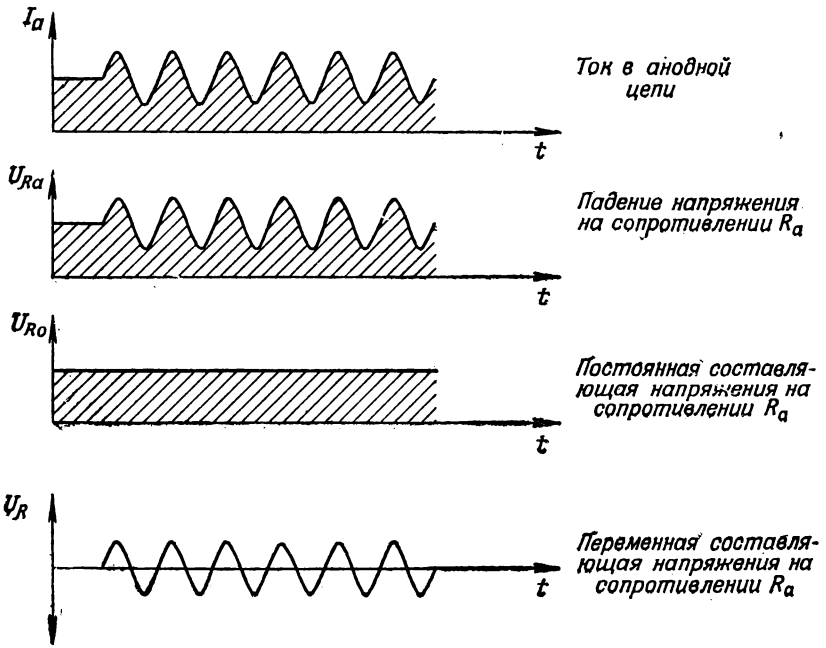


Рис. 169. Графическое изображение напряжения на нагрузке, включенной в анодную цепь усилительного каскада

ме будет полностью воспроизводить переменное напряжение $U_{вх}$, подведенное к сетке, но величина его будет значительно больше. Лампа усилила принятые колебания.

В качестве усилителей высокой частоты широкое распространение получили так называемые *резонансные усилители.* В таком усилителе анодной нагрузкой служит колебательный контур, настраиваемый на частоту принимаемых сигналов (рис. 170).

К числу резонансных усилителей относятся также усилители с трансформаторной связью.

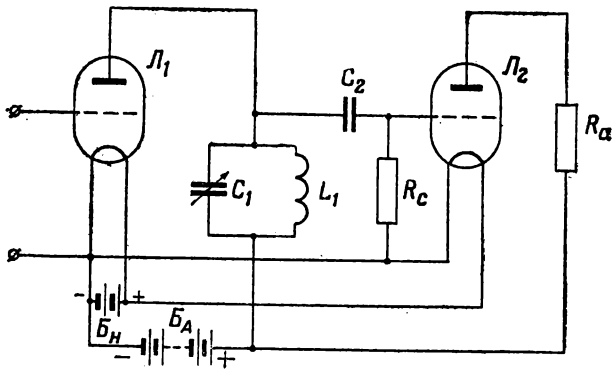


Рис. 170. Принципиальная схема резонансного усилителя

Колебательный контур, настроенный в резонанс на усиливаемую частоту, представляет для нее очень большое сопротивление, а это есть основное условие получения большого усиления.

Напряжение с анодного контура, как и при усилении на резисторах, через переходной конденсатор постоянной емкости C_2 поступает на сетку следующей лампы. Резистор R_c является утечкой сетки.

Резонансные усилители дают возможность получить значительно большее усиление, чем усилители на резисторах. В этом их основное преимущество.

Другое преимущество резонансного усилителя заключается в повышении избирательности приемного устройства. Лампа хорошо усиливает ту частоту, на которую настроен анодный контур. Остальные частоты не получают заметного усиления.

Два основных качества — высокая чувствительность и хорошая острота настройки — присущи резонансным усилителям.

Необходимо отметить, что эти достоинства получаются за счет усложнения не только конструкции, но и способа настройки приемника из-за увеличения числа настраивающихся контуров. Но в настоящее время для упрощения настройки применяется объединение нескольких переменных конденсаторов на одной оси с общей ручкой настройки.

К недостаткам резонансных усилителей высокой частоты относится возможность появления собственных колебаний в контурах усилителя. Эти паразитные колебания могут возникать из-за наличия междуэлектродных емкостей ламп, а также непосредствен-

ного электрического и магнитного влияния между контурами и монтажными проводниками.

Лампы должны иметь возможно меньшие значения внутриламповых емкостей, особенно анод — сетка. Кроме связи через электронный поток сеточная и анодные цепи могут оказаться связанными через эту емкость, создавая общую для сетки и анодной нагрузки цепь переменного тока (рис. 171). Наличие этой цепи при-

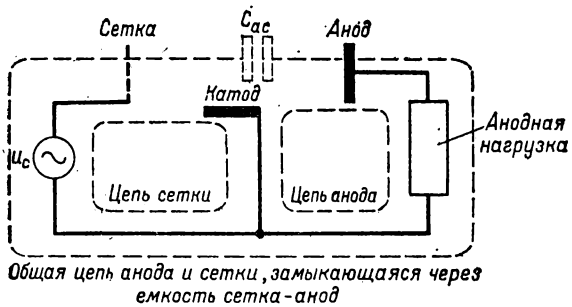


Рис. 171. Связь между цепями анода и сетки через емкость анод — сетка

водит к нежелательному самовозбуждению усилителей высокой частоты (усилитель превращается в генератор). Связь через емкость анод — сетка тем сильнее, чем выше частота усиливаемых колебаний.

Применение многоэлектродных ламп, экранирование, включение фильтров позволяют устранить паразитные колебания в однокаскадных и двухкаскадных усилителях. Но когда усиление, создаваемое усилителем, сравнительно велико, достаточно очень слабой связи между входом и выходом, чтобы возникли паразитные колебания. Поэтому применять больше двух-трех каскадов усиления высокой частоты практически нецелесообразно. Чем выше частота усиливаемых колебаний, тем сильнее сказываются все паразитные связи.

У триодов междуэлектродная емкость сетка — анод порядка 1 пФ. Использование ламп с экранирующей сеткой приводит к уменьшению емкости $C_{а-с}$ до 0,002 пФ, т. е. эта емкость уменьшается в 500 раз.

Схема усилителя высокой частоты на пентоде приведена на рис. 172. Экранирующая сетка шунтируется конденсатором C_4, который имеет достаточно большую величину емкости, т. е. практически представляет закороченную цепь для составляющей переменного напряжения. Типичная величина емкости этого конденсатора порядка 10 000 пФ. Для частоты 1,5 МГц (длина волны 200 м) емкостное сопротивление его не более 10 Ом.

Очень маленькая емкость 0,002 пФ между анодом и управляющей сеткой не должна увеличиваться внешними паразитными ем-

костями монтажа, для чего используют экранирование цепей анода и управляющей сетки.

О назначении остальных деталей схемы говорится ниже.

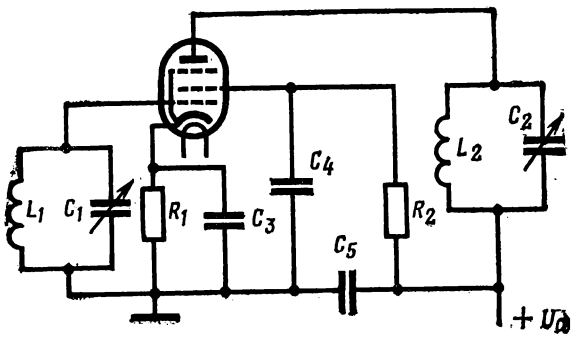


Рис. 172. Схема усилителя высокой частоты на пентоде

ДЕТЕКТИРОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ

В передатчике преобразование звука в электрический ток осуществляется микрофоном. В приемнике преобразование электрического тока в звук производится телефоном (громкоговорителем). Без детектирования телефон не в состоянии воспроизвести звук.

Если при модулировании происходит наложение звуковой частоты на колебания высокой частоты, то при детектировании задача сводится к тому, чтобы выделить колебания звуковой частоты из модулированных колебаний. Детектирование — процесс, обратный модулированию, и осуществляется оно в каждом приемнике как при телефонной, так и при телеграфной работе.

Приборы, которые позволяют выделить звуковую частоту из модулированного колебания, называются *детекторами*. Процесс выделения частоты называется детектированием. Детектировать — значит преобразовать модулированный переменный ток высоких частот в ток низких звуковых частот. Детекторы должны обладать односторонней проводимостью, т. е. хорошо проводить ток в одном направлении и плохо в другом. Все это нужно для того, чтобы выделить звуковую частоту из модулированных колебаний.

Как указывалось выше, высокая частота используется в качестве «переносчика» звуковой частоты. Использовать высокую частоту непосредственно невозможно, так как ухо человека ее не воспринимает.

На рис. 173, *а* приведена кривая модулированного колебания. При воздействии таких колебаний на телефон мы ничего не услышим, хотя амплитуды высокочастотных колебаний изменяются по закону звуковой частоты. Это объясняется тем, что составляющая низкой частоты равна нулю, она не выделена, так как колебания относительно оси времени совершаются симметрично.

Если выпрямить высокочастотный немодулированный переменный ток, то получится пульсирующий ток.

Пульсирующий ток состоит из постоянной и высокочастотных составляющих (гармоник). Если все гармоники пропустить через блокировочный конденсатор, подключенный параллельно телефону, то через последний пойдет только постоянный выпрямленный ток, который притянет мембрану телефона. Если выпрямить моду-

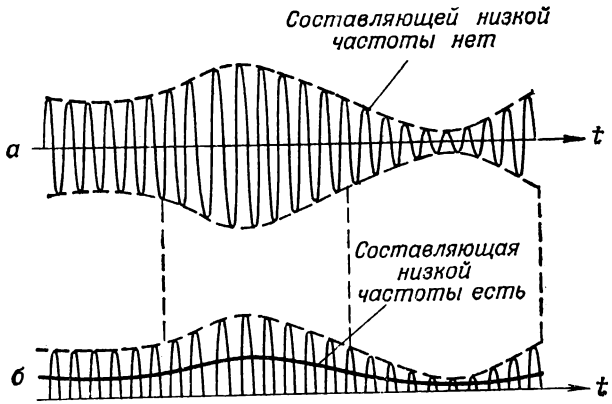


Рис. 173. Детектирование модулированных колебаний:
а — модулированные колебания; *б* — детектированные колебания

лированный ток (рис. 173, *б*), то кроме указанных выше составляющих появится еще одна — составляющая тока низкой (звуковой) частоты, которая и вызовет колебание мембраны телефона.

Таким образом, появление звука в телефоне вызывается составляющей тока низкой частоты. Постоянная и высокочастотные составляющие через него не пропускаются.

Рассмотрим более подробно детектирование амплитудно-модулированных сигналов. При амплитудной модуляции амплитуда несущей волны изменяется в соответствии с частотой модулирующего напряжения. Степень изменения зависит от величины модулирующего напряжения.

На рис. 174, *а* изображено немодулированное высокочастотное колебание, а на рис. 174, *б*, *в* и *г* это колебание промодулировано с глубиной модуляции 25, 50 и 100% соответственно.

Модулирующее напряжение на рис. 174, *в* в два раза больше, чем на рис. 174, *б*, в то время как на рис. 174, *г* в два раза больше, чем на рис. 174, *в*. Степень модуляции выражается глубиной модуляции, которая представляет отношение амплитуды модулирующего напряжения к амплитуде немодулированной несущей волны.

Сила звука в громкоговорителе (головных телефонах) зависит от глубины модуляции принимаемого сигнала. Чем больше глубина модуляции, тем больше напряжение звуковой частоты. Следо-

вательно, сигнал рис. 174, *в* создает в два раза большее напряжение звуковой частоты, чем сигнал рис. 174, *б*, и т. д.

Детектор представляет одну из наиболее важных частей приемника, так как без детектора невозможно отделить звуковую частоту от несущей частоты.

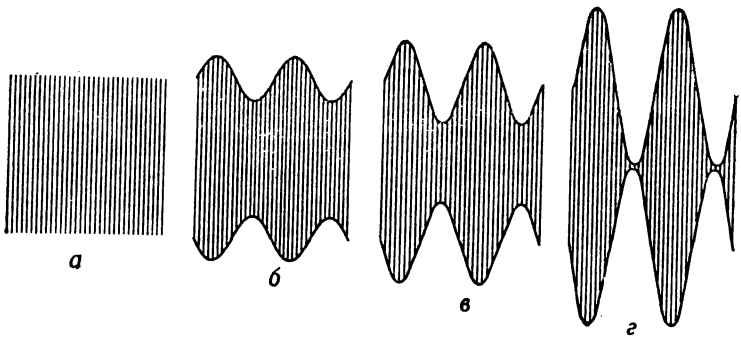


Рис. 174. Модуляция:

а — немодулированное высокочастотное колебание; *б* — промодулированное высокочастотное колебание с глубиной модуляции 25%; *в* — с глубиной модуляции 50%; *г* — с глубиной модуляции 100%

Диодное детектирование

До появления электронных ламп применялись только *кристаллические* или, как их иногда называют *контактные детекторы*. Оказывается, некоторые материалы при их соприкосновении приобретают свойство проводить электрический ток в одном направлении. Первый воспользовался этим свойством изобретатель радио А. С. Попов в 1900 г., применив контактный детектор, состоявший из угля и стали.

В диапазоне сантиметровых волн контактные детекторы имеют существенные преимущества по сравнению с ламповыми детекторами (малый уровень внутренних шумов, малая собственная емкость и т. д.).

Среди ламповых детекторов наиболее широкое распространение получил диодный детектор.

На рис. 175, *а* приведена *последовательная схема диодного детектора*. Схема получила название последовательной, так как колебательный контур LC, диод и резистор нагрузки R соединены между собой последовательно. В цепи накала диода имеется батарея накала. В анодной цепи нет никаких источников постоянного напряжения. Переменное модулированное напряжение высокой частоты подается с колебательного контура LC на диод.

На рис. 176 переменное модулированное напряжение отложено вниз по вертикальной оси времени t под характеристикой диода. При положительных полупериодах напряжения на аноде в анодной цепи появляется ток, при отрицательных полупериодах

тока нет. Таким образом, в анодной цепи появляются импульсы анодного тока, т. е. пульсирующий ток. Пульсирующий ток можно разложить на постоянную составляющую и составляющие высокой и низкой (звуковой) частот.

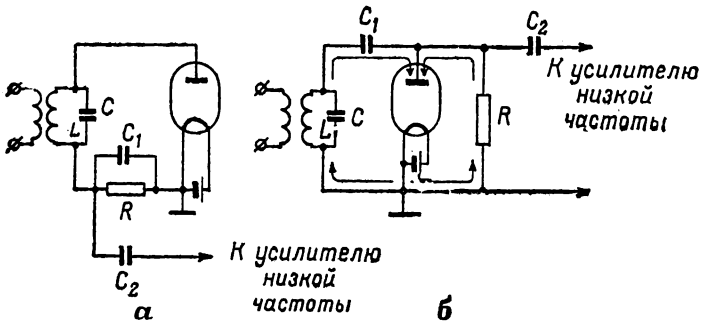


Рис. 175. Принципиальная схема диодных детекторов:
а — последовательная схема; *б* — параллельная

Для данной напряженности несущей волны амплитуда переменного тока звуковой частоты после выпрямления прямо пропорциональна глубине модуляции. Таким образом, амплитуда пере-

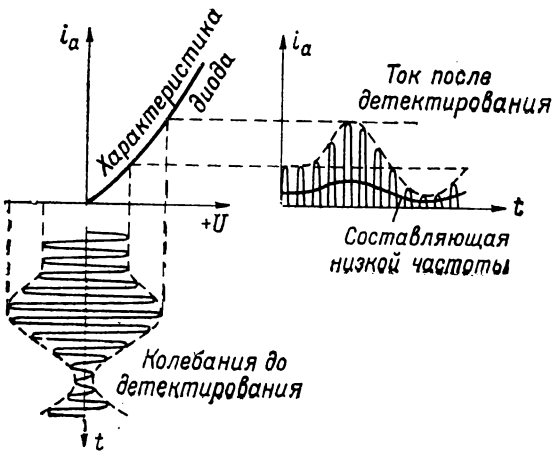


Рис. 176. Процесс детектирования модулированных колебаний

менного тока звуковой частоты равна амплитуде высокой частоты несущей волны, умноженной на глубину модуляции в процентах. Если удвоить напряженность несущей волны и промодулировать ее при той же глубине модуляции, напряжение звуковой частоты будет в 2 раза больше.

Рассмотрим это на двух примерах.

1. Амплитуда несущей волны 3 В, глубина модуляции 50%. Амплитуда напряжения звуковой частоты равна $\frac{50}{100} \cdot 3 = 1{,}5$ В.

2. Амплитуда несущей волны 6 В, глубина модуляции опять 50%. Теперь амплитуда напряжения звуковой частоты равна 3 В.

Телефон обычно в цепь диода не включается, так как мощность в этой цепи недостаточна для его нормальной работы. Чтобы получить мощность в цепи диода, необходимую для нормальной работы телефона, потребовалось бы такое большое усиление по высокой частоте, осуществить которое практически невозможно. Следовательно, после детектирования приходится производить усиление колебаний низкой частоты.

Напряжение низкой частоты в цепи диода выделяется на резисторе R (рис. 175, *а*), величина которого выбирается достаточно большой (до миллиона Ом). Этот резистор называется нагрузкой диода. С него и снимается напряжение на сетку лампы усилителя низкой частоты. Величина сопротивления резистора выбирается большой для того, чтобы получить на нем как можно большее падение напряжения низкой частоты. Чтобы на резисторе R не происходило бесполезных потерь переменного напряжения высокой частоты, снимаемого с контура LC (это напряжение должно полностью подводиться к диоду, чтобы увеличить падение напряжения звуковой частоты на резисторе R), резистор R шунтируется конденсатором C_1, емкость которого обычно равна 100—200 пФ. Эта емкость представляет очень небольшое сопротивление для тока высокой частоты.

Конденсатор C_2 преграждает путь постоянной составляющей выпрямленного напряжения (постоянному напряжению), которое получается на резисторе R, к сетке лампы усилителя низкой частоты. Это необходимо для того, чтобы не смещать рабочую точку характеристики лампы усилителя низкой частоты в невыгодное с точки зрения режима работы положение. Для переменной составляющей низкой частоты конденсатор C_2 представляет незначительное сопротивление, так как его емкость обычно не меньше 1000 пФ.

На рис. 175, *б* приведена параллельная схема диодного детектора. Колебательный контур LC, диод и резистор нагрузки R включены в этой схеме параллельно. Принцип работы данной схемы ничем не отличается от предыдущей.

Переменное напряжение с контура LC поступает на диод через конденсатор C_1. Переменная составляющая высокой частоты анодного тока проходит по цепи: контур, конденсатор C_1, диод.

Конденсатор C_1 (100—200 пФ) преграждает путь постоянной составляющей анодного тока и оказывает большое сопротивление переменной составляющей низкой частоты (емкость конденсатора мала). Следовательно, постоянная составляющая и составляющая низкой частоты анодного тока диода проходят через резистор R,

создавая на нем падение напряжения. Переменное напряжение низкой частоты через конденсатор C_2 поступает на сетку лампы усилителя низкой частоты.

Сеточное детектирование

На рис. 177 приведена схема *сеточного детектора*. Сеточное детектирование принципиально ничем не отличается от диодного. Роль диодного детектора выполняет здесь промежуток

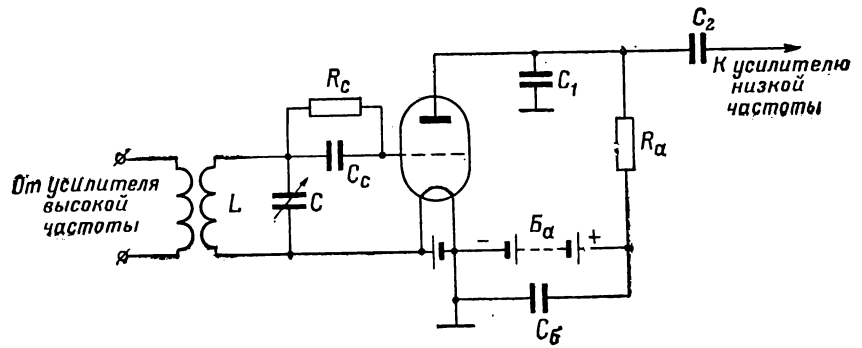


Рис. 177. Схема сеточного детектора

управляющая сетка — катод. Постоянное напряжение на сетку не подается, следовательно, в исходном положении напряжение на ней равно нулю, так же как было равно нулю и напряжение на аноде диода.

Переменное напряжение высокой частоты с контура LC через конденсатор C_c поступает на сетку. При положительных полупериодах этого напряжения в цепи сетки появляются импульсы сеточного тока.

Если переменное напряжение высокой частоты, прикладываемое к сетке, будет иметь постоянную амплитуду (немодулированные колебания), то ток в цепи сетки будет состоять из переменных составляющих высокой частоты и постоянной составляющей сеточного тока.

Постоянная составляющая сеточного тока, проходя по резистору R_c, создает на нем падение напряжения, минус которого приложен к сетке, а плюс — к катоду. Следовательно, на сетке появляется отрицательное смещение постоянной величины и в цепи анода происходит уменьшение анодного тока.

Если на сетку воздействуют модулированные колебания, то в ее цепи появляется еще одна составляющая сеточного тока — переменная составляющая звуковой частоты, которая вызовет переменное падение напряжения на резисторе R_c. Так как это напряжение меняется по закону звуковой частоты, то по этому же закону будет меняться напряжение на сетке, а значит, и ток в анодной цепи.

При сеточном детектировании в сеточной цепи лампы происходит детектирование колебаний высокой частоты и одновременно в анодной цепи этой же лампы происходит усиление напряжения низкой частоты. Поэтому сеточный детектор более чувствителен, чем диодный, т. е. при приеме слабых сигналов получается лучшая слышимость. В этом его преимущество. Недостаток сеточного детектора — большее искажение принимаемых сигналов.

Высокая частота замыкается на землю через конденсатор C_1 и не проходит через $R_а$.

Через резистор $R_а$ проходят постоянная и переменная составляющие тока низкой частоты, которые и вызывают падение напряжения на этом сопротивлении. Переменное напряжение низкой частоты через конденсатор C_2 подается на усилитель низкой частоты; постоянная составляющая тока низкой частоты через этот конденсатор не проходит.

Если дальнейшего усиления низкой частоты не производится, то вместо резистора $R_а$ включается телефон.

Мы не рассматриваем здесь анодное детектирование, так как из-за существенных недостатков оно не получило широкого применения.

УСИЛИТЕЛИ НИЗКОЙ ЧАСТОТЫ

Обычно после детектирования звуковые колебания усиливаются *усилителями низкой частоты.* К усилителям низкой частоты предъявляется следующее основное требование: они должны равномерно усиливать колебания всех частот в пределах определенного диапазона. Искажения усиливаемых колебаний в усилителе неизбежны, но они должны быть снижены настолько, чтобы не отражаться на качестве приема.

В усилителях высокой частоты производится усиление слабых сигналов до напряжения порядка 1 В. В усилителях низкой частоты приходится иметь дело с усилением довольно больших напряжений, чтобы получить большую мощность на выходе. В этом состоит одно из существенных различий в условиях работы ламп в качестве усилителя высокой и низкой частоты.

В зависимости от типа анодной нагрузки различают три основных типа усилителей: усилители на сопротивлениях, на трансформаторах и на дросселях.

Искажения в усилителях

Величина сопротивления анодной нагрузки в усилителях зависит от частоты усиливаемых сигналов. Это является причиной *частотных искажений.*

Частотные искажения особенно сильно сказываются при индуктивной или смешанной нагрузке. Смешанная нагрузка фактически получается даже при чисто активной нагрузке, так как сказывается влияние внутриламповых емкостей и емкостей монтажа схе-

мы. Отсюда следует, что усиление одних частот будет больше, чем других. Это, с одной стороны, играет отрицательную роль, приводя к частотным искажениям в усилителях низкой частоты, а с другой стороны, является полезным, обеспечивая избирательность усилителей высокой частоты.

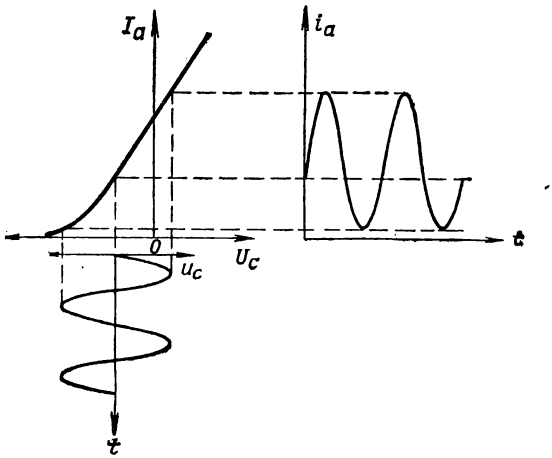


Рис. 178. Искажение сигналов при усилении вследствие нелинейности характеристики лампы

Кроме частотных искажений в усилителе происходят нелинейные, или амплитудные, искажения. При этих искажениях синусоидальная форма напряжения сигнала после усиления искажается (т. е. перестает быть синусоидальной).

Определенной форме кривой напряжения, подводимого к сетке, соответствуют определенные звуки. Если форма кривой напряжения в процессе усиления будет искажена, то окажутся искаженными и звуки, которые мы слышим в телефоне, включенном на выходе усилителя. Другими словами, нелинейные искажения характеризуются тем, что в усилителе появляются добавочные звуковые колебания (гармоники), которых не было в частотном спектре естественного звука.

При радиотелефонной передаче нелинейные искажения приводят к изменению тембра звука, ухудшению разборчивости передачи, дребезжанию и т. д.

Источник нелинейных искажений — лампа и неправильный выбор режима работы лампы. Так как характеристика лампы не строго линейна, то анодный ток изменяется не пропорционально приложенному к сетке напряжению. Отсюда и произошло название нелинейные искажения. Из рис. 178 видно, что синусоидальное напряжение, приложенное к сетке лампы, вызывает несинусоидальное изменение анодного тока лампы. Изменение анодного тока при положительных и отрицательных значениях напряжения на сетке различно.

Нелинейные искажения практически отсутствуют, если использовать только прямолинейный участок характеристики. Правильно выбрать рабочую точку можно путем подачи определенного отрицательного напряжения на сетку (напряжения смещения). Так как характеристики ламп не имеют идеально прямых участков, то устранить нелинейные искажения полностью невозможно. При усилении сильных сигналов криволинейность характеристики сказывается в бо́льшей степени, отсюда больше и нелинейные искажения.

В усилителях высокой частоты нелинейные искажения не учитываются, так как там имеют дело с небольшими напряжениями (от десятков микровольт до десятых долей вольта).

В усилителях низкой частоты (особенно в выходных каскадах) приходится встречаться с напряжениями в несколько десятков вольт и больше, поэтому здесь необходимо считаться с нелинейными искажениями при подборе режима работы лампы.

Следует иметь в виду еще один источник амплитудных искажений — это сеточный ток лампы. Сеточный ток может появиться при положительных амплитудах напряжения сигнала на сетке. Источник переменной э. д. с. (например, колебательный контур, вторичная обмотка трансформатора и т. д.), подводимой к сетке лампы, всегда имеет какое-то внутреннее сопротивление. Появляющийся сеточный ток создает на этом сопротивлении падение напряжения, которое вызывает уменьшение подводимого напряжения к сетке лампы. Следовательно, при положительном полупериоде происходит искажение сигнала. При отрицательном полупериоде искажений не возникает. Чтобы этих искажений вообще не было, необходимо правильно выбирать сеточное смещение и анодное напряжение.

Усилители на сопротивлениях

Усилители низкой частоты на сопротивлениях имеют простое устройство и дают сравнительно равномерное усиление низких частот по всему диапазону, поэтому они получили наибольшее распространение в радиотехнике.

На рис. 179 приведена принципиальная схема усилителя низкой частоты, в анодной цепи которого включен резистор $R_а$.

На сетку лампы $Л_1$ подается переменное напряжение низкой частоты $U_{вх}$. Под влиянием этого напряжения в анодной цепи возникает пульсирующий ток. Постоянная составляющая тока проходит через лампу, анодную батарею и нагрузку $R_а$.

Чтобы не происходило потерь переменной составляющей тока на внутреннем сопротивлении анодной батареи, последняя блокируется конденсатором $C_б$. Емкость этого конденсатора берется достаточно большой (несколько микрофарад), поэтому его сопротивление переменной составляющей низкой частоты очень мало.

Переменная составляющая анодного тока, проходя по резистору $R_а$, создает на нем переменное падение напряжения. Величина этого напряжения примерно в μ (μ — коэффициент усиления лампы) раз больше напряжения, подведенного к сетке лампы $Л_1$. Таким образом происходит усиление напряжения. Усилители на сопротивлениях обычно используются в качестве предварительных усилителей напряжения.

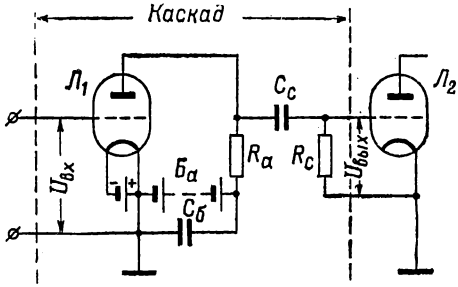


Рис. 179. Принципиальная схема усилителя низкой частоты на сопротивлении

Переменное напряжение с $R_а$ через конденсатор $C_с$ подается на сетку лампы $Л_2$ следующего каскада усиления низкой частоты.

Конденсатор $C_с$ предохраняет сетку лампы $Л_2$ от высокого напряжения анодной батареи. В усилителях высокой частоты емкость конденсатора $C_с$ составляет 0,001 мкФ и меньше, в усилителях низкой частоты — не менее 0,02—0,03 мкФ. Резистор $R_с$ является сопротивлением утечки сетки.

Усилители на трансформаторах

На рис. 180 приведена принципиальная схема усилителя низкой частоты на трансформаторе. В этой схеме первичная обмотка трансформатора включена в анодную цепь лампы. Она имеет небольшое сопротивление для постоянной составляющей анодного тока. Поэтому можно считать, что все напряжение анодной батареи поступает на лампу (падение напряжения на первичной обмотке трансформатора мало). Это — первое преимущество усилителей на трансформаторах по сравнению с усилителями на сопротивлениях.

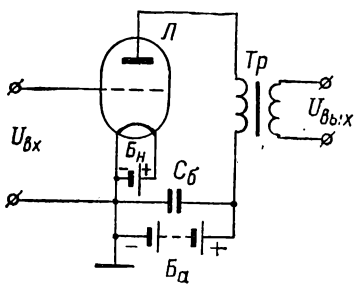


Рис. 180. Принципиальная схема усилителя низкой частоты на трансформаторе

Так как обмотки трансформатора между собой электрически изолированы (они связаны только общим магнитным потоком), то во вторичной обмотке постоянной составляющей тока нет. Поэтому нет необходимости включать разделительный конденсатор и сопротивление утечки в цепь сетки последующего каскада или разделительный конденсатор в цепь телефона, если он непосредственно подключается ко вторичной обмотке. Это — второе преимущество усилителей на трансформаторах по сравнению с усилителями на сопротивлениях.

Третье, основное преимущество усилителей на трансформаторах, — это возможность получить коэффициент усиления каскада, в несколько раз больший, чем коэффициент усиления лампы.

Переменное напряжение звуковой частоты подводится между сеткой и катодом лампы. Усиленное напряжение звуковой частоты выделяется на анодной нагрузке, в данном случае на первичной обмотке трансформатора. На вторичной обмотке трансформатора получается напряжение в n раз больше, чем на первичной (n — коэффициент трансформации).

Таким образом, усилитель на трансформаторе может усилить подведенное напряжение в μn раз. Практически такое усиление получить не удастся, так как в лампе и трансформаторе всегда происходят некоторые потери.

Усилитель на трансформаторе дает бо́льшие частотные искажения.

Так как сопротивление анодной нагрузки зависит от частоты переменной составляющей, то различные частоты звукового диапазона будут усиливаться неодинаково (для различных частот будет разное сопротивление нагрузки). Кроме того, для получения требуемого усиления на звуковых частотах (100—200 Гц) сопротивление первичной обмотки трансформатора должно быть не ниже внутреннего сопротивления R_i лампы. Это приводит к тому, что приходится увеличивать число витков первичной, а значит, и вторичной обмоток. Увеличение числа витков сопровождается ростом междувитковой емкости, и на некоторых частотах наблюдается явление резонанса. Резонансная частота и близкие к ней частоты выделяются из всего диапазона усиливаемых частот, т. е. получаются большие искажения.

Чтобы явления резонанса в трансформаторе не происходило, коэффициент трансформации не берут больше 2—3 и, кроме того, вторичную обмотку иногда шунтируют сопротивлением. Включение сопротивления хотя и вызывает снижение усиления на всех частотах, но зато делает его более равномерным.

К недостаткам усилителей на трансформаторах относятся высокая стоимость его, большой вес и большие искажения.

Усилители на трансформаторах обычно используются в сочетании с триодами, так как небольшое внутреннее сопротивление R_i лампы позволяет взять меньшее число витков первичной и вторичной обмоток.

Связь детектора с каскадом усиления

Постоянное и переменное напряжение звуковой частоты появляются на нагрузке диода резистора $R_д$ и конденсаторе C_2 диода (рис. 181). Величина постоянного напряжения зависит от величины напряжения высокой частоты на контуре $L_1 — C_1$, а амплитуда напряжения звуковой частоты — от величины сигнала звуковой частоты и глубины модуляции.

Таким образом, между точками *1* и *2* имеется постоянное и переменное напряжения, из которых необходимо выделить переменное, т. е. стоит задача, противоположная сглаживающему фильтру, которая решается при помощи конденсатора C_3. Переменное напряжение через конденсатор C_3 поступает на сетку усилительной лампы.

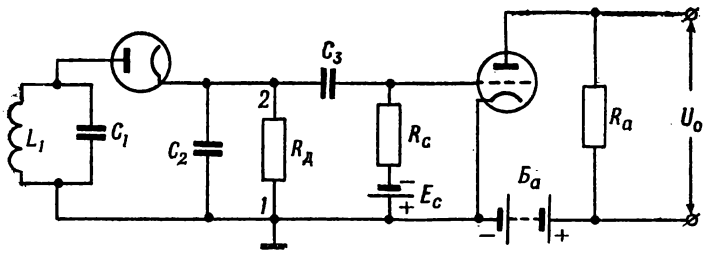


Рис. 181. Связь детекторного каскада с каскадом усилителя низкой частоты через конденсатор C_3

Отрицательное смещение на сетку

Для усилительной лампы требуется такое отрицательное смещение на сетке, чтобы при наибольшей амплитуде переменного напряжения сетка оставалась отрицательной по отношению к катоду. Если сетка станет положительной, то пойдет сеточный ток и в результате появятся искажения.

Отрицательное смещение на сетке почти всегда создается при помощи сопротивления. Его можно получить двумя путями: при помощи сопротивления в цепи катода или в общей минусовой цепи.

Сопротивление в цепи катода

Состояние цепи при отсутствии переменного напряжения на сетке показано на рис. 182, *а*. Анодный ток протекает от плюса батареи $Б_а$ через резистор $R_а$, лампу, резистор $R_к$ к минусу анодной батареи. На резисторе $R_к$ создается падение напряжения, плюс которого находится на верхнем конце, а минус — на нижнем. Величина сопротивления резистора $R_к$ выбирается из расчета, чтобы произведение анодного тока $I_а$ на сопротивление $R_к$ равнялось отрицательному смещению на сетке $U_с$. Если $U_с = -2$ В, $I_а = 1$ мА, тогда

$$R_к = \frac{U_с}{I_а} = \frac{2}{0{,}001} = 2000 \text{ Ом}.$$

При появлении переменного напряжения на сетке лампы в анодной цепи создается переменный ток. Кроме постоянного напряжения на резисторе $R_к$ появляется переменное напряжение $U_{к\sim}$, которое имеет противоположную фазу переменному входному напряжению $U_{вх}$ (рис. 182, *б*).

При положительном полупериоде переменного напряжения на сетке анодный ток $I_а$ возрастает, вызывая увеличение напряжения $U_{к\sim}$. На сетке лампы действуют два напряжения: входное напряжение $U_{вх}$ и напряжение $U_{к\sim}$, сдвинутые по фазе на 180°. Между сеткой и катодом создается напряжение, равное разности этих напряжений, которое управляет электронным потоком в лампе. Это напряжение $\sim U_с$ получается меньше приложенного переменного напряжения $U_{вх}$.

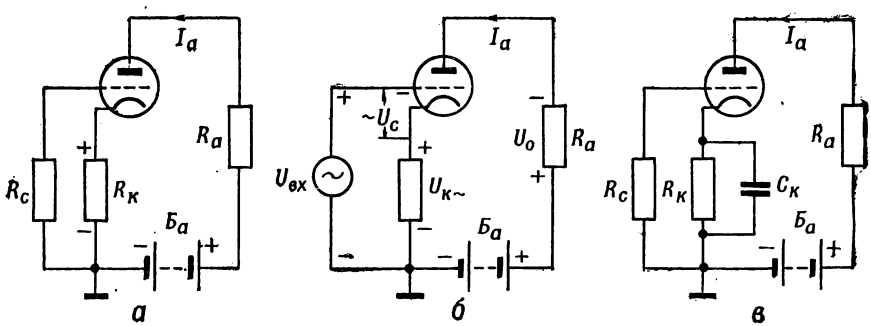


Рис. 182. Создание отрицательного напряжения смещения при помощи катодного сопротивления:

а — при отсутствии переменного напряжения на входе лампы; *б* — при наличии переменного напряжения на входе лампы; *в* — катодное сопротивление зашунтировано конденсатором

Чтобы устранить влияние переменной составляющей анодного тока на величину входного напряжения, параллельно резистору $R_к$ включается конденсатор $C_к$ (рис. 182, *в*). Можно встретить выражение, что сопротивление резистора $R_к$ в этом случае развязано по переменному анодному току. Конденсатор $C_к$ часто называется конденсатором развязки или шунтирующим. Величина емкости конденсатора должна быть такой, чтобы его реактивное сопротивление в пределах всего диапазона звуковых частот было небольшое по сравнению с сопротивлением резистора $R_к$[1].

Конденсатор имеет наибольшее реактивное сопротивление при наименьшей частоте. Например, катодное сопротивление, равное 1600 Ом, зашунтировано конденсатором 25 мкФ. Этот конденсатор имеет реактивное сопротивление около 200 Ом при частоте 30 Гц. Сопротивление 200 Ом значительно меньше по сравнению с 1600 Ом, а при более высоких частотах реактивное сопротивление конденсатора будет еще меньше.

При шунтировании катодного резистора $R_к$ входное переменное напряжение полностью прикладывается между сеткой и катодом.

---

[1] Во многих приемниках катодное сопротивление не шунтируется. Это делается с целью получения «отрицательной обратной связи», о которой будет сказано ниже.

Сопротивление в общей минусовой цепи

Широко используется способ получения отрицательного смещения на сетку путем включения сопротивления в отрицательную ветвь источника питания (рис. 183). В этой схеме резистор R_2 является нагрузкой, а R_3 — дополнительным сопротивлением для получения отрицательного смещения. Величина этого сопротивления определяется требуемым отрицательным смещением на сетке

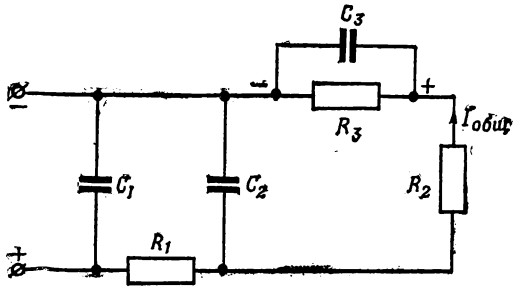


Рис. 183. Получение отрицательного смещения на сетки ламп путем включения сопротивления в отрицательную ветвь источника питания

и током, который протекает в отрицательной ветви, т. е. общим током всех ламп приемника. Чтобы предотвратить появление переменного напряжения на резисторе, он шунтируется конденсатором.

Этот метод получения отрицательного смещения имеет преимущество, так как достаточно иметь один или два резистора (в зависимости от того, требуется одно или два различных напряжения смещения), в то время как при катодных сопротивлениях каждая лампа должна иметь свой резистор и шунтирующий конденсатор. Использование катодных сопротивлений менее экономично.

Регулировка усиления

В схеме рис. 181 все переменное напряжение звуковой частоты, которое создается на сопротивлении нагрузки диода — резисторе $R_д$, подается к сетке лампы усилителя низкой частоты. Однако в радиоприемнике желательно иметь устройство для регулировки интенсивности звука. Интенсивность звука, или «громкость», зависит от величины напряжения звуковой частоты, поэтому регулировка громкости сводится к контролю за этим переменным напряжением. Осуществляется это довольно простым способом: постоянное сопротивление резистора $R_д$ заменяется потенциометром (рис. 184). Перемещая движок потенциометра в одну или другую сторону, мы будем снимать разное напряжение,

подводимое к сетке следующей лампы. Вместо этого способа регулировки усиления можно воспользоваться потенциометром в цепи утечки сетки.

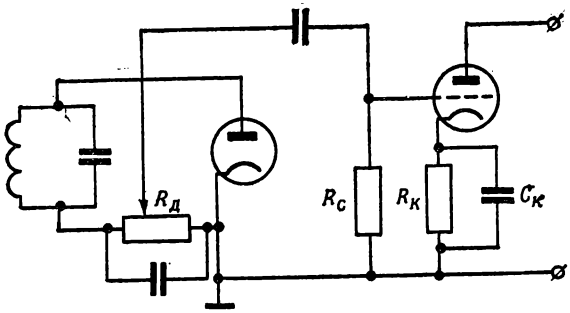


Рис. 184. Регулировка усиления (сопротивлением нагрузки диода служит потенциометр)

Мощный усилитель

К оконечному каскаду усилителя низкой частоты предъявляются иные требования, чем к предварительным каскадам. Это объясняется тем, что последний каскад должен давать определенную мощность, необходимую для работы прибора (головного телефона, громкоговорителя, пишущего устройства и т. д.), включенного на выходе усилителя.

В мощных усилителях часто применяются низкочастотные пентоды. Благодаря большой величине коэффициента усиления получается необходимая полезная мощность при малых напряжениях на сетке, и поэтому можно брать меньшее число каскадов предварительного усиления. Кроме того, при использовании пентодов получается более высокий к. п. д.

При выборе нагрузки для пентодов стремятся получить не максимальную полезную нагрузку, а минимальные нелинейные искажения. Сопротивление нагрузки берется меньше, чем внутреннее сопротивление лампы.

В оконечном каскаде нелинейные искажения возникают особенно легко. Это объясняется тем, что к сетке лампы оконечного усилителя подводятся уже большие переменные напряжения, и поэтому вероятность выхода за пределы прямолинейного участка характеристики велика. По той же причине в оконечном каскаде часто возникают сеточные токи, что также служит причиной нелинейных искажений.

Итак, выходная лампа усилителя мощности включается после усилителя напряжения низкой частоты. Эта лампа работает при большем анодном напряжении и большем анодном токе, чтобы выделить требуемую мощность в анодном сопротивлении нагрузки. Связь с этой лампой обычно осуществляется так же, как и

связь с детекторным каскадом, т. е. с помощью емкости и сопротивления. Те же требования и к выбору емкости связи. Реактивное сопротивление этого конденсатора должно быть небольшим по сравнению с сопротивлением утечки сетки.

Усилитель низкой частоты

Рассмотрим схему усилителя низкой частоты, включая и детектор (рис. 185).

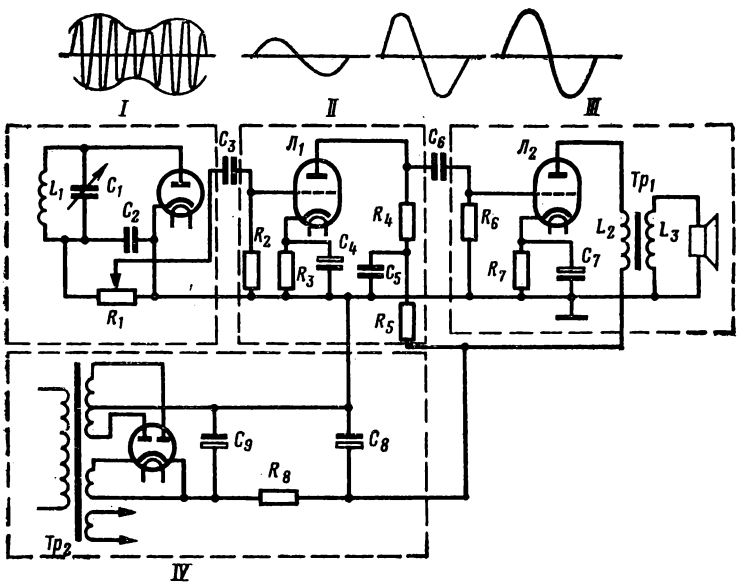


Рис. 185. Схема детектора с усилителем низкой частоты

I — каскад диодного детектора;
II — усилитель напряжения низкой частоты;
III — усилитель мощности с громкоговорителем;
IV — блок источника питания.

На контуре L_1—C_1 появляется модулированное напряжение высокой частоты, поступающее от каскада усилителя высокой частоты. После детектирования постоянное напряжение и напряжение звуковой частоты появляются на резисторе R_1. Через конденсатор связи C_3 переменное напряжение подводится к сетке лампы усилителя низкой частоты. Отрицательное смещение на эту лампу поступает с катодного сопротивления резистора R_3, зашунтированного конденсатором C_4. Усиленное напряжение звуковой частоты появляется на сопротивлении нагрузки R_4.

Последовательно с резистором R_4 включен резистор R_5, который входит в развязывающий фильтр R_5—C_5. Этот фильтр выполняет две функции.

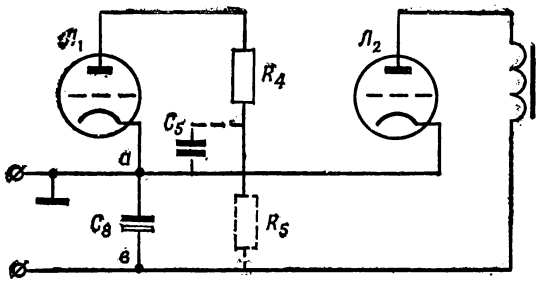


Рис. 186. Упрощенная схема цепи низкой частоты

1. Развязка ламп $Л_1$ и $Л_2$. Развязку необходимо осуществить, поскольку эти лампы связаны через реактивное сопротивление конденсатора C_8 источника питания.

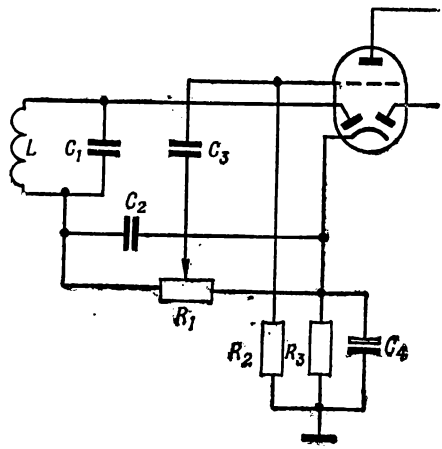


Рис. 187. Схема детектора с каскадом усиления низкой частоты, собранная на двойном диод-триоде

Чтобы более наглядно представить это, изобразим отдельно цепь звуковой частоты (рис. 185) в простой форме (рис. 186). Из этой схемы видно, что переменный ток обеих ламп протекает через конденсатор C_8, создавая на нем падение напряжения. Как бы мало ни было это общее напряжение, оно может быть достаточным, чтобы вызвать генерацию в усилителе низкой частоты.

Для предотвращения этой нежелательной связи в анодную нагрузку усилительной лампы $Л_1$ включается фильтр R_5—C_5. Реактивное сопротивление конденсатора C_5 должно быть небольшим по сравнению с сопротивлением резистора R_5 для звуковых частот. В этом случае наибольшая часть переменного анодного тока усилительной лампы $Л_1$ будет проходить через конденсатор C_5, минуя конденсатор C_8.

2. Понижение пульсаций выпрямленного напряжения. Для устранения фона иногда необходимо дальнейшее ослабление пульсирующего напряжения на сглаживающем конденсаторе C_8.

В этом случае так же, как и при развязке, необходимо, чтобы

реактивное сопротивление конденсатора C_5 было меньше по сравнению с сопротивлением резистора R_5, величина которого берется порядка 50 000 Ом.

Сетка выходной лампы связана через конденсатор связи C_6 с анодным сопротивлением R_4 лампы $Л_1$. Выходная лампа тоже имеет резистор R_7 с шунтирующим конденсатором C_7 для получения требуемого отрицательного смещения на сетке. Выходная энергия поступает в громкоговоритель через выходной трансформатор $Тр_1$.

Сверху приведены кривые переменных напряжений и токов в различных частях схемы.

Иногда каскад II из приемника исключается, и выходной каскад связывается непосредственно с сопротивлением нагрузки R_1 диода. В этом случае общее усиление получится ниже, и поэтому, чтобы сохранить данную выходную мощность, необходимо иметь большее напряжение высокой частоты на зажимах контура диода.

Если использовать вместо диода и лампы $Л_1$ одну лампу — двойной диод — триод, каскады I и II преобразуются в схему (рис. 187). Чтобы легче сравнить обе схемы, обозначения деталей сохранены. Об использовании второго диода будет сказано ниже.

ПРИЕМНИКИ ПРЯМОГО УСИЛЕНИЯ

Ламповым приемникам прямого усиления предшествовали приемники с кристаллическими детекторами (детекторные приемники). Рассмотрим особенности детекторных приемников.

Простой кристаллический детектор (имеющий одностороннюю проводимость) состоит из искусственно созданного кристалла и металла или из двух различных кристаллов.

На рис. 188 приведена схема простейшего детекторного приемника, состоящего из колебательного контура, детектора и телефона.

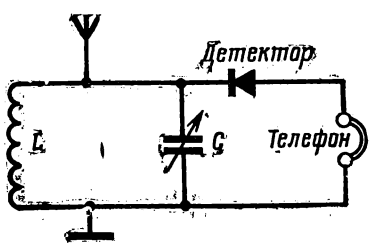


Рис. 188. Схема простейшего детекторного приемника

Напряжение высокой частоты выделяется колебательным контуром, настраиваемым переменным конденсатором C. К телефону подводится напряжение низкой частоты, получающееся после детектирования.

Основные преимущества детекторного приемника — простота схемы, отсутствие шума и отсутствие каких бы то ни было источников питания.

К недостаткам детекторного приемника относятся низкие чувствительность и избирательность и возможность приема станций только на телефон.

Осуществить громкоговорящий прием на детекторный приемник невозможно. Это объясняется тем, что в нем нет собственных

источников электрической энергии. Следовательно, звуки создаются только за счет принимаемой энергии передающей станции, а эта энергия очень мала.

Мощные радиовещательные станции можно принимать на детекторный приемник на расстоянии в несколько сот километров. На больших расстояниях прием становится нерегулярным.

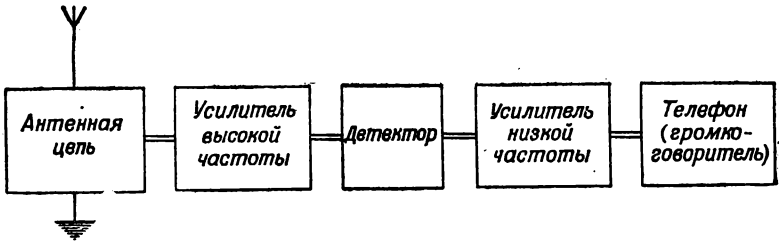


Рис. 189. Структурная схема лампового приемника прямого усиления

Дальность радиосвязи намного увеличилась с появлением ламповых приемников. Чувствительность и избирательность ламповых приемников несравненно выше, чем детекторных. Это дает возможность вести прием самых отдаленных станций.

На рис. 189 приведена структурная схема лампового приемника *прямого усиления*.

Приемником прямого усиления называется такой приемник, в котором усиливаются и подаются на детектор колебания той частоты, на которой работает принимаемая станция.

Из приведенной схемы видно, что приемник состоит из одного каскада усиления высокой частоты, детекторного каскада и одного каскада усиления низкой частоты.

Приемники прямого усиления просты по устройству и надежны в эксплуатации.

К недостаткам приемников прямого усиления следует отнести:

— непостоянство чувствительности и избирательности по диапазону; на коротких и ультракоротких волнах чувствительность и избирательность невелики;

— трудности распределения усиления между каскадами высокой и низкой частот.

Низкая чувствительность в области коротких и особенно ультракоротких волн объясняется тем, что резонансное сопротивление контуров

$$Z_{\text{рез}} = \frac{L}{CR}$$

мало, так как величина индуктивности L небольшая.

Ухудшение избирательности с переходом на более короткие волны объясняется расширением полосы пропускания приемника, вследствие чего помехи начинают оказывать более сильное влияние.

Для повышения чувствительности и избирательности приемника прямого усиления необходимо увеличить число каскадов усиления высокой частоты. В этом случае наблюдается явление *самовозбуждения*, которое заключается в том, что усилитель становится генератором высокочастотных колебаний.

Самовозбуждение возникает за счет паразитных связей через междуэлектродную емкость сетка — анод лампы, индуктивную связь между цепями, источники питания, емкость монтажа. Даже при тщательной экранировке трудно избавиться от самовозбуждения.

Увеличить чувствительность приемника прямого усиления путем значительного повышения усиления по низкой частоте (с одновременным уменьшением усиления по высокой часоте) нельзя. Для нормальной работы детектора требуется определенное напряжение, этим и объясняется необходимость усиления по высокой частоте. Кроме того, значительное усиление по низкой частоте приводит к *микрофонному эффекту*, сущность которого заключается в появлении в телефонах своеобразного «звона» при механических толчках. Это происходит вследствие изменения анодного тока при дрожании нити накала (особенно детекторной лампы и ламп низкой частоты).

Полная схема приемника

Усилитель высокой частоты собран на пентоде $Л_1$ (рис. 190). Он состоит из трех резонансных контуров L_2—C_2, L_3—C_5 и L_5—C_{10}. Два первых контура образуют полосовой фильтр, который через конденсатор C_7 подключен к управляющей сетке лампы. Контуры полосового фильтра имеют емкостную связь через конденсатор C_4, который входит как в первый, так и во второй контур. Связь полосового фильтра с антенной индуктивно-емкостная, осуществляемая через катушку индуктивности L_1 и конденсатор C_3.

Детекторный диод связан с третьим резонансным контуром L_5—C_{10} через конденсатор C_{13}. В этой схеме используется детектор с параллельно включенным потенциометром R_4.

В результате детектирования постоянное напряжение и переменное напряжение звуковой частоты появляются на потенциометре R_4. Переменное напряжение звуковой частоты подается через конденсатор связи C_{14} к управляющей сетке лампы усилителя низкой частоты (УНЧ).

УНЧ собран на триодной части лампы $Л_2$ и пентоде $Л_3$.

Фильтр C_{20}—R_{12} позволяет осуществлять регулировку тембра довольно простым способом. Когда потенциометр R_{12} выведен полностью (сопротивление равно нулю), конденсатор C_{20} непосредственно шунтирует первичную обмотку трансформатора громкоговорителя. Величина конденсатора C_{20} берется такой, что его реактивное сопротивление на верхних частотах примерно равно сопротивлению первичной обмотки трансформатора громкоговорителя. Бо́льшая часть верхних частот будет проходить через конденса-

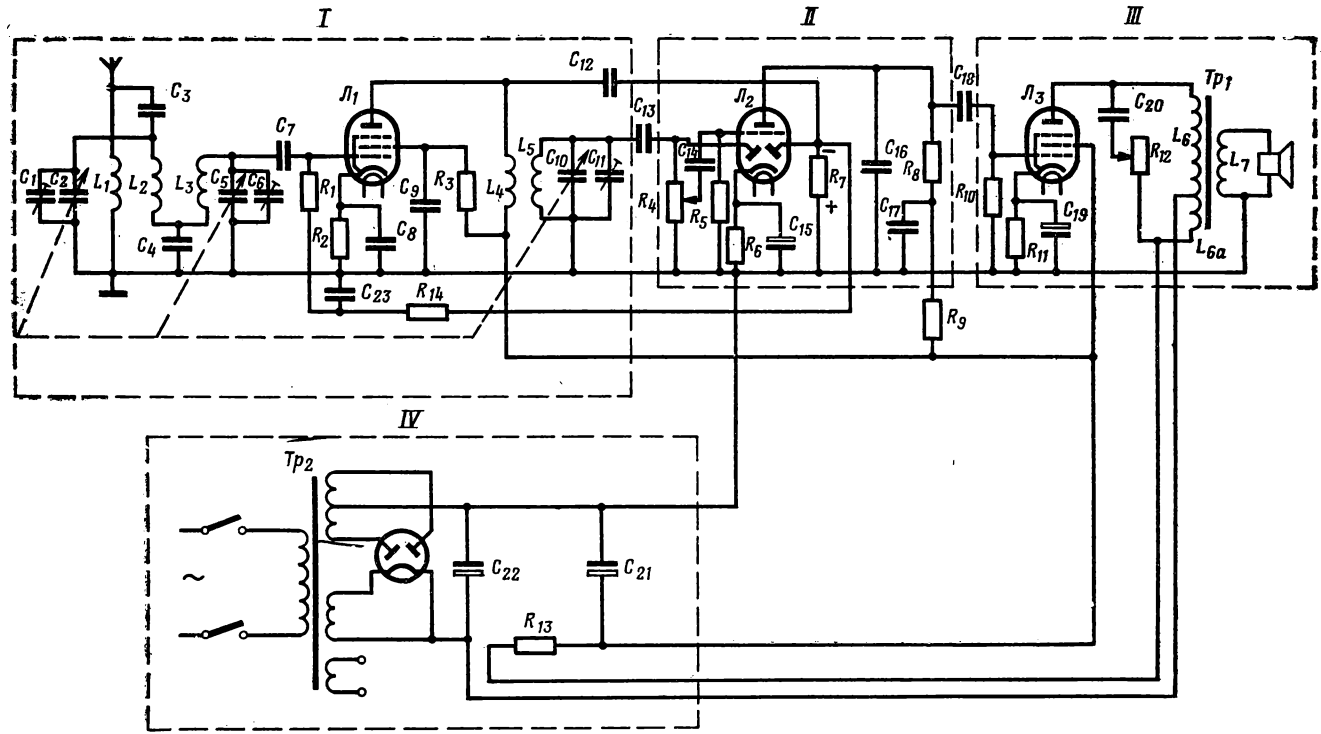


Рис. 190. Полная принципиальная схема приемника прямого усиления для работы от сети

тор C_{20}, минуя первичную обмотку трансформатора громкоговорителя. В этом случае верхние звуковые частоты ослабляются. Когда потенциометр R_{12} вводится, влияние конденсатора C_{20} будет уменьшаться, так как R_{12} включено последовательно с C_{20}. Таким образом, верхние звуковые частоты по желанию могут ослабляться регулировкой потенциометра R_{12}.

Эта регулировка тембра является односторонней, так как осуществляется изменение только верхних звуковых частот. Ниже остановимся на устройстве регулировки тембра, которая позволяет регулировать нижние звуковые частоты.

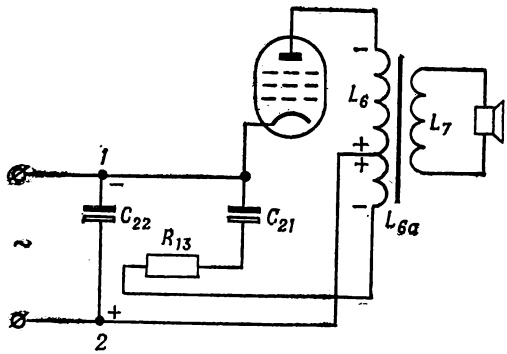


Рис. 191. Схема для снижения фона переменного тока

Одной из наиболее неприятных помех в каскадах звуковой частоты является фон переменного тока. Напряжение помех от фона переменного тока имеет частоту, равную частоте сети или удвоенной ее частоте, так что оно усиливается усилителем низкой частоты наравне с желаемым переменным напряжением.

Первичная обмотка трансформатора громкоговорителя Tp_1 имеет дополнительную обмотку L_{6a}, которая предназначена для уменьшения фона переменного тока.

Анодное напряжение для выходной лампы мощности поступает от накопительного конденсатора. На зажимах этого конденсатора имеется пульсирующее напряжение с удвоенной частотой сети. Это пульсирующее напряжение проходит через первичную обмотку трансформатора и может вызвать возрастание фона.

Упрощенная схема выходной цепи приведена на рис. 191. Пульсирующее напряжение с зажимов накопительного конденсатора C_{22} (точки *1* и *2*) попадает через выходной пентод мощности на первичную обмотку L_6 выходного трансформатора (мгновенная полярность напряжения фона показана «минус» вверху, а «плюс» внизу).

Пульсирующее напряжение между точками *1* и *2* появляется и на дополнительной обмотке L_{6a} через сглаживающий резистор R_{13} и сглаживающий конденсатор C_{21}. Плюс этого напряжения вверху, а минус внизу. Таким образом, оба напряжения фона, имея противоположную полярность, взаимно компенсируются.

Путем правильного подбора числа витков L_{6a} достигается хорошая компенсация фона.

Фон переменного тока может создаваться индуктивно от трансформатора сети. Поэтому последний следует правильно распола-

гать. Кроме того, напряжение питания для анода усилительной лампы низкой частоты $Л_2$ (рис. 190) дополнительно фильтруется (сглаживается) при помощи резистора R_9 и конденсатора C_{17}, которые уменьшают влияние пульсирующего напряжения, поступающего с выпрямителя, и не пропускают в цепь выпрямителя напряжение звуковой частоты.

Выводы сопротивлений и конденсаторов, подлежащие заземлению, следует соединять в одной точке, иначе между различными заземленными точками будет протекать ток, вызывая возрастание фона. Кроме того, необходимо предусмотреть, чтобы у конденсаторов, используемых для целей развязки, заземлялся вывод от внешней обкладки.

Следует использовать экранированные проводники, идущие к потенциометрам регулировки громкости и тембра. Экранирующая оплетка подключается к общей точке заземления. Так как экранированный провод обладает заметной емкостью по отношению к земле, то это может привести к затуханию верхних частот. Эти проводники по возможности должны быть короткими.

Микрофонный эффект. Микрофонный эффект выражается в воспроизведении громкоговорителем шумов от вибрации электродов в лампах. Микрофонный эффект может появляться в результате акустической обратной связи от громкоговорителя к лампам. Под влиянием этого лампа начинает механически вибрировать, вследствие чего появляется «завывание». Мерой борьбы с этим явлением служат закрепление панели усилительной лампы низкой частоты на пружинах к шасси или применение противовибрационного устройства, надеваемого на лампу.

Чтобы упростить управление приемником, переменные конденсаторы C_2, C_5 и C_{10} (рис. 190) находятся на одной оси. Для каждого положения строенных переменных конденсаторов три резонансных контура должны настраиваться на одну и ту же частоту. Выполнить условие получения одной и той же частоты во всех контурах не удастся, так как параллельно конденсаторам C_2, C_5 и C_{10} добавляются паразитные емкости между электродами ламп и проводами. Паразитные емкости обычно различные для каждого из трех контуров, например: 10 пФ для первого, 15 пФ для второго и 20 пФ для третьего контура.

Если емкость переменного конденсатора меняется в пределах 20—500 пФ, то из-за паразитных емкостей она будет различной для каждого из контуров: 30—510 пФ, 35—515 пФ и 40—520 пФ для первого, второго и третьего контуров соответственно. Чтобы получить одни и те же пределы изменения емкостей, параллельно переменным конденсаторам включаются триммеры (подстроечные конденсаторы) C_1, C_6 и C_{11}. Подстройкой триммеров осуществляется получение одной и той же общей минимальной емкости контуров.

Для любого положения переменных конденсаторов (емкость каждого из них будет одна и та же) при наличии катушек с одной

и той же индуктивностью (L_2, L_3 и L_5) требование получения одной и той же частоты будет выполняться.

Сигнал, поступая на управляющую сетку лампы $Л_1$, усиливается этой лампой и затем выделяется на катушке индуктивности L_4.

Переменное напряжение, индуктируемое катушкой L_4 в третий резонансный контур, выпрямляется диодной частью лампы $Л_2$. Переменное напряжение звуковой частоты после детектирования создает падение напряжения на потенциометре R_4, который используется для регулировки громкости. Напряжение звуковой частоты подводится через конденсатор связи C_{14} к сетке лампы $Л_2$.

Усиленное переменное напряжение звуковой частоты с анодной нагрузки резистора R_8 подводится через конденсатор связи C_{18} к управляющей сетке выходной лампы мощности $Л_3$.

Конденсатор C_{16} емкостью около 100 пФ, подключенный параллельно резистору R_8, замыкает на землю любое возможное переменное напряжение высокой частоты, которое может пройти через детектор.

С выходной лампы $Л_3$ энергия звуковой частоты поступает к громкоговорителю через согласующий трансформатор $Тр_1$.

Анодное напряжение для ламп $Л_3$ берется от накопительного конденсатора C_{22}, напряжение для экранирующей сетки этой лампы и напряжения питания для других ламп — с конденсатора фильтра C_{21}.

Компенсация замирания или автоматическая регулировка усиления

Действие автоматической регулировки усиления (АРУ) основано на том, что приемник самостоятельно поддерживает силу звука на определенном уровне. Если в результате замирания напряжение сигнала в антенне уменьшается, приемник автоматически переходит на большее усиление, сохраняя прежнюю громкость на выходе.

На рис. 192 приведена схема каскада высокой частоты с диодным детектором. Постоянное напряжение создается на резисторе R_1 нагрузки диода, как только напряжение высокой частоты появляется на зажимах резонансного контура L_3—C_3. Постоянное напряжение, которое изменяется пропорционально изменению напряжения высокой частоты, отрицательной полярностью подводится обратно к управляющей сетке усилительной лампы, изменяя ее усиление.

Кроме постоянного напряжения на резисторе R_1 детектора имеется переменное напряжение звуковой частоты (напряжение модуляции несущей волны). Чтобы исключить попадание этого напряжения на сетку лампы (иначе оно будет искажать модуляцию принимаемого сигнала), включен фильтр, состоящий из резистора R_2 и конденсатора C_2. Величина конденсатора C_2 такова, что его реактивное сопротивление при наинизшей звуковой частоте

мало по сравнению с сопротивлением R_2. Типичные величины конденсатора и сопротивления составляют 0,1 мкФ и 1 МОм соответственно. В этом случае напряжение звуковой частоты блокируется и на управляющую сетку лампы УВЧ поступает только постоянное напряжение.

Для нормальной работы АРУ необходимо, чтобы крутизна $\frac{L_2}{U_g}$ лампы УВЧ резко изменялась по мере изменения отрицательного напряжения на сетке.

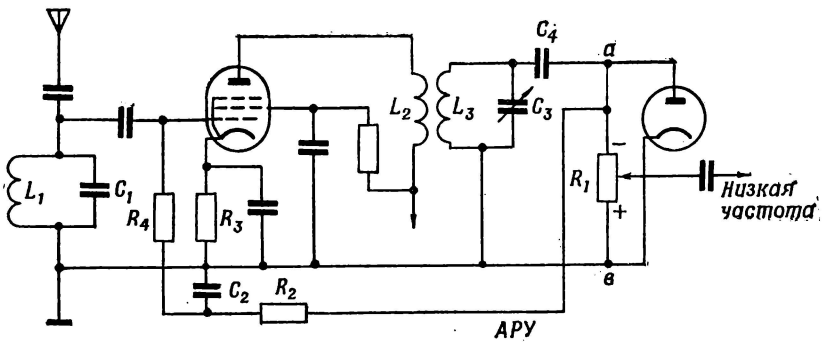


Рис. 192. Схема усилителя высокой частоты с автоматической регулировкой усиления

Для усиления колебаний высокой частоты применяются лампы с переменной крутизной характеристики.

Автоматическая регулировка усиления с задержкой

Рассмотренная выше схема начинает действовать, как только начнет поступать несущая волна. При этом на зажимах сопротивления детектора создается постоянное напряжение, и усиление лампы высокой частоты уменьшается. Эта регулировка усиления работает и при приеме слабой станции, уменьшая усиление и без того слабого сигнала, в результате чего слышимость этой станции будет недостаточной. Поэтому желательно, чтобы АРУ начинала работать только при приеме сигнала, превышающего определенный установленный уровень, т. е. не уменьшала усиление сигналов слабых станций. Для этого в схему вводится так называемая автоматическая регулировка усиления с задержкой.

Для получения задержки в регулировке усиления используется второй диод (рис. 193). В этой схеме диод $Л_1$ используется в качестве детектора. Диод $Л_2$ подключается через конденсатор C_6 небольшой емкости к резонансному контуру L_1—C_1. Анод этого диода имеет по отношению к катоду отрицательный потенциал, созданный батареей $U_д$.

Предположим, что отрицательное напряжение на аноде диода равно 2 В. До тех пор пока не появится положительное напряжение на аноде, через диод ток протекать не будет. При приеме сигнала переменное напряжение высокой частоты от контура L_1—C_1 через конденсатор C_6 прикладывается между анодом и катодом диода. Пока амплитуда напряжения высокой частоты меньше от-

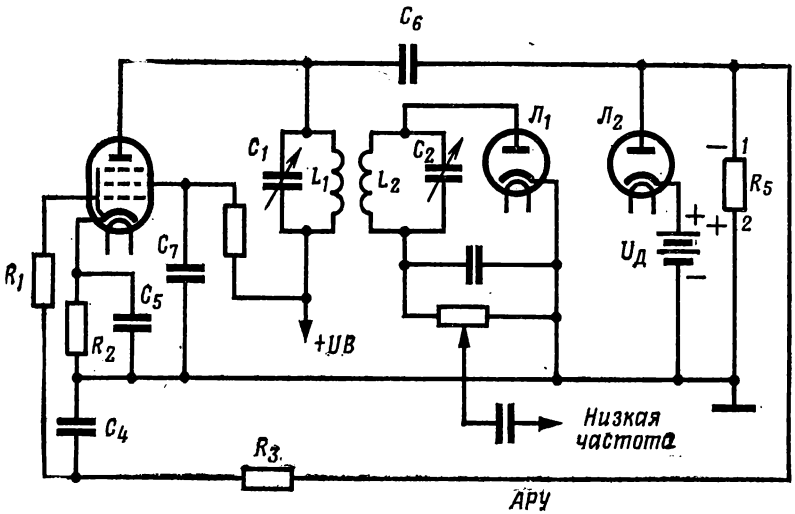


Рис. 193. Схема усилителя высокой частоты с задержкой АРУ

рицательного напряжения $U_д$, анод диода будет оставаться отрицательным и ток через диод протекать не будет. Когда напряжение высокой частоты (скажем, 3 В) превысит напряжение $U_д$, анод диода в течение положительной полуволны напряжения станет положительным (3—2=1 В положительного напряжения) и диод начнет проводить ток.

Ток диода, протекая через резистор R_5, создает на нем падение напряжения. Точка *1* имеет отрицательный потенциал по отношению к точке *2*. При увеличении переменного напряжения высокой частоты возрастает и диодный ток, а следовательно, и падение напряжения на резисторе R_5. Через сглаживающий фильтр R_3—C_4 минус этого напряжения поступает на управляющую сетку лампы усилителя высокой частоты, тем самым снижая ее усиление.

Практически отрицательное напряжение на анод диода $Л_2$ поступает с катодного сопротивления или с сопротивления в отрицательной ветви источника тока. На рис. 190 напряжение задержки поступает с катодного сопротивления резистора R_6 лампы $Л_2$.

Левый диод лампы $Л_2$ служит детектором, а правый диод используется для АРУ. Он через конденсатор C_{12} подключается к L_4 анодной нагрузки лампы $Л_1$ и через резистор R_7 к нижнему концу резистора R_6. Напряжение АРУ снимается с резистора R_7

и подводится через фильтр R_{14}—C_{23} и резистор R_1 к управляющей сетке лампы $Л_1$. Постоянное напряжение смещения на управляющую сетку этой лампы берется с резистора R_2.

Таким образом, в этой схеме лампа $Л_2$ выполняет три функции:

— детектора;
— выпрямителя для получения напряжения АРУ;
— усилителя низкой частоты (триод).

СУПЕРГЕТЕРОДИННЫЕ ПРИЕМНИКИ

Выделение принимаемой станции осуществляется в высокочастотной части с помощью одного или более резонансных контуров. Избирательность этих контуров в бо́льшей степени зависит от активных потерь в них, которые увеличиваются с возрастанием частоты. В результате этого избирательность становится хуже по мере роста частоты.

Так как в приемнике прямого усиления контуры каждый раз настраиваются в резонанс на принимаемую частоту диапазона, то избирательность резонансных контуров будет зависеть от частоты, на которую они настроены. Вследствие этого трудно получить хорошую избирательность при очень высоких частотах (при длинах волн короче 50 м).

Увеличивающиеся потери в резонансных контурах при более высоких частотах приводят к уменьшению эквивалентного сопротивления контуров (контур, который имеет эквивалентное сопротивление порядка 100 000 Ом в средневолновом диапазоне, будет иметь эквивалентное сопротивление примерно 15 000 Ом при длине волны 15 м). Так как усиление по высокой частоте пропорционально эквивалентному сопротивлению резонансного контура, то это значит, что будет трудно получить достаточное усиление на коротких волнах.

Стремление избавиться от недостатков приемника прямого усиления привело к созданию супергетеродинного приемника, в котором эти недостатки в значительной степени устранены.

Если в приемнике прямого усиления принимаемый сигнал подвергается усилению по двум частотам (по высокой частоте и после детектирования — по низкой частоте), то в супергетеродинном приемнике усиление происходит по меньшей мере по трем частотам: частоте сигнала, промежуточной частоте и низкой (звуковой) частоте.

В супергетеродинном приемнике в отличие от приемников прямого усиления любая частота приходящего сигнала в пределах диапазона преобразуется в одну постоянную, так называемую промежуточную частоту. Основное усиление в этих приемниках производится по промежуточной частоте, которая лежит выше частоты звуковых и ниже частоты приходящих колебаний.

На рис. 194 приведена структурная схема супергетеродинного приемника с одной промежуточной частотой.

В антенной цепи приемника включен входной контур, являющийся предварительным избирательным устройством. За предварительным избирательным устройством идет усилитель высокой частоты, обеспечивающий увеличение чувствительности приемника. В простых супергетеродинных приемниках усилителя высокой частоты может и не быть.

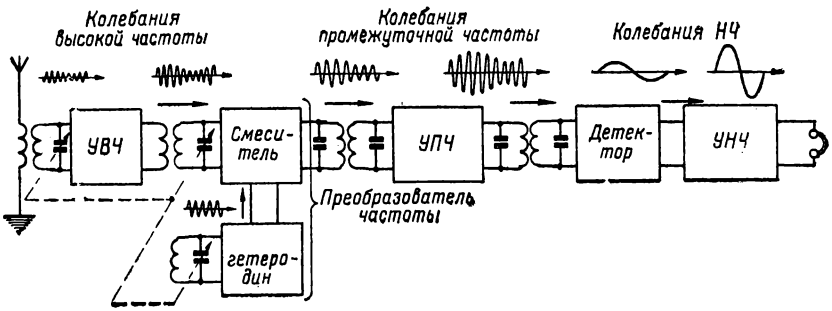


Рис. 194. Структурная схема супергетеродинного приемника

Далее в отличие от приемника прямого усиления идет не детектор, а преобразователь частоты, состоящий из *смесителя* и *гетеродина* (маломощного генератора). Принцип работы преобразователя описывается ниже.

После преобразователя сигнал поступает на усилитель промежуточной частоты (УПЧ), затем на детектор и, наконец, на усилитель низкой частоты.

Усилитель промежуточной частоты представляет собой обычный усилитель высокой частоты.

Усилитель низкой частоты не отличается от подобного усилителя приемника прямого усиления.

В детекторном каскаде чаще всего используется диодное детектирование (в приемниках прямого усиления обычно использовалось сеточное детектирование).

В супергетеродинном приемнике можно значительно усилить сигналы до детекторного каскада и обеспечить нормальную работу диодного детектора.

К достоинствам приемника супергетеродинного типа относятся:

— высокая чувствительность и избирательность;

— постоянство чувствительности и избирательности по диапазону;

— простота в управлении.

В супергетеродинных приемниках можно получить большое усиление (а значит, и высокую чувствительность) без появления самовозбуждения. Это объясняется тем, что сигнал усиливается на трех или даже четырех (при двойном преобразовании частоты) частотах. Кроме того, УПЧ во время приема сигналов любой станции не перестраивается, что дает возможность большого усиления.

Наконец, в этих приемниках, значительно проще получить большое усиление на более низкой (промежуточной) частоте, чем частота приходящего сигнала.

Высокая избирательность, особенно на коротких и ультракоротких волнах, объясняется следующим.

Допустим, коротковолновый передатчик работает на волне 30 м (10 МГц). При этом избирательность входного контура и усилителя высокой частоты низкая. Однако после преобразователя получается промежуточная частота, например 500 кГц, что соответствует сравнительно длинной волне (600 м). При такой частоте можно получить высокую избирательность резонансных контуров, входящих в состав усилителя промежуточной частоты.

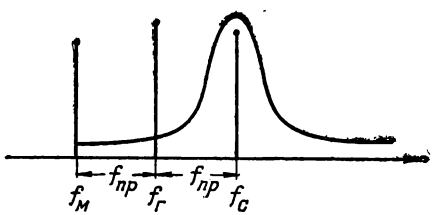


Рис. 195. Зеркальная помеха

Простота управления супергетеродинного приемника достигается тем, что конденсаторы настройки контуров высокой частоты и первого гетеродина можно расположить на общей оси.

К недостаткам супергетеродинных приемников следует отнести сложность схемы (по сравнению с приемником прямого усиления) и возможность проникания помех по побочным каналам.

Одним из побочных каналов помех являются помехи, частоты которых близки к промежуточной частоте или равны ей. Если среди мешающих станций найдется такая, которая работает на частоте, близкой к промежуточной частоте приемника, и сигналы этой станции дойдут до смесителя, то они усилятся и создадут на выходе приемника помехи. Ослабить или полностью «подавить» эти помехи можно только до смесителя в усилителе высокой частоты, так как одного входного контура для этого недостаточно.

Не менее вредной помехой по побочному каналу является помеха на так называемой *зеркальной частоте.*

Если частота мешающей станции $f_м$ расположена относительно частоты гетеродина $f_г$ симметрично частоте принимаемого сигнала $f_с$ (рис. 195), то

$$f_г - f_м = f_{пр}.$$

Следовательно, помеха на зеркальной частоте (зеркальная помеха) будет преобразовываться и усиливаться после смесителя точно так же, как и полезный сигнал.

Ослабить зеркальную помеху можно только до смесителя. Значит, и в этом случае желательно иметь усилитель высокой частоты.

Сравнивая достоинства и недостатки приемников прямого уси-

ления и супергетеродинных приемников, следует отметить, что последние более совершенны и поэтому получили широкое распространение.

Рассмотрим работу преобразователя супергетеродинного приемника, так как подобного каскада в приемнике прямого усиления нет.

Принцип работы преобразователя

Преобразователем называется устройство, преобразующее частоту колебания принимаемого сигнала в более низкую, промежуточную частоту.

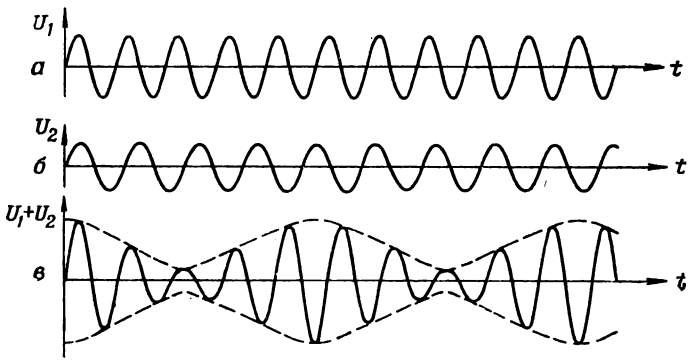


Рис. 196. Явление биений при сложении двух колебаний с разными частотами

Преобразование частоты сигнала в промежуточную частоту осуществляется методом биений, сущность которого сводится к следующему.

Колебания маломощного генератора высокой частоты (гетеродина) накладываются на колебания высокой частоты принимаемого сигнала, причем частота гетеродина отличается на определенную величину от частоты принимаемого сигнала.

При наложении (сложении) двух высокочастотных колебаний с различными частотами (рис. 196, *а* и *б*) получается новое высокочастотное колебание (рис. 196, *в*) с непрерывно меняющейся амплитудой. Частота изменения амплитуды, называемая *частотой биений,* равна разности наложенных частот.

Для лучшего уяснения процесса преобразования рассмотрим упрощенную схему преобразователя (рис. 197).

В катушке индуктивности L_1 индуктируется э. д. с. с частотой, равной частоте приходящего сигнала, в катушке L_2 — с частотой, равной частоте гетеродина. При отсутствии диода *Л* в цепи, состоящей из индуктивностей L_1, L_2 и колебательного контура *LC*, возникли бы биения (рис. 198, *а*). Из рисунка видно, что биения напоминают собой модулированные колебания.

Гетеродин генерирует колебания с частотой, которая отличается от частоты принимаемой станции всегда на одну и ту же величину. Эта разностная частота является также высокой частотой.

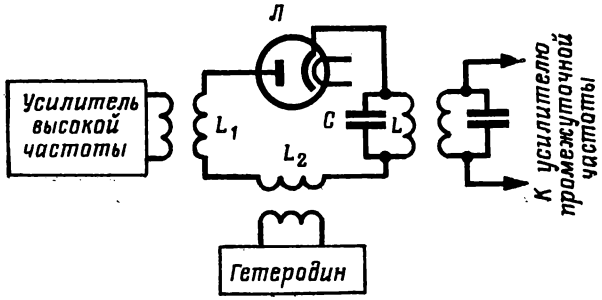


Рис. 197. Упрощенная схема преобразователя

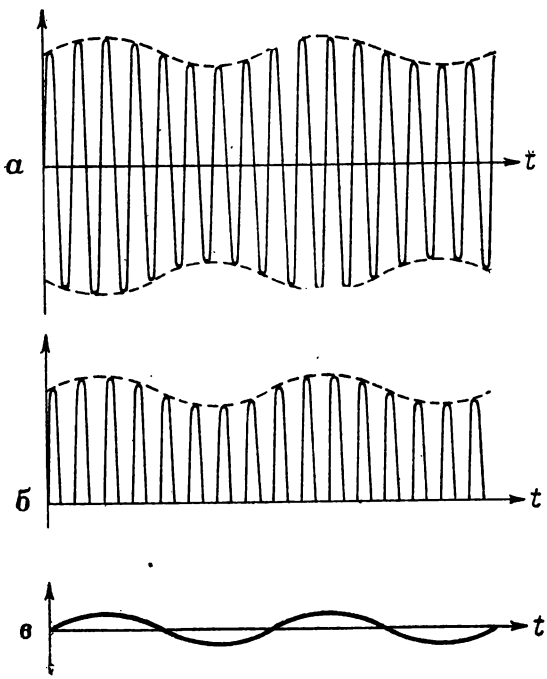


Рис. 198. Графическое изображение физических процессов, происходящих в преобразователе:

а — биения, получающиеся в результате сложения колебаний приходящего сигнала и гетеродина; *б* — пульсирующий ток в анодной цепи преобразователя; *в* — колебания промежуточной частоты

Чтобы отличить ее от более высокой частоты принимаемого сигнала, она называется *промежуточной частотой.*

Преобразователь частоты, иногда называемый смесителем,

можно сравнить с модулятором в передатчике, который накладывает сигналы микрофона на несущую волну.

В каскаде преобразования частоты супергетеродинного приемника колебания гетеродина смешиваются с принимаемыми колебаниями. В результате этого две составляющие тока появляются в анодной цепи смесительной лампы с частотами, равными сумме и разности частот гетеродина и принимаемого сигнала. Когда принимаемый сигнал промодулирован, эта модуляция сохраняется в вышеупомянутых частотах.

Промежуточная частота получается не простым сложением или вычитанием частоты гетеродина и принимаемого сигналов. Необходимо, чтобы преобразователь частоты, к которому оба сигнала подводятся, имел свойство детектора. (Вследствие этого преобразователь частоты обычно называется первым детектором.)

Дальнейший процесс в преобразователе подобен процессу, происходящему при детектировании модулированных колебаний.

Для выделения частоты биений в схему (см. рис. 197) включен диод *Л*, который пропускает только положительные полупериоды колебаний (рис. 198, *б*). Получившийся пульсирующий ток можно разложить на постоянную и переменную составляющие. Переменная составляющая представляет собой спектр частот, в который входят частота сигнала, частота гетеродина, суммарная и разностная частоты гетеродина и сигнала и т. д. Нас интересует частота, равная разности частот гетеродина и сигнала, т. е. промежуточная частота.

Преобразование частоты является довольно сложным процессом. Более подробное его рассмотрение выходит за рамки настоящего пособия. Для нас важно уяснить, что в результате «детектирования» в преобразователе частоты анодная цепь лампы содержит переменные токи с частотами, равными прикладываемым частотам, а также их сумме и разности. Например, частота принимаемого сигнала равна 1500 кГц, а частота местного гетеродина равна 2000 кГц. В анодной цепи будут токи следующих частот: 1500 кГц, 2000 кГц, 2000+1500=3500 кГц и 2000—1500=500 кГц.

Контур, включенный в анодную цепь преобразователя частоты, настраивается на промежуточную частоту.

Напряжение промежуточной частоты также промодулировано звуковой частотой, как и переменное напряжение несущей волны. Напряжение промежуточной частоты усиливается, а затем подводится к детектору.

Супергетеродинный приемник имеет канал усиления по промежуточной частоте, состоящий из одного или нескольких каскадов усиления. В остальном схема супергетеродинного приемника совпадает со схемой приемника прямого усиления.

Усилитель промежуточной частоты независимо от частоты принимаемой станции всегда остается настроенным на одну и ту же частоту. При этой постоянной частоте очень легко получить хорошую избирательность одновременно с высокой, практически по-

стоянной чувствительностью. При переключении с одного диапазона на другой усилитель промежуточной частоты остается неизменным.

Цепи преобразователя частоты

Лампу преобразователя частоты можно разделить на генераторную и модуляторную части (смеситель). Преобразователь частоты состоит из следующих основных частей:

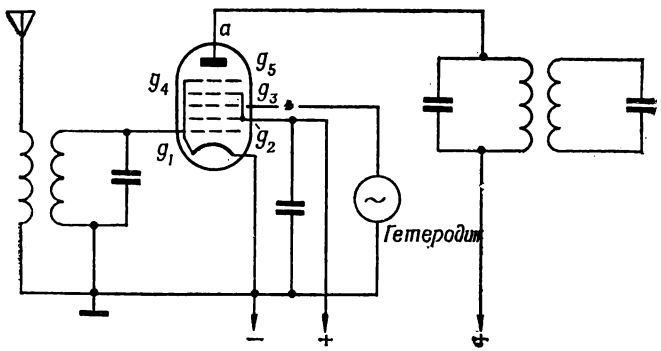


Рис. 199. Принципиальная схема преобразователя частоты на гептоде (шестиэлектродная лампа)

— высокочастотной секции, которая подводит сигнал высокой частоты к управляющей сетке смесителя;

— гетеродина, колебания которого обычно прикладываются к отдельной сетке смесителя;

— контура промежуточной частоты в анодной нагрузке смесителя.

Чтобы устранить непосредственное взаимодействие между входной цепью высокой частоты и гетеродином и тем самым предотвратить возможность частичного излучения последнего через антенну, для преобразования частоты используется гептод (рис. 199). К одной управляющей сетке g_1 подсоединяется контур высокой частоты, к другой управляющей сетке, т. е. к третьей сетке g_3,— гетеродин. Между сетками g_1 и g_3 имеется экранирующая сетка g_2, которая подключается через конденсатор к «земле». Кроме того, на экранирующую сетку подается положительный потенциал, как в пентоде.

Между сеткой g_3 и анодом имеется вторая экранирующая сетка g_4, которая подключается внутри лампы к первой экранирующей сетке g_2. Противодинатронная сетка g_5 обычно подключается к катоду.

Еще одно назначение автоматической регулировки усиления

Автоматическая регулировка усиления (АРУ), как уже было сказано, вводится для компенсации явления замирания. Назначение АРУ в этом случае — получить более постоянное выходное напряжение, когда величина принимаемого сигнала меняется.

С первого взгляда может показаться, что АРУ теряет свое на-

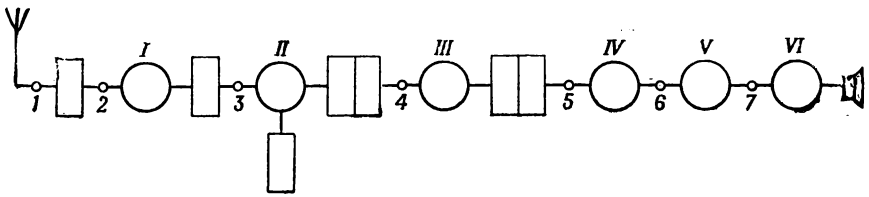


Рис. 200. Структурная схема супергетеродинного приемника

значение при приеме мощных местных станций, так как в этом случае замирания не наблюдается, поскольку принимаемый сигнал все время достаточно сильный.

Когда поступают сильные сигналы, задача АРУ сводится к ограничению их величины. В этом случае АРУ обеспечивает определенный уровень сигнала на сетках ламп, на которые подается его напряжение. Если принимаемый сигнал станет слишком большим, то в репродукторе прослушивается искажение передачи.

Проследим, какой величины может быть напряжение сигнала для среднего радиоприемника с усилением по высокой частоте.

На рис. 200 приведена структурная схема супергетеродинного приемника, в который входят следующие каскады:

I — усилитель высокой частоты;

II — преобразователь частоты;

III — усилитель промежуточной частоты;

IV — детектор;

V — усилитель низкой частоты;

VI — выходной каскад мощности.

Предположим, что антенный контур дает усиление сигнала в 5 раз, усиление по напряжению каскада высокой частоты в 10 раз, усиление при преобразовании смесительного каскада в 80 раз, усиление по промежуточной частоте в 125 раз. Каскад детектора (IV) усиления по напряжению не дает. В этом каскаде модулированный высокочастотный сигнал преобразуется в сигнал звуковой частоты, а мы знаем, что сила этого сигнала зависит от глубины модуляции. Если детектирование идеальное и глубина модуляции 30%, сигнал звуковой частоты в точке *6* будет составлять 0,3 величины сигнала промежуточной частоты в точке *5*. В действительности это будет еще меньше, так что в нашем случае при глубине модуляции 30% будем считать отношение равным 0,2. Каскад усилителя звуковой частоты дает усиление в 10 раз.

Таким образом, от антенны до сетки выходной лампы мы получаем общее усиление $5 \cdot 10 \cdot 80 \cdot 125 \cdot 0{,}2 \cdot 10 = 1\,000\,000$ раз. Это большое усиление, но и оно может оказаться недостаточным, чтобы довести выходную лампу до отдачи ею максимальной мощности.

Предположим, что далеко расположенная станция индуктирует в антенне напряжение, равное 2 мкВ. Регулировка усиления громкости установлена на максимуме. В этом случае будем иметь напряжение звуковой частоты 2 В на сетке выходной лампы. В некоторых случаях это напряжение может оказаться недостаточным.

Мощные (местные) станции могут легко создать 1 В напряжения в антенне. В этом случае, если не будет АРУ в приемнике, напряжение 50 В будет прикладываться к управляющей сетке лампы преобразователя частоты и вызывать искажение модуляции в этом каскаде.

При приеме местных станций усиление приемника нужно понижать. Осуществить это ручной регулировкой громкости не представляется возможным, так как это сопротивление включается между детектором и усилителем низкой частоты, а искажения уже начинаются в смесительной лампе или в усилителе промежуточной частоты.

Автоматическая регулировка усиления, первоначально появившаяся для компенсации затуханий, впоследствии стала выполнять и другую задачу — предотвращение искажений при приеме сильных сигналов.

ПРИЕМ ЧАСТОТНО-МОДУЛИРОВАННЫХ КОЛЕБАНИЙ

Мы знаем, что при частотной модуляции амплитуда высокочастотных колебаний не изменяется; по закону звуковых колебаний изменяется лишь частота сигнала. Если продетектировать частотно-модулированную передачу, то можно выделить только постоянный ток, так как детектор дает выпрямленный ток, пропорциональный амплитудам сигнала, независимо от частоты последнего. Следовательно, перед детектированием необходимо преобразовать частотную модуляцию в амплитудную. Перед обычным детектором должен стоять преобразователь модуляции. Сочетание преобразователя модуляции с детектором называется *дискриминатором (различителем, распознавателем)*.

Перед преобразователем частотной модуляции необходимо устранить амплитудные искажения, которые возникают в приемнике, а отчасти и в передатчике при частотной модуляции. Вредная дополнительная амплитудная модуляция особенно заметна при широкополосной частотной модуляции, когда частота изменяется в широких пределах от своего среднего значения. Вспомним форму кривой резонанса колебательного контура: чем больше отклоняется частота сигнала от среднего значения, тем хуже он проходит через каскад.

Кроме этих амплитудных искажений появляются искажения, вызванные беспорядочными электрическими колебаниями постороннего происхождения.

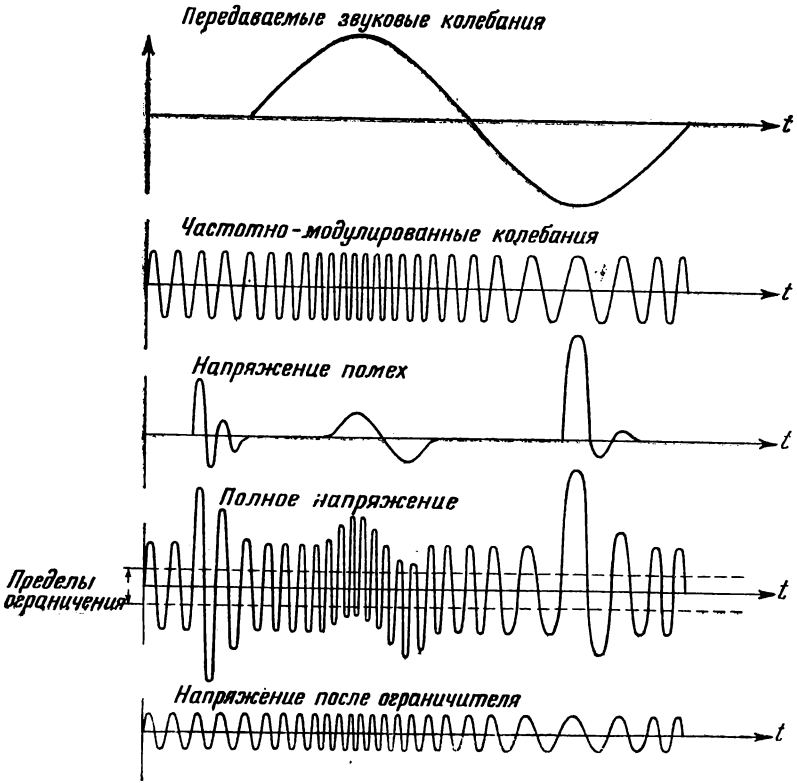


Рис. 201. Графическое пояснение работы ограничителя при приеме частотно-модулированных колебаний

Паразитная амплитудная модуляция устраняется ограничением амплитуды сигнала. Эту функцию выполняет амплитудный ограничитель.

Рис. 201 помогает уяснить работу ограничителя. Напряжение после ограничения почти ничем не отличается от напряжения частотно-модулированного колебания.

Таким образом, в состав приемника частотно-модулированных колебаний входит *амплитудный ограничитель*. Назначение ограничителя — превратить колебания изменяющейся амплитуды в колебания постоянной амплитуды. Широкое распространение получили ограничители, работающие по принципу использования токов сетки (включение в цепь сетки сопротивления, зашунтированного конденсатором). Встречаются ограничители, в которых используется явление насыщения анодного тока.

Рассмотрим принцип работы преобразователя модуляции.

Схема простейшего преобразователя модуляции изображена на рис. 202. В анодную цепь лампы последнего каскада усилителя промежуточной частоты (для приема частотно-модулированных

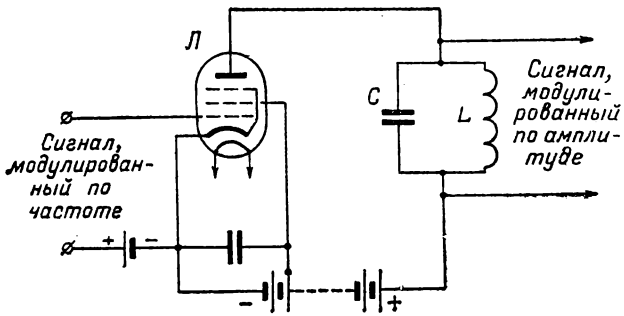


Рис. 202. Принципиальная схема преобразователя частотной модуляции в амплитудную

сигналов обычно применяются супергетеродинные приемники) включен колебательный контур LC. Этот контур несколько расстроен относительно среднего значения промежуточной частоты.

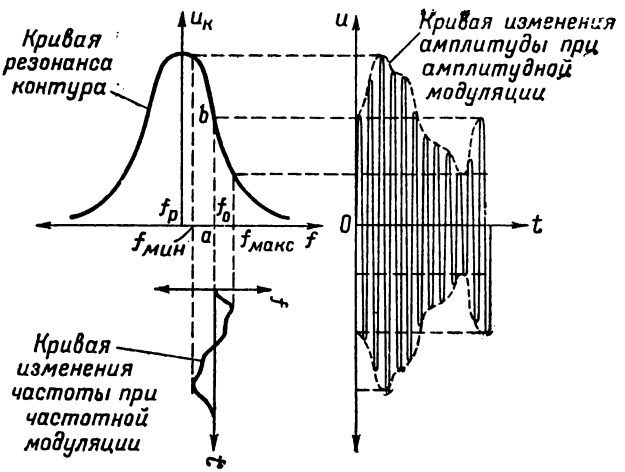


Рис. 203. Преобразование частотной модуляции в амплитудную

Работа схемы поясняется рис. 203. Здесь изображена резонансная кривая контура LC, дающая зависимость напряжения на контуре $u_к$ от частоты f действующих на него сигналов. Несущая частота f_0 отличается от резонансной частоты контура $f_р$. При отсутствии модуляции амплитуда напряжения на контуре равна како-

му-то значению ab. При частотной модуляции частота сигналов непрерывно колеблется от $f_{макс}$ до $f_{мин}$. Закон, по которому происходит изменение, или, как принято говорить, качание частоты, т. е. закон частотной модуляции, характеризуется кривой, показанной отдельно внизу. Амплитуда переменного напряжения на контуре меняется приблизительно по тому же закону.

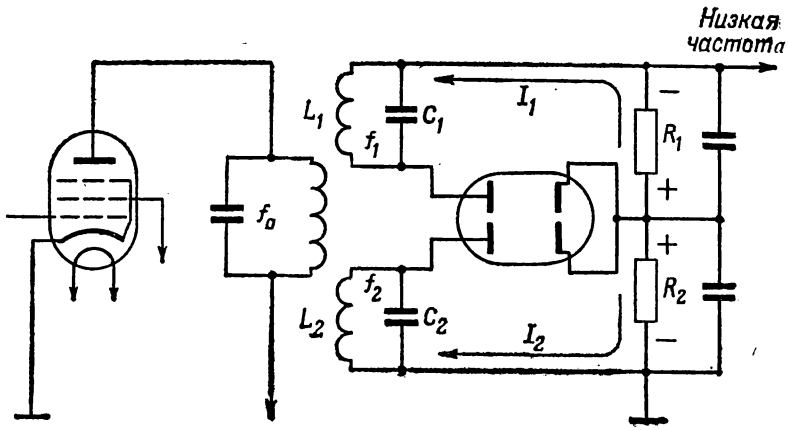


Рис. 204. Схема дискриминатора с двумя связанными контурами

График изменения напряжения на контуре LC во времени, изображенный в правой части рисунка, имеет типичный вид графика амплитудно-модулированного колебания, которое теперь можно детектировать обычным детектором.

Простейший дискриминатор (использование одного расстроенного контура) имеет существенный недостаток. Нелинейность спада кривой резонанса приводит к тому, что амплитудная модуляция передает закон частотной модуляции с заметными искажениями. Это заставило применять более сложные, но и более совершенные схемы дискриминаторов.

На рис. 204 приведена схема дискриминаторов, в которой в анодную цепь лампы включен контур, настроенный на несущую частоту f_0. С этим контуром индуктивно связаны два других контура, один из которых настроен на частоту $f_1=f_0+\Delta f$, а другой — на частоту $f_2=f_0-\Delta f$. Другими словами, контуры расстроены по отношению к несущей частоте в разные стороны на одну и ту же величину. К каждому из контуров подключен свой детектор. Равные между собой нагрузочные сопротивления резисторов R_1 и R_2 включены так, что к сетке усилителя низкой частоты подводится разность выпрямленных напряжений. Эта разность может иметь знак «+» или «—» в зависимости от величины напряжения на резисторах R_1 и R_2.

Рассмотрим работу схемы. Если частота принимаемого сигнала равна f_0, то он создает на зажимах контуров L_1C_1 и L_2C_2 равные напряжения, следовательно, равны будут и выпрямленные

напряжения на резисторах R_1 и R_2. Выпрямленные напряжения компенсируются, и суммарное напряжение равно нулю.

При повышении частоты сигнала она будет приближаться к резонансной частоте верхнего контура и удаляться от резонансной частоты нижнего контура. Напряжение сигнала на верхнем контуре L_1C_1 увеличится, а на нижнем контуре L_2C_2 уменьшится. Вследствие этого выпрямленное напряжение на резисторе R_1 увеличится, а на резисторе R_2 уменьшится. Суммарное выпрямленное напряжение не будет равно нулю, оно окажется отрицательным. При понижении частоты сигнала картина изменится, суммарное выпрямленное напряжение станет положительным. Таким образом, суммарное выпрямленное напряжение повторяет закон модуляции.

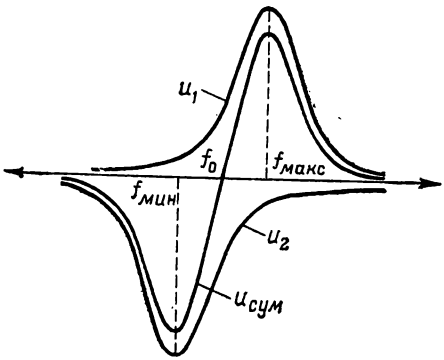


Рис. 205. График, поясняющий работу дискриминатора с двумя расстроенными контурами

По существу, мы имеем два дискриминатора с расстроенными контурами, включенные навстречу один другому. На рис. 205 приведены кривые зависимости выпрямленного напряжения u_1 и u_2 на резисторах R_1 и R_2 от частоты. При средней частоте f_0 эти напряжения равны, следовательно, суммарное напряжение $u_{сум}$ равно нулю. При изменении частоты одно из этих напряжений увеличивается, а другое уменьшается. Суммарное выпрямленное напряжение $u_{сум}=u_1+u_2$ получается путем сложения обеих кривых для каждого значения частоты.

Суммарная кривая на участке от $f_{мин}$ до $f_{макс}$ имеет практически линейную форму, так как нелинейные участки отдельных кривых взаимно компенсируются. Поскольку преобразование частотной модуляции в амплитудную происходит на этом участке, то получается меньшее искажение модуляции, чем в простой схеме.

ОПТИЧЕСКИЙ ИНДИКАТОР НАСТРОЙКИ

Большое распространение для настройки колебательных контуров в супергетеродинных приемниках и измерительной аппаратуре получили специальные лампы, так называемые оптические (электронные) индикаторы настройки.

Появление таких указателей настройки вызвано тем, что супергетеродинные приемники работают хорошо только при точной настройке на частоту принимаемой станции. При наличии мешающих станций и других видов помех определить момент точной настройки на слух довольно трудно.

Рассмотрим принцип устройства и работу оптического индика-

тора настройки типа 6Е5С. На рис. 206 показано схематическое устройство и условное изображение этого индикатора. В нижней части баллона лампы расположен триод, используемый в качестве усилителя, в верхней — собственно электронный индикатор, состоящий из металлического экрана *1*, катода *2* и управляющего электрода *3*.

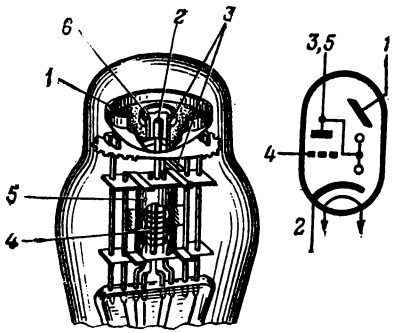


Рис. 206. Схематическое устройство и условное изображение оптического индикатора настройки:

1 — экран; *2* — катод; *3* — управляющий электрод; *4* — сетка триода; *5* — анод триода; *6* — щиток, загораживающий свет от катода

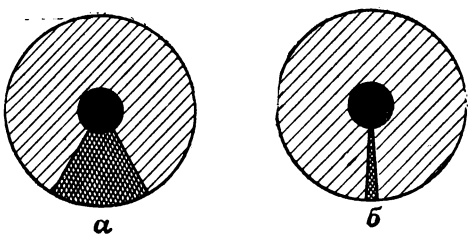


Рис. 207. Светящийся экран оптического индикатора настройки:

а — при отсутствии настройки; *б* — при настройке приемника на принимаемую станцию

Металлический экран *1* конусообразной формы с внутренней стороны, обращенной к катоду, покрыт специальным люминесцирующим веществом (виллемитом), которое обладает способностью светиться ярко-зеленым цветом под действием электронной бомбардировки. Через центр экрана проходит катод *2*, который является продолжением катода триода и служит для излучения электронов.

На экран подается положительное напряжение относительно катода. Под действием этого напряжения электроны, излучаемые катодом, развивают большие скорости и с силой ударяются об экран, вызывая его свечение. Сверху катод лампы закрыт щитком *6*. Когда смотришь на индикатор во время работы, то видишь светящийся экран с черным пятном в центре.

Если бы не было управляющего электрода, то электроны двигались бы по радиусам во всех направлениях, вызывая равномерное свечение всей поверхности экрана. Но на пути между катодом и экраном находится управляющий электрод, представляющий собой узкую пластинку. Он проходит сквозь экран и соединен с анодом триодной части лампы. В зависимости от напряжения на управляющем электроде электрическое поле между экраном и анодом несколько искажается и против управляющего электрода появляется широкий или узкий затемненный сектор.

Когда приемник расстроен относительно принимаемой станции, на экране виден довольно широкий темный сектор (рис. 207, *а*).

При настройке приемника темный сектор сужается и в момент точной настройки превращается в тонкую черную линию (рис. 207, *б*).

Схема включения оптического индикатора настройки приведена на рис. 208. На управляющую сетку триода индикатора подается напряжение с сопротивления нагрузки детектора обычно через резистор $R_ф$ сглаживающего фильтра $R_ф C_ф$. На анод триодной

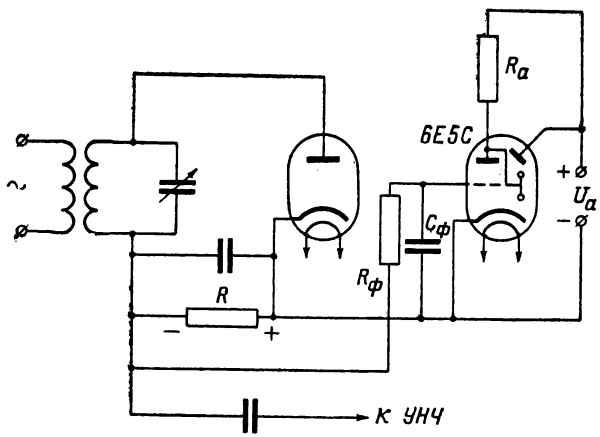


Рис. 208. Схема включения оптического индикатора настройки

части и на экран лампы подается положительное напряжение. На экран подается полное напряжение, а на анод — через резистор $R_а$ порядка 1—1,5 МОм.

При отсутствии сигналов напряжение на сопротивлении нагрузки детектора, а следовательно, и на сетке триода равно нулю. Анодный ток триода при этом относительно велик, поэтому на резисторе $R_а$ происходит большое падение напряжения. Следовательно, напряжение на аноде и на управляющем электроде получается значительно меньше, чем на экране, т. е. управляющий электрод имеет отрицательный потенциал относительно экрана. Электрическое поле, действующее между экраном и катодом, искажается на этом участке. Электроны, летящие от катода, вблизи управляющего электрода отталкиваются от него. В результате этого появляется широкий темный сектор на экране индикатора.

При наличии сигналов с резистора R на сетку триода поступает отрицательное напряжение, которое вызывает уменьшение анодного тока, а следовательно, и уменьшение падения напряжения на резисторе $R_а$.

Потенциал управляющего электрода становится более положительным, приближаясь к потенциалу экрана, и темный сектор сужается. При точной настройке темный сектор становится наиболее узким.

Следует иметь в виду, что при приеме мощных сигналов отрицательное напряжение на сетке может привести к полному запиранию триода. Напряжение на управляющем электроде становится равным напряжению на экране (падения напряжения на резисторе R_a не будет), и темный сектор на нем исчезнет. При очень сильных сигналах темный сектор исчезает несколько раньше момента точной настройки приемника. В этом случае невозможно точно настроить приемник по оптическому индикатору. Рекомендуется ослабить связь приемника с антенной (подключить антенну через небольшую емкость или перейти на комнатную антенну). В промышленных приемниках предусмотрены специальные меры (ослабление связи оптического индикатора с детектором), чтобы обеспечить нормальную работу оптического индикатора настройки.

Глава 12

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ

О существовании полупроводников известно давно. Уже много лет полупроводниковые приборы — меднозакисные и селеновые выпрямители — служат для выпрямления переменного тока.

В 20-х годах была открыта возможность применения полупроводников для генерирования и усиления высокочастотных колебаний. Однако такое использование полупроводников в то время не получило широкого распространения. Это объяснялось тем, что физика твердого тела была еще недостаточно изучена.

Позднее, с освоением диапазона сантиметровых волн, стали выявляться недостатки электронных ламп.

В 1948 году появились германиевые полупроводниковые триоды с точечным контактом (*транзисторы*), а в 1952 г. — плоскостные триоды.

На основе современных достижений физики возникла новая отрасль науки и техники — полупроводниковая электроника.

Одно из отличий полупроводниковых приборов от электронных ламп заключается в том, что в лампах электроны покидают катод и движутся в вакууме под действием сил постоянных и переменных электрических полей, в полупроводниковых же приборах электрические заряды движутся в твердом теле, не выходя за его пределы.

Электроны в атоме

Как известно, атомы всех химических элементов состоят из ядра, имеющего сложное строение и окруженного слоями электронов, которые вращаются по определенным эллиптическим орбитам.

Электроны одного слоя обладают почти одинаковым запасом энергии, т. е. находятся на одном энергетическом уровне. Ближайший к ядру слой имеет наиболее низкий энергетический уровень. Электроны последующего слоя находятся на более высоком энергетическом уровне. Число электронов на данном энергетическом уровне равно удвоенному квадрату номера слоя:

$$N = 2n^2,$$

где N — число электронов в данном слое;

n — номер слоя.

Таким образом, в первом к ядру слое имеется два электрона, во втором слое — восемь, в третьем — восемнадцать и т. д. Число электронов в последнем (внешнем) слое может быть различным, но не больше восьми. Электроны внешнего слоя называются *валентными*. Они определяют химические свойства атомов, так как вследствие своей относительно слабой связи с ядром легко вступают во взаимодействие с атомами других веществ, входя в состав наружного слоя последних.

Энергия электрона в атоме может изменяться только порциями — квантами. Минимальную величину изменения энергии электрона составляет один квант.

СВОЙСТВА ПОЛУПРОВОДНИКОВ

По способности проводить электрический ток полупроводники занимают промежуточное положение между проводниками и изоляторами. Удельное сопротивление полупроводников в очень широких пределах изменяется в зависимости от температуры, действия света, электрических и магнитных полей, радиоактивного излучения, наличия посторонних примесей.

Химические элементы, обладающие полупроводниковыми свойствами,— уголь (C), селен (Se), кремний (Si) и германий (Ge) — имеют большое сопротивление по сравнению с металлическими проводниками, но их можно считать проводниками по сравнению с изоляторами, такими, как стекло или кварц.

Полупроводники имеют отрицательный температурный коэффициент сопротивления, их сопротивление уменьшается при повышении температуры. При очень низких температурах германий практически изолятор; при высоких температурах он становится хорошим проводником.

Из четырех упомянутых полупроводников германий имеет наименьшее удельное сопротивление от 0,5 до 80 Ом на сантиметр при температуре 25° С в зависимости от чистоты вещества.

Применяемые полупроводники имеют кристаллическое строение. Каждый из них состоит из симметрично, упорядоченно расположенных атомов, образующих так называемую кристаллическую решетку.

Междуатомная связь создается слабо связанными электронами внешней оболочки атомов, образующих кристаллическую решетку. Эти так называемые валентные связи и удерживают атомы в определенных местах решетки.

Германий и кремний имеют атомную структуру, которая позволяет контролировать ток, протекающий через них. Возможность управлять током в полупроводнике позволяет использовать его в качестве усилителя. Германий и кремний — наиболее подходящие материалы для изготовления полупроводниковых триодов.

На примере германия удобно проследить прохождение электрического тока в полупроводниках, получение выпрямительных и усилительных свойств.

АТОМНАЯ СТРУКТУРА ГЕРМАНИЯ

Каждый химический элемент имеет свою атомную структуру, которая определяет его электрические, физические и химические свойства. Атом представляет положительно заряженное ядро с отрицательными электронами на орбитах вокруг ядра. Атомная структура германия приведена на рис. 209. Общий положительный заряд в ядре равен атомному числу элемента, которое определяет его положение в периодической таблице Менделеева. Атомные числа полупроводниковых элементов: 32 для германия, 14 для кремния, 6 для углерода и 34 для селена.

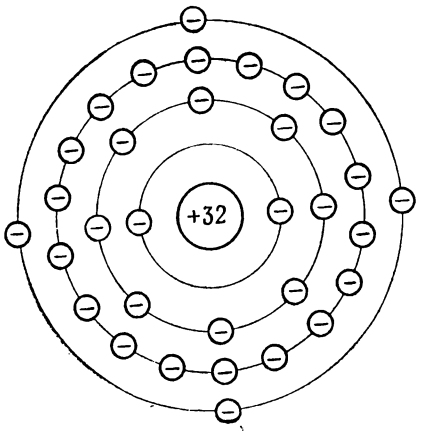


Рис. 209. Атомная структура германия с четырьмя валентными электронами

Германий имеет 32 протона в ядре. Вне ядра имеется 32 электрона, расположенные на четырех орбитах. На первой орбите имеется 2 электрона, на второй — 8, на третьей — 18 и на четвертой — 4. Атом стабильный, если внешняя орбита имеет 8 электронов. В германии недостает 4 электронов.

Электроны на последней орбите называются валентными электронами. Валентность элемента определяет способность атома вступать во взаимодействие с атомами других элементов. Германий имеет валентность 4, ту же самую валентность имеет и кремний.

ВАЛЕНТНЫЕ СВЯЗИ

В обычных условиях частицы газа водорода представляют собой не отдельные атомы, а молекулы, состоящие из двух атомов водорода. Уясним на примере образования молекулы водорода возникновение связывающих сил (электронных связей) между двумя атомами. На рис. 210, *а* показаны отдельные атомы водорода, состоящие из одного положительного и одного отрицательного зарядов. При сближении этих атомов орбита обоих электронов стала общей, образовалась молекула водорода (рис. 210, *б*).

Стрелками показаны действующие на атомные ядра силы притяжения со стороны электронов и силы отталкивания между ядрами.

При таком расположении взаимное отталкивание положительных ядер уравновешивается притяжением со стороны электронов, вращающихся по общей орбите. Это состояние устойчивое, поэтому для разделения молекулы водорода снова на два отдельных атома необходимо затратить определенную энергию.

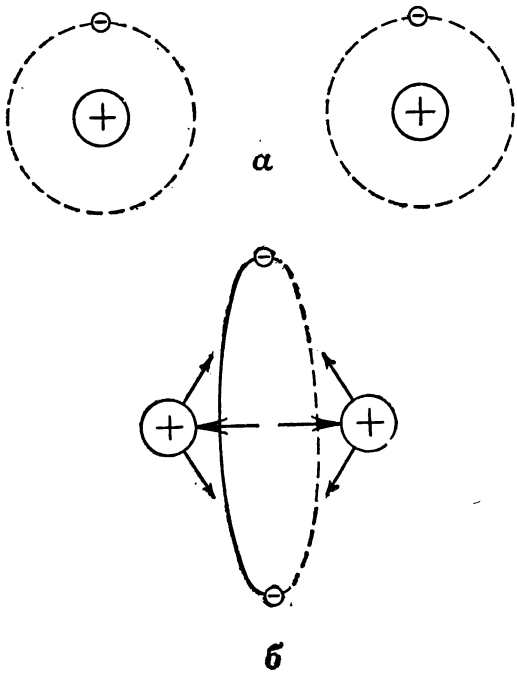


Рис. 210. Ковалентная связь в молекуле водорода:
а — отдельные атомы водорода; *б* — атомы водорода, соединенные в молекулу

Итак, в молекуле атомы связаны между собой с помощью собственных электронов. Такая связь одноименных атомов обычно называется *электронной* или *валентной* связью, поскольку в ее образовании участвуют валентные электроны.

Электронная связь наиболее устойчива, если она создается двумя электронами. При удалении одного электрона связь уменьшается, при добавлении лишних электронов она практически остается прежней.

В молекуле водорода имеется простая электронная связь. Более сложные связи получаются при объединении в кристаллическую решетку атомов германия.

На рис. 211 показано строение кристаллической решетки германия. Шариками показаны положительные ионы, а силы сцепления изображены в виде двух линий, соответствующих двум электронам.

В кристалле германия (или кремния) атомы сближаются между собой настолько, что электроны внешней оболочки попадают в сферу притяжения соседнего атома и образуют общие орбиты с электронами внешней оболочки этих соседних атомов. Такие общие орбиты, образованные двумя электронами, принадлежащими соседним атомам, связывают между собой атомы в кристаллической решетке германия.

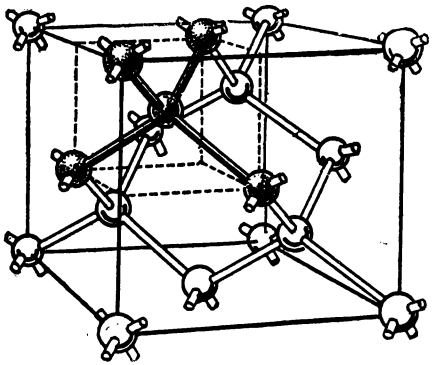


Рис. 211. Строение кристаллической решетки германия

Эти связи называются парноэлектронными или ковалентными связями.

Таким образом, каждый атом связан с четырьмя соседними атомами посредством четырех парноэлектронных связей, т. е. каждый атом окружен четырьмя соседними атомами, с которыми он в итоге связан восемью электронами: четырьмя собственными и по одному от каждого соседа.

Кристаллическую решетку германия удобно изображать на плоскости. Несколько вариантов изображения ковалентных связей германия показано на рис. 212.

В твердых телах ковалентные связи могут формироваться между атомами одних и тех же элементов или с двумя различными элементами, имеющими близкие характеристики. Атомные числа должны быть близки, для того чтобы атомы имели одно и то же число электронных орбит.

В полупроводниках сравнительно легко происходит разрыв ковалентных связей в кристалле. Под действием внешних сил, например при нагревании или освещении, кинетическая энергия валентных электронов увеличивается, и многие из них, преодолевая силы притяжения с соседними атомами, разрывают свои связи с ними. Освободившиеся электроны не могут войти ни в одну из заполненных связей кристалла. Под влиянием теплового движения они будут беспорядочно перемещаться по нему, подобно молекуле в газе. Если к полупроводнику приложить электродвижущую силу, эти электроны начнут отталкиваться от отрицательного полюса источника и притягиваться к положительному. В полупроводнике появится электрический ток. Проводимость полупроводника, обусловленная движением свободных электронов, называется *электронной проводимостью.*

Электронная связь, из которой вырван электрон, называется *дыркой.* Другими словами, это место в атоме, где отсутствует валентный электрон. Дырка обладает свойством положительного электрического заряда, равного по величине заряду электрона (в незаполненной связи не достает у атома одного электрона). Это

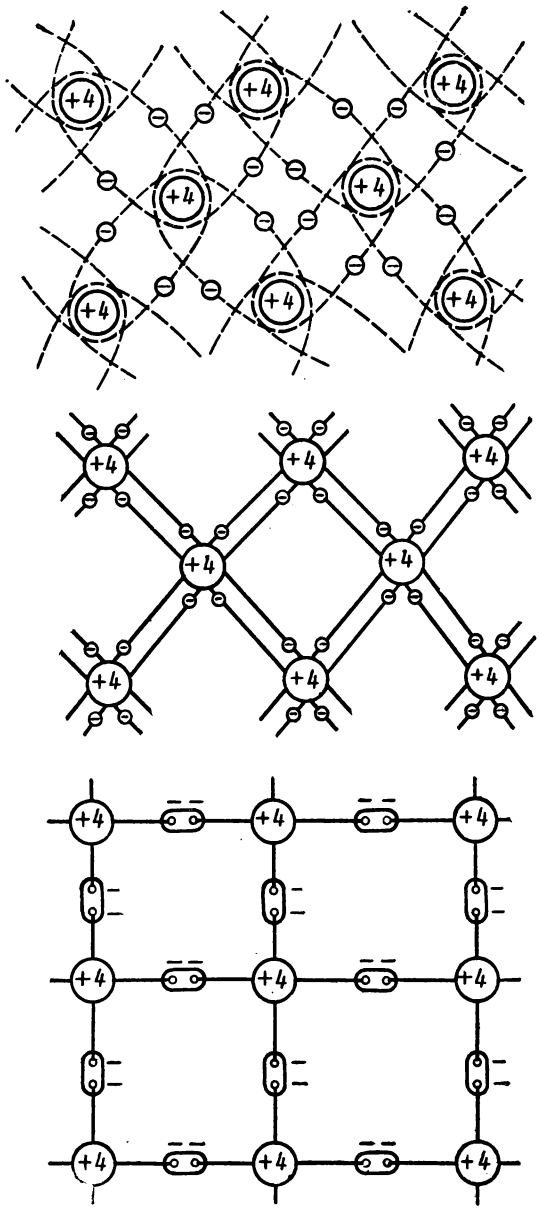


Рис. 212. Варианты изображения электронных связей в кристаллической решетке германия

равносильно появлению нового источника положительного электрического заряда, который может создаваться в полупроводниках вследствие незаполненной структуры ковалентной связи.

Образовавшуюся дырку может заполнить электрон с соседнего атома. При этом в соседней связи образуется новая дырка, которая в свою очередь может быть заполнена электроном другого атома. Происходит беспорядочное движение дырки по полупроводнику.

Когда к полупроводнику приложена э.д.с., дырки упорядоченно движутся в сторону, противоположную направлению движения электронов. Проводимость, обусловленная движением дырок, называется *дырочной проводимостью*, а ток — *дырочным током*.

В чистом полупроводнике число дырок равно числу свободных электронов. Проводимость создается движением одинакового количества зарядов обоих знаков. При наличии электродвижущей силы (электрического поля) электроны движутся через кристаллическую решетку к положительному электроду, а дырки — к отрицательному, и в цепи течет ток в одном направлении. Чем выше температура, тем больше плотность свободных электронов и дырок. При этом наряду с образованием свободных электронов и дырок происходит и их рекомбинация.

Проводимость полупроводника можно значительно улучшить, если ввести в него небольшое количество специально подобранных примесей. В этом случае равновесие между числом электронов и числом дырок нарушается и электрический ток создается преимущественно зарядами одного знака, зависящего от того, что преобладает количество электронов или количество дырок.

В зависимости от сорта добавляемой примеси германий можно сделать полупроводником с отрицательной (электронной) или положительной (дырочной) проводимостью. Например, примесь мышьяка создает в германии избыток электронов, в этом случае в нем преобладают носители отрицательных зарядов. Примесь индия приводит к недостатку электронов. Тогда германий может быть использован как проводник положительных зарядов.

Вещество кристаллической структуры не имеет молекул. Оно состоит только из атомов, которые удерживаются между собой ковалентными связями.

Вводимые примеси приводят к изменению электрического заряда в кристаллическом полупроводнике без изменения его физической структуры.

Примеси, вызывающие преобладание электронов в полупроводнике, т. е. создающие преобладание электронной проводимости, называются донаторными (или донорными), поскольку они «отдают» электроны («donare» по-латински значит «дарить», «жертвовать»).

Примеси, вызывающие преобладание числа дырок в полупроводнике, т. е. создающие преобладание дырочной проводимости, называются *акцепторными*, поскольку они «принимают» электроны («acceptus» по-латински означает «принятый»).

Если полупроводник относится к четвертой группе периодической системы Менделеева, донаторные примеси берутся из числа элементов пятой группы (элемент имеет пять валентных электронов), акцепторные — из числа элементов третьей группы (элемент имеет три валентных электрона).

На рис. 213 условно изображена часть кристаллической решетки полупроводника с атомом донаторной примеси, который имеет пять валентных электронов. Четыре электрона атома примеси с четырьмя электронами четырех соседних атомов полупроводника образуют заполненные электронные связи, а пятый электрон оказывается «лишним», некомплектным и легко может быть оторван от атома, например в результате теплового движения (даже при комнатной температуре), и перемещаться по кристаллической решетке. Добавление донаторной примеси к кристаллу вызывает избыток электронов по сравнению с дырками. В этом случае проводимость будет в основном электронной. Для германия донаторными примесями служат сурьма, мышьяк, фосфор.

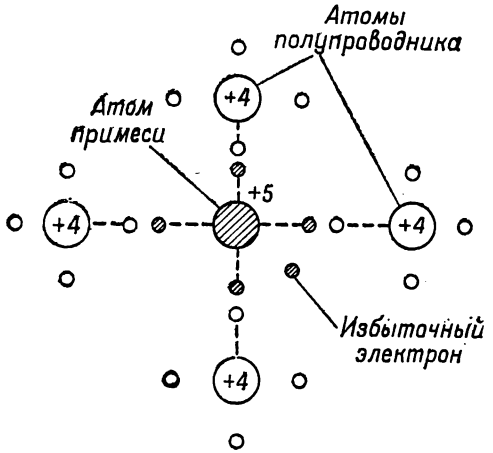


Рис. 213. Атом донаторной примеси в полупроводнике

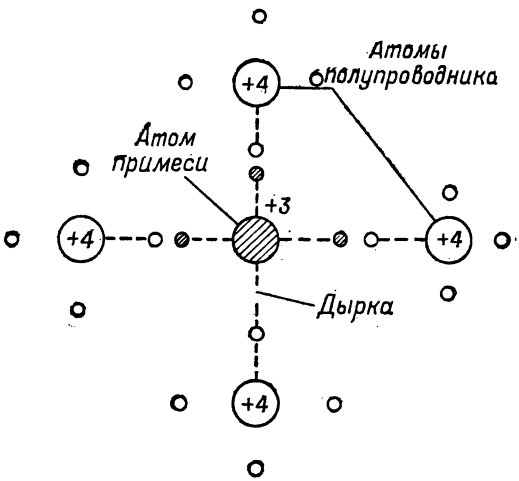


Рис. 214. Атом акцепторной примеси в полупроводнике

На рис. 214 условно изображена часть кристаллической решетки полупроводника с атомом акцепторной примеси, который имеет три валентных электрона. В этом случае получаются только три заполненные связи между атомом примеси и соседними атомами полупроводника. Четвертая электронная связь остается незаполненной, т. е. образуется дырка. Эта дырка легко может быть занята электроном при разрыве какой-либо соседней связи, т. е. за счет образования дырки в со-

седнем атоме. Таким образом, введение акцепторной примеси приводит к тому, что в кристалле число дырок превышает число свободных электронов. При этом проводимость будет в основном дырочной. Для германия акцепторными примесями служат бор, алюминий, галлий и индий.

Может показаться неправдоподобным, что дырки перемещаются по кристаллической решетке, являясь носителями положительных зарядов, но это доказано математически и установлено экспериментально.

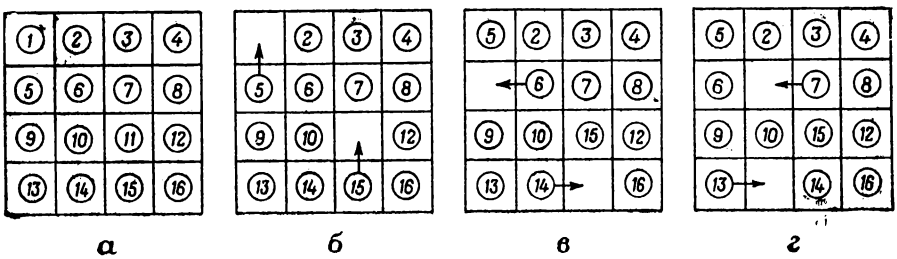


Рис. 215. Перемещение шашек по доске, имеющей свободные клетки

Чтобы лучше уяснить образование и перемещение дырок в полупроводнике, рассмотрим простой пример. На рис. 215, *а* изображена доска, все клетки которой заполнены шашками. Следовательно, перемещение шашек по доске невозможно. Это грубо можно сравнить с состоянием полупроводника, когда в нем нет дырок. Удалим шашки *1* и *11* (рис. 215, *б*), что будет соответствовать образованию двух дырок в полупроводнике. У нас появится возможность перемещать шашки. Пустую клетку шашки *1* может занять шашка *5* (или *2*), пустую клетку шашки *11* — шашка *15* (или *7*, *10*, *12*) и т. д. На рис. 215, *в* и *г* показан один из вариантов двух последовательных перемещений пустых клеток. Аналогичным образом перемещаются и дырки в полупроводнике.

При отсутствии источника электродвижущей силы дырки (как и свободные электроны) беспорядочно перемещаются в полупроводнике, что соответствует беспорядочному движению положительных зарядов.

При наличии источника электродвижущей силы дырки приобретают упорядоченное движение, образуя электрический ток. Перемещаются дырки в направлении отрицательного электрода (рис. 216).

На первый взгляд может показаться, что нет различия между двумя способами переноса электричества (при перемещении дырок или перемещении электронов), так как результат в обоих случаях получается один и тот же — перенос электронов полем от кристалла к кристаллу. Однако переход электронов на незаполненные места в ковалентных связях вызывает движение дырок, которые являются носителями положительного электричества. Работа полу-

проводниковых триодов основана именно на этом различии в переносе разноименных электрических зарядов. Таким образом, дырки являются так же носителями электрического тока, как и электроны.

Необходимо уяснить разницу между электронной и дырочной проводимостью. Электронная проводимость обусловлена направленным движением свободных электронов, а дырочная проводимость

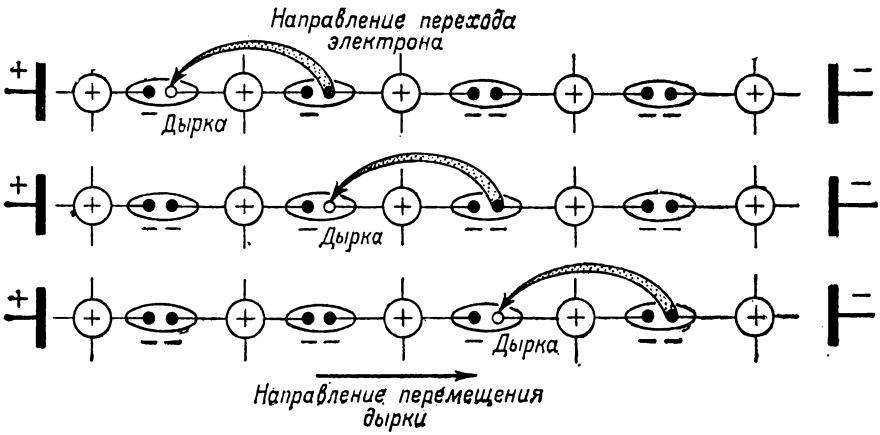


Рис. 216. Дырочная электропроводимость

вызвана перемещением дырок при переходе валентных электронов от атома к атому на свободные места в ковалентных связях. Сумма электронной и дырочной проводимостей называется собственной проводимостью полупроводника.

Полупроводники, в которых основными носителями тока являются электроны, называются *полупроводниками с электронной проводимостью* или сокращенно *полупроводниками типа n* (*n*-типа) [1].

Полупроводники, в которых основными носителями тока являются дырки, называются *полупроводниками с дырочной проводимостью* или сокращенно полупроводниками типа *p* (*p*-типа) [2].

Любой полупроводник в зависимости от примесей можно сделать по желанию полупроводником типа *n* или *p*.

С повышением температуры увеличивается скорость движения электронов и дырок в кристаллической решетке полупроводника, т. е. увеличивается его проводимость. В металлических проводниках, наоборот, с повышением температуры проводимость уменьшается.

Скорость движения носителей тока в полупроводнике меньше, чем в проводнике.

---

[1] *n* — первая буква слова «*negative*» (негатив), что означает «отрицательный».

[2] *p* — первая буква слова «*positive*» (позитив), означающего «положительный».

ЭЛЕКТРОННО-ДЫРОЧНЫЙ ПЕРЕХОД

Работа полупроводниковых диодов и триодов основана на использовании физических свойств *n-p*-переходов.

Полупроводниковым n-p-переходом называется область вещества, образующаяся на границе полупроводников с электронной (*n*-типа) и дырочной (*p*-типа) проводимостями. Электронно-дырочный переход обладает определенными свойствами, отличными от свойств своих полупроводников. Свойствами *n-p*-перехода обладает также контакт полупроводника с металлом.

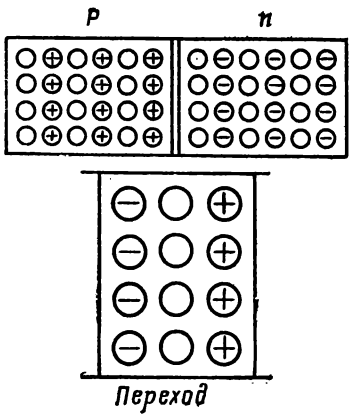


Рис. 217. *p-n*-переход в увеличенном виде

Два противоположных типа германия при соприкосновении образуют на границе раздела электронно-дырочный переход (*p-n* или *n-p*-переход). Некоторое количество электронов из германия *n*-типа перемещается через переход (границу раздела) в германий *p*-типа, в то же время некоторое количество дырочных зарядов переходит в противоположном направлении. Перемещение этих зарядов обусловливается силами притяжения электронов к германию *p*-типа и дырок к германию *n*-типа. В результате этого на границах перехода образуется некоторая разность потенциалов, полярность которой показана на рис. 217. Эту разность потенциалов принято *называть потенциальным барьером или барьерным напряжением.*

На рис. 217 *p-n*-переход изображен в увеличенном виде, чтобы показать заряды на двух поверхностях, соприкасаемых одна к другой. В промежутке между зарядами образуется нейтральная полоска.

Теперь очень важно заметить, что электронные заряды в германии *n*-типа перемещаются более легко, чем дырочные заряды в германии *p*-типа. Это объясняется тем, что свободные электроны не принимают участия в ковалентных связях заполненной восьмиэлектронной орбите, в то время как перемещение дырки ведет за собой перераспределение зарядов в семиэлектронной орбите. Поэтому, несмотря на то, что заряды электрона и дырки равны, больше электронов пройдет через переход в германий *p*-типа, чем пройдет дырок через переход в германии *n*-типа. Сторона перехода германия *p*-типа имеет отрицательный заряд по сравнению со стороной перехода германия *n*-типа, которая имеет положительный заряд.

Толщина заряженного барьера составляет несколько атомов. Барьерное напряжение препятствует дальнейшему прохождению

тока через проход, как только оно образовалось. Электроны из германия n-типа теперь не могут пересечь барьер к германию p-типа, так как отрицательно заряженная его поверхность отталкивает электроны. Подобно этому и заряды дырок из германия p-типа не могут пересечь барьер к германию n-типа, так как положительно заряженная поверхность отталкивает дырки.

Чем больше первоначально переходит электронов в область p, а дырок в область n, тем сильнее становится электрическое поле, и при некоторой величине его переход зарядов прекращается — устанавливается динамическое равновесие.

При динамическом равновесии движение электронов полностью не прекращается. Часть электронов, энергия которых достаточна для преодоления встречного электрического поля, продолжает переходить из n-области в p-область. Но одновременно с этим столько же свободных электронов, имеющихся в небольшом количестве в дырочной области, беспрепятственно переходит в n-область. Таким образом, ток диффузии компенсируется током проводимости. То же самое происходит с дырками.

Вблизи от контактов двух областей образуется двойной электрический слой: в области n возникает зона с недостатком электронов, в области p — с недостатком дырок. Поэтому двойной электрический слой, т. е. пограничная область с пониженной концентрацией носителей зарядов, обладает повышенным сопротивлением. Эту область повышенного сопротивления принято называть *запирающим слоем*, а электрическое поле, возникающее при этом,— *потенциальным барьером.* Часто разность потенциалов между электрическими слоями называют *контактной разностью потенциалов* двух областей.

Барьерное напряжение может быть от 0,1 до 0,3 В в зависимости от количества примеси. При соприкосновении двух пластин чистого германия барьерное напряжение при переходе не возникает.

Чтобы получить ток, необходимо преодолеть барьерное напряжение. Это явление аналогично образованию отрицательных зарядов на сетке электронной лампы или аноде кенотрона в том случае, когда они отключены от внешней цепи. Из накаленного катода электроны вылетают и при отсутствии напряжения между катодом и анодом. Часть из них долетает до анода, вследствие чего анод заряжается отрицательно, а катод положительно. Между катодом и анодом образуется электрическое поле, которое препятствует переходу электронов с катода на анод. В конечном итоге поле возрастет настолько, что все электроны задерживаются и дальнейший переход их с катода на анод прекращается.

Рассмотрим более подробно n-p-переход (рис. 218). С левой стороны имеется полупроводник с электронной проводимостью (n-типа). Кружки с плюсом изображают ионизированные атомы примеси (доноры), которые имеют положительный заряд. Между ними хаотически движутся электроны — основные носители элек-

трического тока с большой концентрацией и дырки — неосновные носители, концентрация которых значительно меньше.

С правой стороны имеется полупроводник с дырочной проводимостью (*p*-типа). Кружки с минусом здесь изображают ионизированные атомы примеси (акцепторы), которые имеют отрицательный заряд. Между ними хаотически движутся дырки — основные носители электрического тока с большой концентрацией и электроны — неосновные носители с небольшой концентрацией.

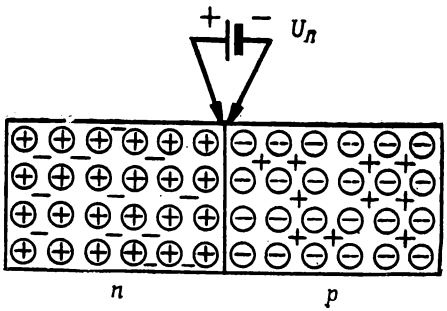


Рис. 218. Условная схема *n-p*-перехода ($U_п$ — батарея, эквивалентная потенциальному барьеру)

Процесс перехода (диффузии) избытка электронов из *n*-области в *p*-область и обратно избытка дырок затруднен наличием потенциального барьера, который на рисунке заменен батареей. Полярность батареи соответствует заряду ионизированных атомов примеси (доноров и акцепторов). Потенциальный барьер способствует переходу неосновных носителей тока электронов из *p*-области в *n*-область и дырок из *n*-области в *p*-область. В установившемся режиме диффузионный ток заряженных частиц, преодолевших потенциальный барьер, компенсируется встречным током, образованным неосновными носителями зарядов, переходящими из одной области в другую.

Величина потенциального барьера определяется концентрациями и энергиями заряженных частиц в области *n* и *p*.

Выпрямительные свойства всякого выпрямительного контакта связаны с наличием внутреннего электрического поля вблизи границы раздела, т. е. существованием контактной разности потенциалов. Часто у контактов вблизи границы раздела не возникает контактной разности потенциалов. Такие контакты являются невыпрямляющими и называются *линейными*.

Подводимое напряжение к зажимам перехода

Прохождение электрического тока через переход зависит от разности потенциалов на его зажимах. Когда внешнее напряжение компенсирует барьерное напряжение, в этом случае через переход будет протекать ток. Это напряжение называется положительным смещением или смещением в прямом направлении, поскольку оно вызывает прохождение тока.

Напряжение, приложенное к тому же переходу с противоположной полярностью, называется отрицательным смещением или смещением в обратном направлении, так как оно препятствует прохождению тока.

Положительное смещение. Соединим полупроводник типа p с положительным, а типа n — с отрицательным полюсами источника питания. Электрическое поле источника питания направлено навстречу электрическому полю потенциального барьера. Поэтому потенциальный барьер снизится на величину напряжения источника тока. Количество электронов, способных преодолеть

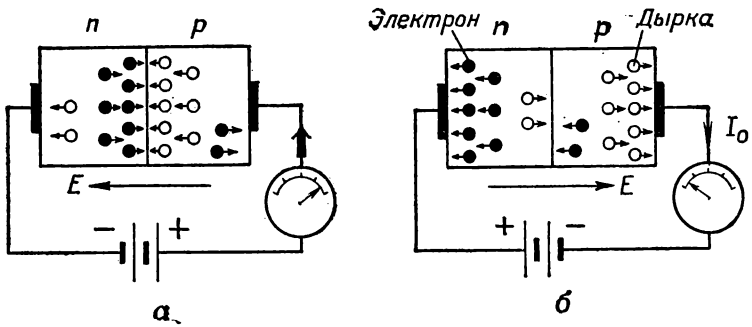


Рис. 219. Влияние источника питания, подключенного к n-p-переходу:

а — отрицательный полюс источника подключен к области n, а положительный — к области p; *б* — отрицательный полюс источника подключен к области p, а положительный — к области n

барьер и перейти из левой области в правую, и количество дырок, способных перейти из правой области в левую, резко увеличится, что равносильно уменьшению сопротивления перехода.

Если напряжение источника питания больше напряжения потенциального барьера, то оно полностью компенсирует влияние последнего.

Под действием поля внешнего источника электроны притягиваются к положительному полюсу, дырки — к отрицательному, т. е. и те и другие движутся к n-p-переходу (рис. 219, *а*). Пока приложено напряжение, через переход течет большой электрический ток, т. е. сопротивление n-p-перехода мало.

Так как результирующие потоки электронов и дырок направлены в противоположные стороны, переносимые ими заряды направлены в одну сторону, т. е. общий ток равен сумме электронного и дырочного токов.

Таким образом, результирующий ток в направлении внешнего электрического поля (из области p в область n) будет возрастать с увеличением приложенного напряжения.

На рис. 220 показано, как нужно подключать внешнее напряжение к полупроводникам p-n и n-p-типов, чтобы создать ток через переход. Разность потенциалов на зажимах германиевой комбинации равно напряжению внешней батареи. В цепи будет протекать ток, так как внешнее напряжение имеет требуемую полярность и достаточно большое, чтобы превысить величину барьерного напряжения.

Положительный потенциал прикладывается к германию p-типа, чтобы отталкивать его положительные заряды дырок в направле-

нии перехода; германий n-типа имеет отрицательный потенциал чтобы отталкивать его электроны в направлении перехода. Это напряжение, заставляющее свободные заряды в германии перемещаться в направлении перехода, называется положительным смещением.

На рис. 220, *а* показано, как подключить батарею, чтобы полочить положительное смещение на p-n-переходе, на рис. 220, *б* полярность подключения батареи изменена, чтобы создать положительное смещение на n-p-переходе[1].

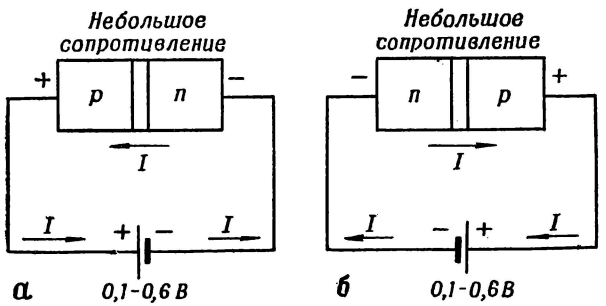


Рис. 220. Подключение внешнего напряжения к полупроводникам p-n- и n-p-типов:

а — полярность смещения для p-n-перехода; *б* — полярность смещения для n-p-перехода

В обоих случаях свободные заряды в кристаллах германия с примесями получают направленное движение в сторону перехода. Барьерное напряжение в этих случаях нейтрализуется, и в цепи будет протекать электрический ток.

Положительное смещение снижает сопротивление перехода до небольшой величины, вызывая большой ток через p-n и n-p-переходы. Для переходов небольшой мощности, которые могут проводить ток от 10 до 150 мА, величина положительного смещения порядка 0,1—0,6 В.

Отрицательное смещение. Соединим полупроводник типа n с положительным, а типа p — с отрицательным полюсом источника питания. Электрическое поле, созданное источником питания, совпадет по направлению с электрическим полем потенциального барьера, т. е. поле в переходе увеличится. Теперь количество электронов, способных преодолеть барьер и перейти из левой области в правую, и количество дырок, способных перейти из правой области в левую, уменьшится. При небольшом напряжении

[1] Когда не было известно строение атома, предполагали, что электрический ток создается движением положительных зарядов от плюса источника тока по внешней цепи к его минусу. На самом же деле движение электронов происходит от минуса источника через внешнюю цепь к его плюсу. В настоящее время в нашей стране при рассмотрении цепи электрического тока считают по-старому, что ток протекает от плюса источника через внешнюю цепь к его минусу. Такой условный выбор направления тока не влияет на физические процессы в цепи.

поток электронов из области *n* в область *p*, а дырок из области *p* в область *n* практически прекратится, что равносильно увеличению сопротивления перехода.

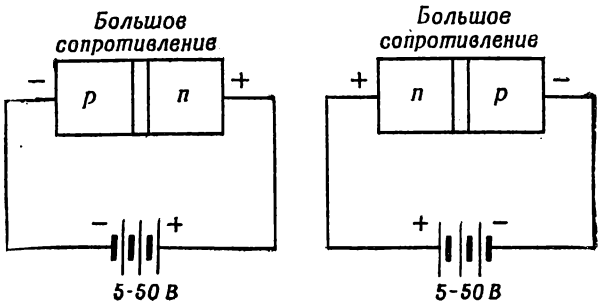


Рис. 221. Подключение отрицательного смещения к *p-n*- и *n-p*-переходам полупроводников:
а — полярность смещения для *p-n*-перехода; *б* — полярность смещения для *n-p*-перехода

Иначе говоря, под действием электрического поля, созданного источником питания, электроны притягиваются к положительному полюсу, а дырки — к отрицательному (рис. 219, *б*). Электроны и дырки удаляются от *n-p*-перехода. Толщина запирающего слоя как бы увеличивается, т. е. увеличивается сопротивление *n-p*-перехода. В результате ток уменьшается.

На рис. 221 показано, как подключается отрицательное смещение, чтобы препятствовать прохождению тока через *p-n* и *n-p*-переходы. Отрицательное смещение заставляет свободные заряды удалиться от перехода. Оно увеличивает сопротивление перехода.

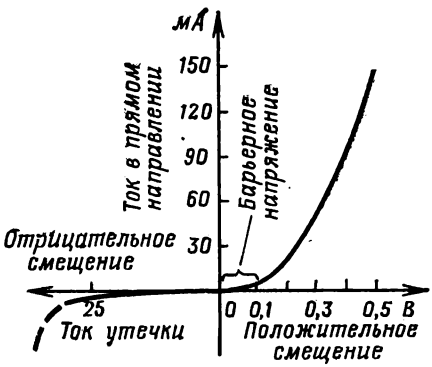


Рис. 222. Статическая характеристика прямого и обратного токов в *p-n*- или *n-p*-переходе

Обратите внимание, что для отрицательного смещения используется более высокая разность потенциалов — от 5 до 50 В.

Ток в прямом направлении. Положительное смещение вызывает движение электрических зарядов через переход. Свободные электроны в области *n* и свободные дырочные заряды в области *p* перемещаются в германии с одного конца перехода к другому его концу. Это перемещение зарядов в одном направлении называется *прямым током* в германии.

Кривая на рис. 222 представляет характеристику для перехода при положительном смещении. Практически ток не протекает,

пока барьерное напряжение не преодолено. Затем ток увеличивается при увеличении положительного смещения.

Полярность положительного смещения на рисунке не показана, так как она различная для *p-n* и *n-p*-переходов.

Обратный ток утечки. Как показано на рис. 222, при отрицательном смещении через переход протекает небольшой ток. Этот ток можно рассматривать как *обратный ток утечки.*

Неосновные носители зарядов в полупроводнике (дырки в области *n* и электроны в области *p*) свободно проходят через потенциальный барьер. Приложенное напряжение содействует этому, и уже при небольшой его величине практически все заряды, которые всегда имеются в полупроводнике в небольшом количестве, участвуют в создании тока. Поэтому ток получается небольшим, и величина его практически не зависит от приложенного напряжения. Таким образом, общий ток насыщения состоит из потока электронов и потока дырок, т. е. определяется концентрациями неосновных носителей в обеих областях. Обратный ток направлен противоположно прямому току.

Ток утечки очень маленький по сравнению с прямым током. Он равен примерно 1 мА при 20 В отрицательного смещения. Обратный ток возрастает медленно при увеличении приложенного напряжения. Однако это происходит до определенного момента. Когда прикладывается слишком большое напряжение или температура германия достаточно высокая, происходит разрушение ковалентной связи. В этом случае относительно большой ток течет в обратном направлении, ограничиваемый только сопротивлением германия. Для этой цели введено понятие насыщения обратного тока. Пробивное напряжение на рис. 222 примерно равно 25 В.

Величиной обратного тока утечки можно управлять. На этом основано действие полупроводниковых триодов.

Основные и неосновные носители зарядов. В зависимости от примеси германий имеет положительные или отрицательные заряды. Основными зарядами в *n*-типе являются электроны, а в *p*-типе дырки. Однако кроме основных зарядов имеются противоположные неосновные заряды. Даже при комнатной температуре валентные связи атомов чистого германия не являются статическими, поэтому заряды в германии непрерывно перемещаются.

Образование случайных зарядов в ковалентных связях объясняется тепловой энергией. Поэтому германий *n*-типа наряду с избытком электронов, равным числу атомов примеси, имеет также некоторое количество дырочных зарядов, находящихся в хаотическом движении в результате перераспределения валентных связей между атомами германия. Таким образом, германий *n*-типа имеет некоторое количество неосновных дырочных зарядов.

В германии *p*-типа дырки являются основными носителями зарядов. Кроме них имеется некоторое количество электронов носителей неосновных зарядов.

Неосновные носители зарядов создают ток утечки при отрицательном напряжении смещения. Так как полярность неосновных зарядов противоположна полярности основных носителей зарядов, направление тока утечки противоположно току прямого направления.

Направление тока, соответствующее малому сопротивлению перехода, называется *прямым направлением.* Ток в прямом (пропускном) направлении создается движением основных носителей зарядов обеих областей через *n-p*-переход. Направление тока, соответствующее большому сопротивлению перехода, называется *обратным направлением.* Ток в обратном (запирающем) направлении создается движением неосновных носителей зарядов.

Благодаря своей способности пропускать ток в одном направлении и не пропускать в другом *n-p*-переход обладает выпрямляющим действием.

Для выпрямителей с *n-p*-переходом прямое направление соответствует плюсу на области *p* и минусу — на области *n*.

То, что в запирающем слое электронно-дырочного перехода имеются заряды, дает возможность сравнить запирающий слой с конденсатором. Подобно конденсатору запирающий слой заряжается или разряжается при изменении приложенного напряжения. Увеличение напряжения в прямом направлении вызывает сближение зарядов, при этом запирающий слой сужается и емкость возрастает. Увеличение напряжения в обратном направлении приводит к расширению области зарядов, в результате чего толщина запирающего слоя увеличивается и емкость уменьшается.

Рассмотренные процессы, происходящие в электронно-дырочном переходе, лежат в основе действия полупроводниковых диодов и транзисторов (полупроводниковых триодов).

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДИОДЫ

Полупроводниковый диод представляет собой двухэлектродный прибор, обладающий односторонней проводимостью.

Полупроводниковые диоды по характеру образования *n-p*-перехода разделяются на точечные и плоскостные. Применяются диоды для детектирования и выпрямления переменного тока.

В точечных полупроводниковых диодах контактной парой служат полупроводник германий или кремний и металлическая игла. Точка контакта подбирается в процессе изготовления диода и закрепляется вязкими диэлектриками или сваривается.

В германиевых диодах обычно используют германий типа *n*; вблизи контакта кристалла с острием образуется область с проводимостью типа *p*. Прямым направлением тока будет направление от контактной иглы (пружинки) к основному кристаллу.

В кремниевых диодах обычно используют кремний типа *p*; вблизи контакта кристалла с острием образуется область с проводимостью типа *n*. В этом случае прямым направлением тока будет направление от основного кристалла к контактной пружинке.

В плоскостных диодах контактная пара часто образуется вплавлением капли индия в германий. Прямым направлением тока будет направление от индиевого электрода к основному кристаллу.

Типичным полупроводником с односторонней проводимостью является германий. Способность германия в контакте с металлом выдерживать в одном направлении большие токи, а в другом — большие напряжения дает возможность использовать его для изготовления высоковольтных диодов.

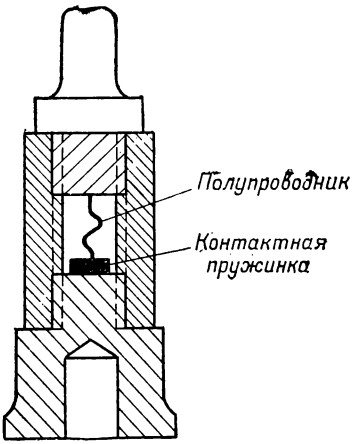


Рис. 223. Общий вид точечного диода, предназначенного для работы в сантиметровом диапазоне волн

На рис. 223 изображен один из точечных полупроводниковых диодов в виде патрона, предназначенный для работы в сантиметровом диапазоне волн в качестве смесителя.

Характеристикой полупроводникового диода является зависимость тока, протекающего через диод, от напряжения на его электродах.

Выпрямительные свойства полупроводниковых диодов характеризуются коэффициентом выпрямления, который равен отношению прямого тока к обратному при напряжении, равном соответственно +1 В и —1 В. Чем выше коэффициент выпрямления, тем лучше выпрямительные свойства диода.

Одним из электрических параметров полупроводникового диода является максимальное обратное рабочее напряжение — наибольшее напряжение, которое может быть приложено к диоду в обратном направлении в течение длительного времени без нарушения его нормальной работы.

Пробивным напряжением называется такое обратное напряжение, при превышении которого диод утрачивает свойство односторонней проводимости — происходит пробой, связанный с самопроизвольным возрастанием тока.

Во время пайки диодов в схемах необходим теплоотвод между местом пайки и диодом, так как перегрев диода может вызвать его порчу.

Германиевые диоды имеют хорошую стабильность параметров во времени, высокую механическую прочность и большой срок службы.

Если в цепи требуется большой ток, то диоды можно соединять параллельно, в том случае, когда они при одном и том же напряжении дают одинаковый выпрямленный ток. При необходимости последовательного соединения надо следить за тем, чтобы вольтамперные характеристики имели примерно одинаковые обратные ветви. Для предотвращения перегрузки диодов в схемах выпрямления последовательно с диодами, как правило, включают

сопротивления, ограничивающие ток в прямом направлении.

Работа полупроводниковых диодов не зависит от колебания напряжения источников питания; рабочий режим их устанавливается практически мгновенно с момента включения.

Междуэлектродная емкость германиевых диодов в несколько раз меньше емкости лампового диода; они также имеют малое внутреннее сопротивление, а следовательно, большую крутизну характеристики.

К недостаткам диодов относится зависимость их параметров от температуры.

Полупроводниковые диоды широко применяются:

— для выпрямления токов промышленной частоты;

— для преобразования высокочастотного тока.

При выборе типа диода следует помнить, что при работе на нагрузку, шунтированную емкостью, мгновенное напряжение на зажимах диода достигает почти удвоенной амплитуды сигнала. Поэтому, чтобы обратное напряжение на диоде не превысило предельного допустимого значения, необходимо, например, для детектирования сигналов с амплитудой до 25 В применять диод, рассчитанный на 50 В.

ТРАНЗИСТОРЫ

Транзистор является дальнейшим развитием полупроводникового диода. Используется он для усиления, преобразования и генерирования электрических колебаний.

В электронной лампе малой электрической мощностью в сеточной цепи происходит управление значительной мощностью в анодной цепи. Точно так же в транзисторе небольшой электрической мощностью во входной цепи можно управлять значительно большей мощностью в выходной цепи.

В электронной лампе это управление осуществляется электрическим полем, в транзисторе — током. Как известно, анодный ток зависит от сеточного напряжения U_c, а не от сеточного тока I_c, в то время как величина тока коллектора $I_к$ зависит от величины тока эмиттера $I_э$.

Если в полупроводниковом диоде имеется один электронно-дырочный переход, то в транзисторе таких переходов нужно иметь два.

В качестве полупроводника в транзисторах используется германий.

По виду контактных пар транзисторы, так же как и диоды, делятся на точечные и плоскостные.

Транзистор имеет три электрода, соответствующих катоду, аноду и сетке обычной трехэлектродной лампы. Один из этих электродов называется *эмиттером* (соответствует катоду), другой — *коллектором* (соответствует аноду) и третий — *основанием* (соответствует сетке). Иногда основание называют базой или управляю-

щим электродом. Вывод от эмиттера является входом, а от коллектора — выходом.

На рис. 224, *а* схематически показаны устройство точечного транзистора и его условное изображение на схемах. Точечный транзистор — это, по существу, точечный диод с дополнительным

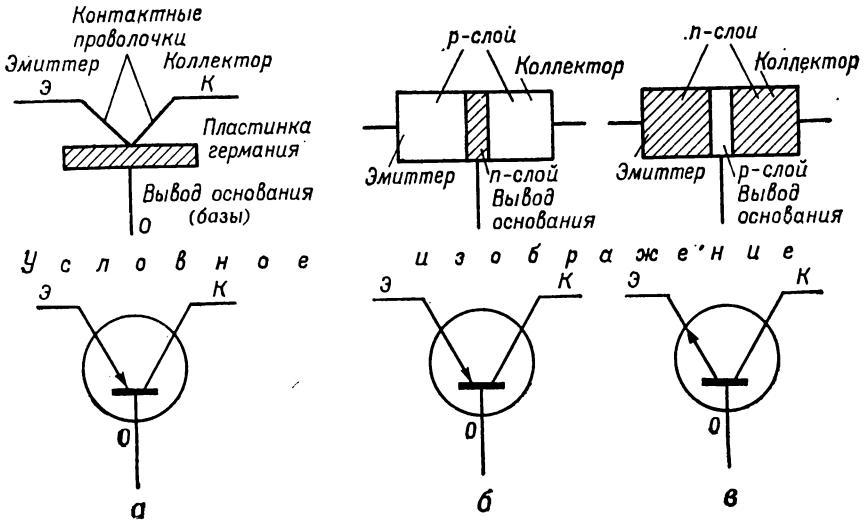


Рис. 224. Принцип устройства транзисторов:
а — точечного; *б* — плоскостного *р-n-р*-типа; *в* — плоскостного *n-р-n*-типа

точечным контактом. Обе проволочки образуют контакт с поверхностью пластинки германия (обычно *n*-типа). Одна проволочка служит эмиттером, другая — коллектором, а пластинка германия — основанием.

На рис. 224, *б* показаны устройство и условное изображение на схемах плоскостного транзистора типа *р-n-р*, а на рис. 224, *в* — плоскостного транзистора типа *n-р-n*.

Работа транзисторов

Транзистор состоит из двух переходов *р-n* и *n-р*-типов, образуемых расположением полупроводника *р*-типа или *n*-типа между парой полупроводников противоположных типов (рис. 225).

Идея состоит в том, чтобы первая секция создавала заряды дырок или электронов, третья секция принимала их через вторую секцию. Секция, которая создает заряды, называется эмиттером, секция на противоположной стороне, собирающая заряды, называется коллектором. Средняя часть называется базой; ее назначение — формировать два перехода между эмиттером и коллектором.

На эмиттер всегда подается напряжение положительного смещения, так что он может давать большое число основных носителей зарядов.

Эмиттер *p*-типа (рис. 225, *а*) поставляет свободные заряды дырок к его переходу с базой, как показано на условном изображении стрелкой к эмиттеру. Это движение положительных зарядов принято за направление тока.

В транзисторе *n-p-n*-типа (рис. 225, *б*) эмиттер поставляет заряды электронов, поэтому стрелка эмиттера на условном изображений транзистора направлена от базы.

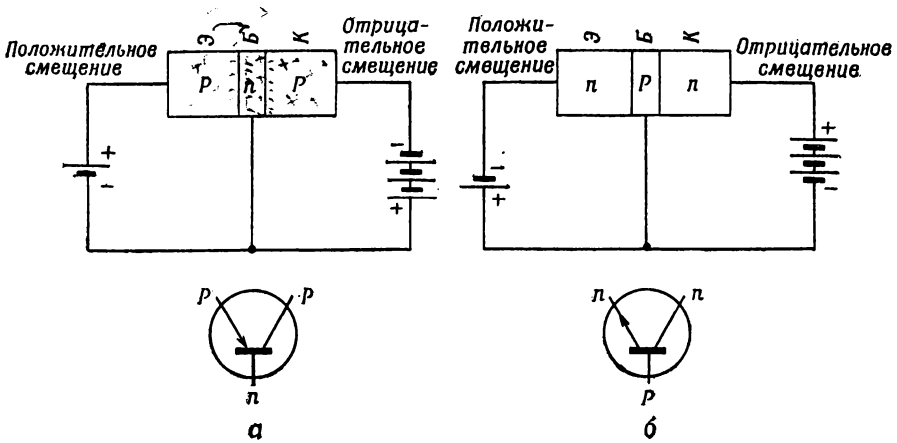


Рис. 225. Транзисторы с эмиттером, базой и коллектором:
а — *p-n-p*-типа и условное изображение; *б* — *n-p-n*-типа и условное изображение

На схемах только эмиттер имеет стрелку, для того чтобы отличить его от других электродов.

На коллектор всегда подается напряжение отрицательного смещения. Назначение коллектора — притягивать заряды от его перехода с базой.

На рис. 225, *а* транзистор *p-n-p*-типа имеет коллектор *p*-типа, который притягивает заряды дырок. Для транзистора *n-p-n*-типа (рис. 225, *б*) коллектор *n*-типа притягивает электроны.

База расположена в середине, она разделяет входную цепь эмиттера от выходной цепи коллектора. Это разделение осуществляется двумя переходами, каждый со своим барьерным напряжением.

База — эмиттерный переход — имеет напряжение положительного смещения, представляя небольшое сопротивление для эмиттерной цепи.

База — коллекторный переход — имеет напряжение отрицательного смещения, представляя большое сопротивление в коллекторной цепи.

Чтобы получить работу от транзистора, необходимо, чтобы ток эмиттера в базе мог управлять током коллектора. Когда эмиттерная цепь низкого сопротивления изменяет ток в коллекторной цепи высокого сопротивления, можно получить усиление.

База намного тоньше эмиттера, в то время как коллектор толще, чем база и эмиттер вместе взятые. Кроме того, коллектор имеет больше примеси. Наконец, напряжение отрицательного смещения на коллекторе намного больше, чем положительное смещение на эмиттере. Вследствие этого практически все заряды, поступающие от эмиттера в базу, протекают в коллекторной цепи. Заряды из базы вводятся в коллектор.

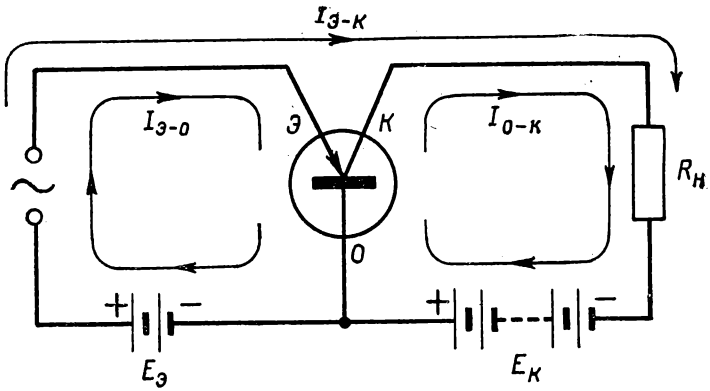


Рис. 226. Схема подключения источников питания к транзистору

База имеет *p-n*-переход (рис. 225, *а*) на одной стороне и противоположный *n-p*-переход на другой стороне. Поэтому полярности барьерных напряжений не совпадают.

Рассмотрим принцип работы (физические процессы) транзистора типа *p-n-p*.

При отсутствии внешних напряжений на электродах токи в цепях триода равны нулю.

Подключим источники питания к транзистору, как показано на рис. 226.

К коллектору приложено напряжение $E_к$, отрицательное относительно основания. Это напряжение является обратным для коллекторного перехода (минус на дырочной области, плюс на электронной). В этом случае коллекторный диод обладает большим сопротивлением (высоким потенциальным барьером) для источника питания $E_к$. Ток $I_{обр}$ в цепи коллектор — основание будет небольшим. Он будет создаваться только теми электронами, энергия которых достаточна для преодоления высокого потенциального барьера перехода.

К эмиттеру приложено небольшое напряжение $E_э$, положительное относительно основания. Это напряжение является прямым для эмиттерного перехода (плюс на дырочной области, минус на электронной). Эмиттерный диод будет обладать небольшим сопротивлением (низким потенциальным барьером). Под действием приложенного напряжения дырки в слое *p* — основные носители за-

ряда — будут перемещаться к n-p-переходу и диффундировать[1] через него в слой n.

Следует помнить, что перемещение дырок есть не что иное, как перемещение электронов от атома к атому в противоположном направлении. Эмиттер инжектирует (вводит) в данном случае дырки в область основания. Так как дырки имеют положительный заряд, то они будут притягиваться к отрицательно заряженному коллектору под действием его потенциала. В результате ток в цепи коллектора возрастет.

Таким образом, на участке между эмиттером и коллектором ток создает дырки.

На своем пути к коллектору некоторое количество дырок в области основания рекомбинирует с электронами и нейтрализуется. Поскольку рекомбинация дырок с электронами проводимости в слое n протекает относительно медленно (характерная особенность германия), а толщина слоя n очень мала, то подавляющее большинство дырок, вошедших в слой n, доходит до коллектора и лишь небольшая часть успевает рекомбинировать, образуя ток $I_{э-о}$ в цепи эмиттер — основание.

Итак, при включении источников питания $E_к$ и $E_э$ в транзисторе протекают три тока по трем замкнутым цепям: ток эмиттер — основание $I_{э-о}$, ток основание — коллектор $I_{о-к}$ и ток эмиттер — коллектор $I_{э-к}$ (см. рис. 226). Величина тока $I_{э-к}$ зависит от количества дырок, поступающих от эмиттера к коллектору, т. е. от тока в цепи эмиттера, который в свою очередь определяется напряжением, приложенным к эмиттеру. Если одновременно с постоянным напряжением в цепи эмиттера действует переменное напряжение, то изменение тока в этой цепи вызывает практически равное изменение тока в цепи коллектора, а следовательно, и изменение падения напряжения на сопротивлении нагрузки $R_н$. Форма переменного напряжения, подводимого ко входу транзистора, полностью воспроизводится на выходе (на $R_н$). Так как напряжение на коллектор подано в обратном (запирающем) направлении, то его цепь имеет большое внутреннее сопротивление. Это дает возможность включить большое сопротивление нагрузки $R_н$ (в десятки и сотни килоом) без заметного влияния на ток в цепи коллектора. Поэтому амплитуда переменного напряжения на сопротивлении $R_н$ имеет большую величину по сравнению с амплитудой напряжения, подводимого к цепи эмиттера, даже если ток коллектора меньше тока эмиттера.

Теперь понятны названия электродов — эмиттер и коллектор: эмиттер служит источником эмиссии (испускания) дырок в область n, а коллектор собирает дырки.

Основными носителями в эмиттере являются дырочные заряды, поэтому они и поступают в базу через p-n-переход (рис. 227)

---

[1] Диффузию дырок эмиттером в слой n или электронов в слой p часто называют инжекцией. Инжекция носителей тока в полупроводнике аналогична эмиссии электронов в электронной лампе.

Положительное смещение на эмиттере дает возможность преодолеть барьерное напряжение перехода. На коллекторном переходе барьерное напряжение имеет противоположную полярность, поэтому оно способствует прохождению дырок через *n-p*-переход. Заметьте, что обратный ток утечки в *n-p*-переход коллектора представляет движение дырочных зарядов как неосновных носителей.

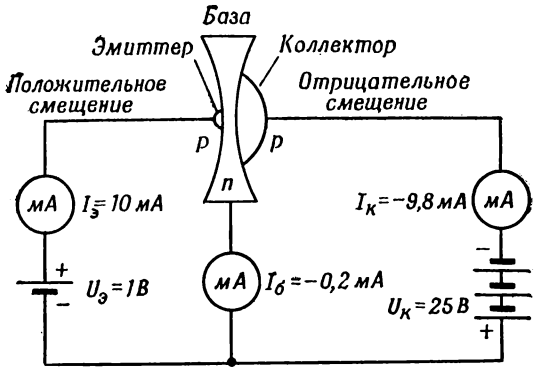


Рис. 227. Транзистор, показывающий результирующий ток коллектора от инъекции (введения) зарядов эмиттера

Это означает, что дырочные заряды, поступаемые от эмиттера, становятся составной частью обратного тока утечки. Вместо возвращения через базу заряды, вводимые эмиттером, притягиваются к коллектору, увеличивая его выходной ток.

Чтобы увеличить инжекцию зарядов в коллектор, база изготавливается очень тонкой. В этом случае сопротивление базы по отношению к коллектору невелико. Сопротивление базы к ее выходу намного больше. Кроме того, большое напряжение отрицательного смещения означает, что его электрическое поле оказывает сильное влияние на заряды при коллекторном переходе. Поэтому практически весь прямой ток эмиттерной цепи становится обратным током коллекторной цепи. На рис. 227 эмиттер создает прямой ток величиной 10 мА. Приблизительно 9,8 мА поступает в коллекторную цепь и только 0,2 мА протекает через базу к эмиттеру.

СХЕМЫ ВКЛЮЧЕНИЯ ТРАНЗИСТОРОВ

Схемы включения транзисторов аналогичны схемам включения электронных ламп. От способа включения зависят усилительные свойства каскада.

На рис. 228 изображены три основные схемы включения транзисторов и эквивалентные им схемы включения электронных ламп. Для упрощения элементы внешних цепей и источники питания в схемах с электронными лампами не показаны. Приведенные схемы

применяются в однокаскадных усилителях, генераторах и других схемах.

Схема включения полупроводникового триода, показанная на рис. 228, *а*, называется схемой с общей базой, поскольку вход эмиттера и выход коллектора подключаются к базе. На рис. 228, *б*

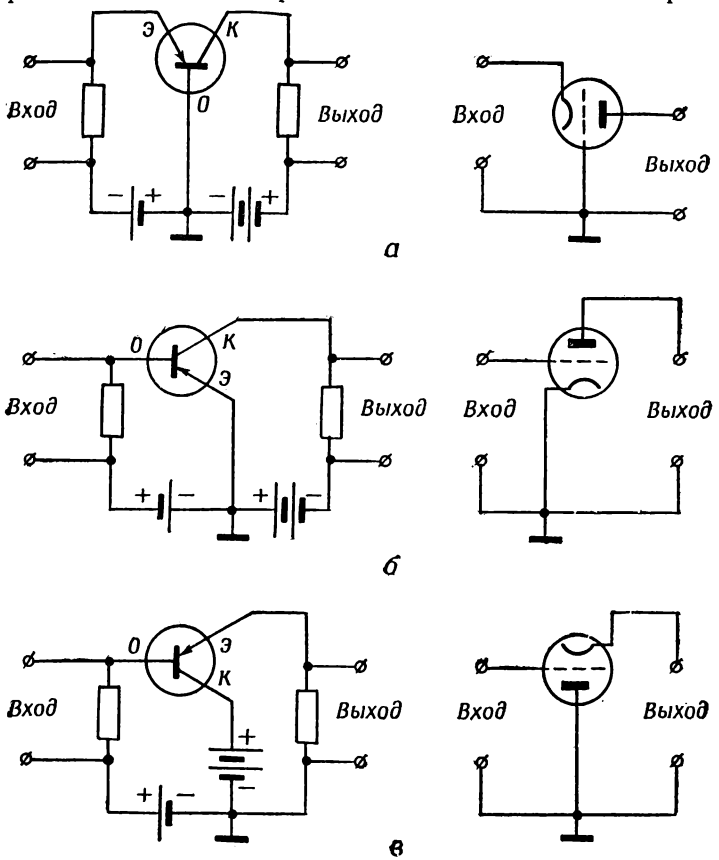


Рис. 228. Схемы включения транзисторов и эквивалентные им схемы включения электронных ламп:
а — с заземленным основанием и с заземленной сеткой; *б* — с заземленным эмиттером и с заземленным катодом; *в* — с заземленным коллектором и с заземленным анодом

приведена схема с общим эмиттером и на рис. 228, *в* — с общим коллектором.

Каждая схема пригодна для транзисторов *p-n-p-* и *n-p-n*-типа, которые отличаются между собой только измененной полярностью включения источников питания.

Эти схемы включения также называются схемами с заземленными базой, эмиттером и коллектором, так как общий электрод часто подключается к заземленному шасси.

Схема с общим эмиттером — одна из наиболее распространенных схем включения транзисторов в усилителях, так как она дает наибольшее усиление.

Во всех случаях цепь эмиттера имеет положительное смещение, чтобы получить небольшое сопротивление перехода, в то время как цепь коллектора имеет отрицательное смещение для создания большого сопротивления перехода.

Схема с общей базой. На рис. 228, *а* приведены схема с заземленной базой и эквивалентная ей схема с заземленной сеткой. Входное напряжение подводится между эмиттером и базой, а усиленное выходное напряжение снимается между коллектором и базой. Источники питания положительного и отрицательного смещения заземляются одной стороной, которая является общей для входного и выходного сигнала переменного напряжения.

Эта схема не изменяет фазу между входным и выходным напряжением. Входная цепь эмиттера имеет малое входное сопротивление, в то время как выходная цепь коллектора имеет очень большое выходное сопротивление.

Схема с общим эмиттером. На рис. 228, *б* приведены схема с заземленным эмиттером и эквивалентная ей схема с заземленным катодом. Входное напряжение подводится между базой и эмиттером, а усиленное выходное напряжение снимается между коллектором и эмиттером.

При общем эмиттере выходная цепь коллектора подключается к эмиттеру вместо базы. Теперь напряжение отрицательного смещения, приложенное к коллекторному электроду, имеет большое влияние на эмиттерный электрод. Кроме того, в этой схеме входное напряжение подводится в обратной полярности (в первом случае оно подводилось между эмиттером и базой, теперь оно подводится между базой и эмиттером). Следовательно, в схеме с общим эмиттером происходит сдвиг по фазе на 180° между входным и выходным напряжением.

Схема с общим эмиттером позволяет получить большое усиление. Это объясняется тем, что изменения тока базы для цепи с общим эмиттером влияют на коллекторный ток больше, чем изменения тока эмиттера для цепи с общей базой.

Схема с общим коллектором. На рис. 228, *в* приведены схема с заземленным коллектором и эквивалентная ей схема с заземленным анодом. Входное напряжение подводится между базой и коллектором, а выходное напряжение снимается между эмиттером и коллектором. Эта схема эквивалентна схеме катодного повторителя. В этом случае входная цепь имеет большое сопротивление, выходное напряжение снимается с эмиттерной цепи низкого сопротивления.

Усиление схемы с общим коллектором меньше единицы, поскольку выходное напряжение меньше входного. Однако эта схема находит практическое применение, так как в некоторых случаях требуется иметь большое входное сопротивление и небольшое вы-

ходное сопротивление. Усиление можно довести близко к единице. Фаза между входным и выходным напряжением не меняется.

Схема усилителя

Так как величина коллекторного тока в выходной цепи может контролироваться током входной цепи, то транзистор может работать в качестве усилителя. Небольшое напряжение, приложен-

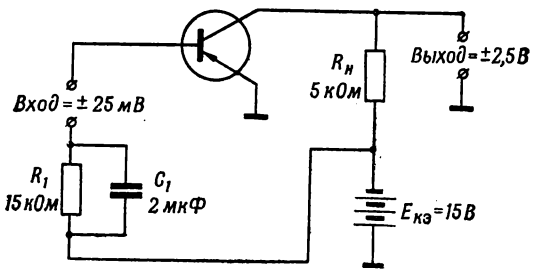


Рис. 229. Схема усилителя с общим эмиттером

ное ко входу, создает намного большее напряжение на выходе. В цепь коллектора включается сопротивление нагрузки $R_н$. Ток коллектора создает выходное напряжение на зажимах этого сопротивления.

Типичная схема усилителя напряжения с общим эмиттером приведена на рис. 229. Транзистор *p-n-p*-типа имеет отрицательное смещение $E_{кэ}=15$ В. На сопротивлении нагрузки $R_н$ в коллекторной цепи создается переменное выходное напряжение при изменении коллекторного тока.

Обратите внимание, что в цепи с общим эмиттером используется один источник питания, так как полярность положительного смещения для цепи база — эмиттер совпадает с полярностью отрицательного смещения для коллектора.

Отрицательное смещение на коллекторе значительно больше положительного, поэтому в цепь база — эмиттер включен резистор R_1, на котором происходит падение напряжения. Величина сопротивления 15 000 Ом, оно ограничивает прямой ток до 1 мА при напряжении источника 15 В. Внутреннее сопротивление транзистора в прямом направлении ничтожно мало.

Шунтирующий конденсатор C_1 позволяет входному напряжению сигнала изменять прямой ток, минуя последовательно включенный резистор R_1. Таким образом, очень небольшое изменение входного напряжения вызывает значительное изменение тока базы. Для усилителя звуковой частоты величина емкости конденсатора C_1 порядка 2 мкФ. В действительности нижняя пластина конденсатора заземляется на шасси, работа схемы от этого не нарушается.

Итак, усилительные свойства транзистора можно рассматривать в следующей последовательности.

1. Входное напряжение изменяет входной ток, который представляет ток базы для цепи с общим эмиттером.

2. Изменение входного тока изменяет ток коллектора.

3. На сопротивлении внешней нагрузки в коллекторной цепи создается изменяющееся падение напряжения в такт изменениям тока коллектора.

4. Выходное напряжение в коллекторной цепи на зажимах сопротивления $R_н$ намного больше, чем входное напряжение.

5. Усиление напряжения получается вследствие того, что изменение тока в эмиттерной цепи низкого сопротивления создает соответствующее изменение тока в коллекторной цепи высокого сопротивления.

Мы рассмотрели работу усилителя, собранного на транзисторе *p-n-p*-типа. При использовании триода *n-p-n*-типа полярность включения коллекторной батареи изменится. Полярность напряжений и направление токов в цепях изменяются на обратные. Принцип работы схемы не изменится. Физические процессы в таких транзисторах аналогичны рассмотренным. Разница заключается в том, что эмиттер инжектирует с области основания не дырки, а электроны проводимости. На эмиттер таких транзисторов подается отрицательный потенциал, а на коллектор — положительный.

В схеме рис. 229 отрицательное напряжение, приложенное к коллектору *p*-типа, притягивает заряды дырок от его перехода с базой. Это напряжение обеспечивает отрицательное смещение в выходной цепи. Эта же батарея создает отрицательное напряжение на базе по отношению к эмиттеру. Электроны в базе *n*-типа отталкиваются, в то время как заряды дырок в эмиттере *p*-типа притягиваются к переходу эмиттер — база. Таким образом, во входной цепи подается положительное смещение.

Дырочный ток в коллекторной цепи имеет условное направление, противоположное направлению потока электронов. Поэтому дырочный ток создает падение напряжения, полярность которого указана на зажимах резистора $R_н$. Это падение напряжения противоположно напряжению батареи. Следовательно, отрицательное напряжение на коллекторе по отношению к шасси равно напряжению батареи минус падение напряжения $I_к R_н$.

ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПАРАМЕТРЫ ТРАНЗИСТОРОВ

При снятии характеристик электронных ламп изменяют напряжения на электродах и отмечают вызванные этим изменения токов. Так как в транзисторе происходит управление током, то при снятии его характеристик изменяют ток эмиттера или коллектора и отмечают изменения напряжений, получаемые на этих электродах.

Основной характеристикой транзистора считается выходная характеристика, показывающая изменение напряжения на коллекторе $U_к$ в зависимости от изменения тока коллектора $I_к$ при неизменном токе эмиттера $I_э$. На рис. 230 приведено семейство коллекторных характеристик транзистора, снятых при окружающей температуре 25° С. Для большей наглядности при сравнении характеристик транзисторов с характеристиками электронных ламп часто напряжение коллектора откладывают по оси абсцисс. Из рис. 230 видно, что коллекторные характеристики транзистора похожи на анодные характеристики пентода, показывающие зависимость анодного тока от изменения анодного напряжения при определенных значениях сеточного напряжения.

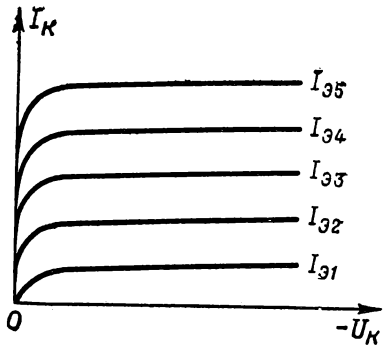


Рис. 230. Семейство коллекторных характеристик плоскостного транзистора при разных токах эмиттера

Для схем с заземленным основанием (точнее, с основанием, общим для входной и выходной цепей) можно построить и другие характеристики:

— зависимость напряжения на эмиттере от тока эмиттера при постоянных значениях тока коллектора;

— зависимость напряжения на эмиттере от тока коллектора при постоянных значениях тока эмиттера;

— зависимость напряжения на коллекторе от тока эмиттера при постоянных значениях тока коллектора.

К основным параметрам транзистора относятся: коэффициент усиления по току α, предельная рабочая частота, коэффициент усиления по мощности $K_р$, входное сопротивление $R_{вх}$, выходное сопротивление $R_{вых}$, сопротивление обратной связи $R_{обр.\,св}$, выходная емкость $C_к$, выходная мощность $P_{вых}$ и коэффициент шумов $N_ш$.

Коэффициент усиления по току α представляет собой отношение изменения тока коллектора $\Delta I_к$ к вызвавшему его изменению тока эмиттера $\Delta I_э$ при неизменном напряжении на коллекторе:

$$\alpha = \frac{\Delta I_к}{\Delta I_э} \quad \text{при } U_к = \text{const}.$$

Он определяется наклоном характеристики $I_к$ в зависимости от тока эмиттера $I_э$ при постоянном напряжении на коллекторе $U_к$.

Как уже отмечалось, α у плоскостных транзисторов меньше единицы, у точечных — несколько единиц.

Предельная рабочая частота — это такая частота, на которой коэффициент усиления по току α падает до 0,7 его максимальной величины. Уменьшение усиления на высоких частотах ограничи-

вает область применения транзисторов. Падение усиления транзистора с ростом рабочей частоты объясняется:

— конечным временем перемещения зарядов в полупроводнике между эмиттером и коллектором, что приводит к фазовым сдвигам (это время значительно больше времени пролета электронов в лампе);

— наличием внутренних емкостей между электродами транзистора.

Предельная рабочая частота у точечных транзисторов выше, чем у плоскостных.

Выходное сопротивление $R_{вых}$ транзистора определяется наклоном характеристики $U_к$ в зависимости от тока коллектора $I_к$ при постоянном токе эмиттера $I_э$:

$$R_{вых} = \frac{\Delta U_к}{\Delta I_к} \quad \text{при } I_э = \text{const}.$$

При разомкнутой цепи эмиттера, т. е. при $I_э = 0$,

$$R_{вых} = \frac{U_к}{I_к}.$$

Выходное сопротивление равно сопротивлению коллекторного перехода плюс сопротивление основания:

$$R_{вых} = r_к + r_о.$$

Сопротивление обратной связи $R_{обр.\,св}$ (обратной передачи) определяется наклоном характеристики $U_э$ в зависимости от тока коллектора $I_к$ при постоянном токе эмиттера $I_э$:

$$R_{обр.св} = \frac{\Delta U_э}{\Delta I_к} \quad \text{при } I_э = \text{const}.$$

Сопротивление $R_{пр.\,пер}$ прямой передачи определяется наклоном характеристики $U_к$ в зависимости от тока эмиттера $I_э$ при постоянном токе коллектора $I_к$:

$$R_{пр.пер} = \frac{\Delta U_к}{\Delta I_э} \quad \text{при } I_к = \text{const}.$$

На рис. 231 через r_m обозначено сопротивление генератора выходного сигнала (эквивалентного генератора коллекторной цепи):

$$r_m = R_{пр.пер} - R_{вых} = \alpha r_к.$$

Напряжение генератора в цепи коллектора равно $r_m i_э$. Этот генератор соответствует генератору с электродвижущей силой μu_g в эквивалентной схеме усилителя напряжения, собранного на электронной лампе.

Усиление по мощности равно отношению мощности выходного сигнала к мощности сигнала на входе. Усиление по мощности транзистора примерно пропорционально отношению полного выходного сопротивления к входному и квадрату α.

Выходная мощность, которую может отдать транзистор, зависит от выбора схемы, режима питания и допустимой мощности, рассеиваемой коллектором в схемах с заземленным основанием.

При усилении звуковых частот ток на выходе изменяется в точном соответствии с изменениями тока на входе. С повышением частоты появляются частотные искажения, т. е. наблюдается неравномерное усиление всех частот. Наличие емкостей коллекторного и эмиттерного переходов является одной из причин, вызывающих

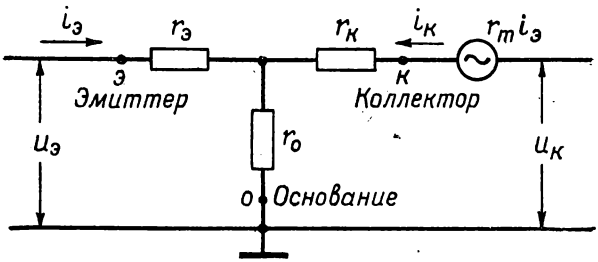


Рис. 231. Упрощенная эквивалентная схема транзистора

уменьшение коэффициента усиления при возрастании частоты. Эти емкости в транзисторе действуют аналогично входной и выходной емкостям в электронной лампе. Емкость эмиттера играет сравнительно малую роль, так как сопротивление эмиттера невелико. Более важное значение имеет емкость коллектора.

Другая наиболее важная причина, ограничивающая усиление на высоких частотах, — это различие во времени движения электронов между эмиттером и коллектором, которое приводит к тому, что форма изменения тока на выходе воспроизводится с искажениями. При определенном изменении напряжения на эмиттере некоторое количество электронов попадает на основание. Но так как одни электроны доходят до коллектора раньше, чем другие, то это и вызывает искажения. То же самое получается при неравномерности толщины области основания.

Уменьшение толщины пластинки германия между эмиттером и коллектором и увеличение подвижности носителей зарядов дают возможность повысить частоту усиливаемых колебаний.

Подвижность электронов в германии почти в два раза больше подвижности дырок. Поэтому транзисторы *n-p-n*-типа при одном и том же основании более высокочастотны, чем транзисторы *p-n-p*-типа.

Очень важное достоинство транзисторов — их высокая механическая прочность.

ПРИМЕНЕНИЕ ТРАНЗИСТОРОВ

Режим работы выходной цепи транзистора так же сильно влияет на входные параметры, как и входные параметры влияют на режим выходной цепи. Это объясняется тем, что в транзи-

сторе нет полной изоляции между входной и выходной цепями, как это наблюдается в электронной лампе.

Напряжение и ток на выходе транзистора зависят от тока в цепи эмиттер — основание, который в свою очередь зависит от приложенного к этой цепи напряжения и сильно связан с током и напряжением на выходе транзистора.

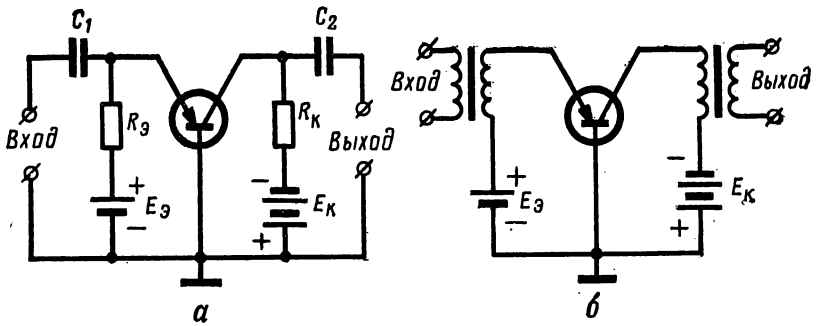


Рис. 232. Однокаскадные усилители на транзисторах с заземленным основанием:
а — с емкостно-реостатной связью; *б* — с трансформаторной связью

Выбор типа транзистора и схемы его включения зависит от требуемых величин входного и выходного сопротивлений, усиления по мощности и выходной мощности.

Из сравнения данных основных схем усилителей вытекают некоторые важные особенности усилителей на транзисторах:

— фаза усиливаемого сигнала изменяется только в схеме с заземленным эмиттером;

— схема с заземленным эмиттером дает наибольшее усиление по мощности, но не максимальную выходную мощность;

— максимальная выходная мощность получается от точечного транзистора, включенного по схеме с заземленным основанием;

— минимальное входное сопротивление имеет схема с заземленным основанием;

— наибольшее входное сопротивление имеет схема с заземленным коллектором.

На рис. 232 приведены типичные схемы однокаскадных усилителей, собранных на транзисторах с заземленным основанием. На рис. 232, *а* изображена схема усилителя с емкостно-реостатной связью, а на рис. 232, *б* — с трансформаторной.

На рис. 233 показаны типичные схемы однокаскадных усилителей, собранных на плоскостных транзисторах с заземленным эмиттером.

На рис. 233, *а* изображена схема усилителя с емкостно-реостатной связью, а на рис. 233, *б* — с трансформаторной.

На рис. 234 приведены типичные схемы однокаскадных усилителей, собранных на плоскостных транзисторах с заземленным

коллектором. На рис. 234, *а* изображена схема усилителя с емкостно-реостатной связью, а на рис. 234, *б* — с трансформаторной.

Точечные транзисторы устойчиво работают только в схеме с заземленным основанием. В двух других схемах они работают

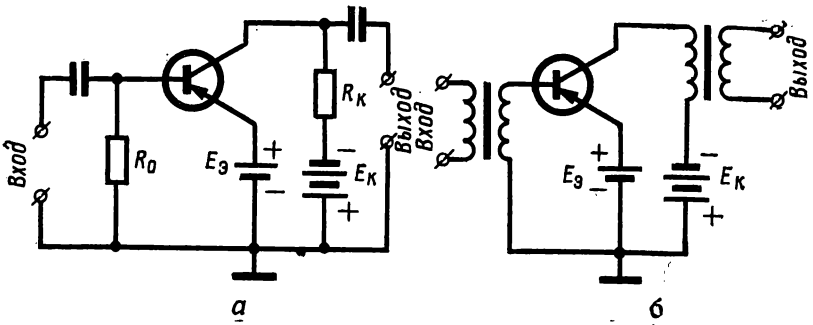


Рис. 233. Однокаскадные усилители на транзисторах с заземленным эмиттером:

а — с емкостно-реостатной связью; *б* — с трансформаторной связью

хуже, чем плоскостные, из-за нестабильности и ограниченной мощности рассеяния эмиттером, который в этих схемах входит в выходную цепь.

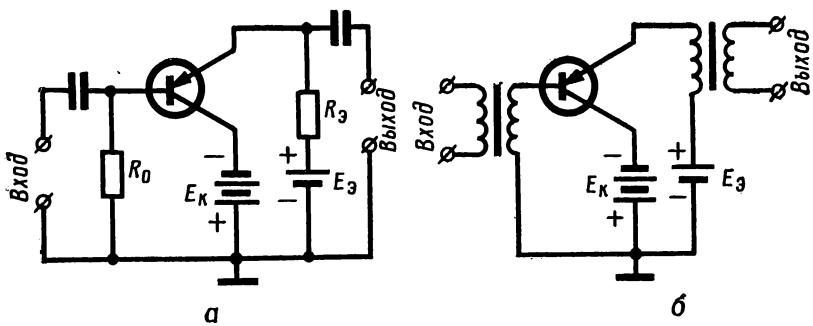


Рис. 234. Однокаскадные усилители на транзисторах с заземленным коллектором:

а — с емкостно-реостатной связью; *б* — с трансформаторной связью

Полярность включения батарей соответствует использованию плоскостных транзисторов *p-n-p*-типа и точечных транзисторов *n-p-n*-типа. При изменении типа транзисторов следует изменить полярность включения батарей, в остальном схемы остаются прежними.

Для транзисторов требуются источники питания со стабильной величиной тока, в то время как для электронных ламп требуются источники питания со стабильными напряжениями и малыми внутренними сопротивлениями.

Самый простой источник питания со стабильной величиной тока — это батарея с большим напряжением, последовательно с которой включено сопротивление. Величина сопротивления должна быть больше внутренних сопротивлений цепей транзистора.

Следовательно, в схемах усилителей, изображенных на рис. 232, *а*; 233, *а* и 234, *а*, резисторы R_0, $R_к$ и $R_э$ и напряжения источников питания $E_э$ и $E_к$ должны быть достаточно велики, чтобы ток в соответствующих цепях был стабильным.

В схемах, изображенных на рис. 232, *б*; 233, *б* и 234, *б*, в цепях источников питания рекомендуется включить стабилизирующие ток резисторы, которые следует шунтировать конденсаторами большой емкости. Источники питания, стабилизированные по току, уменьшают разброс параметров схемы при замене транзисторов, так как величины токов в цепях электродов в основном определяются большими внешними сопротивлениями, а не внутренними сопротивлениями транзисторов.

Входная емкостная связь применяется в том случае, когда внутреннее сопротивление источников сигнала сравнимо с входным сопротивлением схемы $R_{вх}$ или меньше его. Выходная емкостная связь применяется тогда, когда сопротивление нагрузки сравнимо с выходными сопротивлениями $R_{вых}$ транзистора или больше него.

Входная и выходная трансформаторная связь требуется тогда, когда сопротивление источника сигнала или нагрузки резко отличается от входного и выходного сопротивления транзистора, т. е. когда требуется согласование сопротивлений.

Непосредственная связь используется в схемах усиления постоянного тока и в других случаях, когда наличие емкостей или трансформаторов нежелательно. При непосредственной связи сопротивление источника сигнала должно соответствовать входному сопротивлению транзистора, а сопротивление нагрузки — выходному сопротивлению.

Подобно многокаскадным усилителям на электронных лампах существуют и многокаскадные усилители на транзисторах. Различное сочетание каскадов — по схеме с заземленным основанием, заземленным эмиттером или заземленным коллектором — определяется требуемым усилением по напряжению или мощности, а число каскадов ограничивается уровнем шумов.

Входное сопротивление каскада всегда меньше выходного, за исключением каскада с заземленным коллектором. Поэтому при последовательном соединении каскадов затрудняется согласование входных и выходных сопротивлений. При реостатно-емкостной междукаскадной связи добиться полного согласования между каскадами нельзя. При отсутствии же согласования наблюдается значительная потеря усиления. Однако ради простоты реостатно-емкостной связи приходится мириться с потерей усиления.

Правильное согласование можно получить при трансформаторной связи между каскадами. Для связи между каскадами по схеме с заземленным основанием и с заземленным эмиттером, т. е. для

согласования высокого выходного сопротивления предыдущего каскада с низким входным сопротивлением последующего каскада, рекомендуется применять понижающие трансформаторы. При этом для получения хорошей характеристики в области низких частот индуктивность первичной обмотки трансформатора берется достаточно большой. Повышающие трансформаторы следует применять только при переходе к каскадам по схеме с заземленным коллектором.

Каскад по схеме с общим коллектором используется для согласования двух каскадов на транзисторах, которые имеют другие общие электроды, особенно при реостатно-емкостной связи. Кроме того, каскад с заземленным коллектором используется в качестве входного, если требуется усилитель с относительно большим входным сопротивлением.

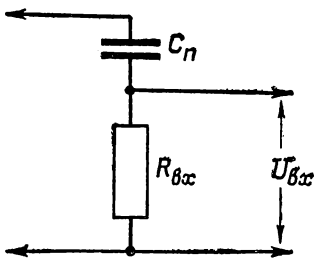


Рис. 235. Упрощенная схема делителя напряжения

Рассмотрим кратко вопрос о величинах емкостей переходных конденсаторов в усилителях на транзисторах.

Как известно, входное сопротивление $R_{вх}$ каскада на электронной лампе определяется параллельно включенными сопротивлением утечки сетки этого каскада и внутренним сопротивлением лампы. Напряжение на сетку лампы снимается с делителя, состоящего из конденсатора $C_п$ и сопротивления $R_{вх}$ (рис. 235). Входное сопротивление электронных ламп измеряется десятками и сотнями килоом, поэтому величину емкости конденсатора $C_п$ берут 0,01—0,1 мкФ, что достаточно для получения высокого напряжения $U_{вх}$ на сетке следующего каскада и, следовательно, большего коэффициента усиления. Кроме того, при таких соотношениях величин $C_п$ и $R_{вх}$ получается необходимая частотная характеристика усиления.

По-другому обстоит дело в усилителях низкой частоты на транзисторах. Чтобы добиться большого усиления по напряжению, обычно применяют плоскостные транзисторы, включенные по схеме с заземленным эмиттером. Входное сопротивление такого каскада равно сотням ом. Поэтому емкость переходного конденсатора $C_п$ должна быть большой (10—20 мкФ). При использовании переходного конденсатора $C_п$ небольшой емкости все напряжение падает на нем и лишь незначительная часть напряжения сигнала подается на следующий каскад. В этом случае коэффициент усиления получается незначительным и частотная характеристика усиления будет иметь завал на низких частотах.

В качестве переходных конденсаторов в усилителях на транзисторах удобно применять низковольтные электролитические конденсаторы.

Усилители высокой частоты на полупроводниковых приборах, как и усилители низкой частоты, могут быть однокаскадными и многокаскадными. Связь между каскадами может быть

емкостной, индуктивной и в некоторых случаях непосредственной.

Требования к согласованию сопротивлений остаются те же, что и для низких частот.

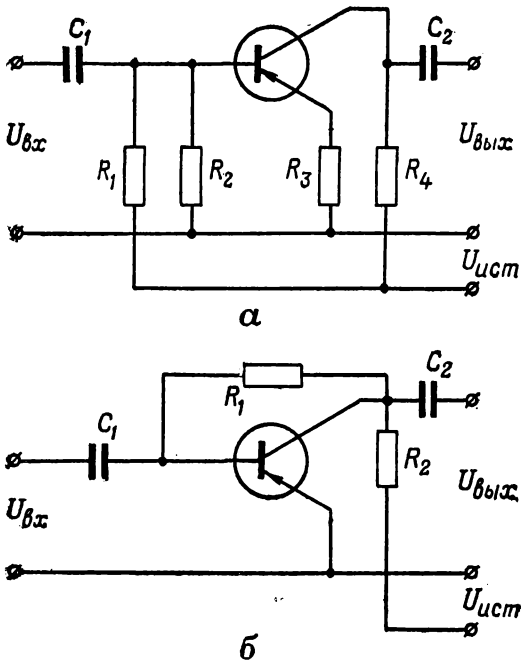


Рис. 236. Схема температурной стабилизации:
а — первый вариант обратной связи по постоянному току;
б — второй вариант

Усиление каскада высокой частоты на транзисторе меньше, чем каскада на электронной лампе. Это объясняется низким входным сопротивлением транзистора.

Большинство транзисторов можно использовать для генерирования колебаний. Так как транзистор обладает усилительным свойством, то при определенной обратной связи он может генерировать электрические колебания.

Возрастание температуры может нарушить нормальную работу транзисторов: в генераторах может уйти частота, а в усилителях — уменьшится коэффициент усиления. Чтобы избежать этого, применяют температурную стабилизацию, при которой стабилизируется положение рабочей точки, и транзистор работает нормально в более широком диапазоне изменения температур.

Существует несколько способов стабилизации рабочей точки транзистора.

Вместо обычного сопротивления нагрузки можно включить тер-

морегулирующие элементы, термисторы, термочувствительные керамические сопротивления, германиевые диоды.

Довольно простое и надежное средство температурной стабилизации — обратная связь по постоянному току. Рассмотрим два варианта такой связи. На рис. 236, *а* приведена схема, в которой цепь обратной связи образуется резисторами R_2 и R_3. Резистор R_1 служит для подачи постоянного отрицательного смещения на основание. При повышении температуры растет ток $I_{к-о}$, а вместе с ним и общий ток коллектора, что должно привести к смещению рабочей точки. Но одновременно на резисторе R_3 создается дополнительное падение напряжения. Через резистор R_2 оно подается на основание как дополнительное напряжение смещения, вследствие чего рабочая точка остается на прежнем месте, т. е. компенсируется сдвиг рабочей точки в результате повышения температуры.

На рис. 236, *б* приведена другая схема обратной связи. Действует она аналогично описанной выше схеме. Дополнительное падение напряжения создается на сопротивлении нагрузки резистора R_2 и через резистор R_1 подается на основание. Резистор R_1 служит одновременно и сопротивлением смещения, и сопротивлением обратной связи.

Туннельные диоды

Туннельные диоды широко применяются в качестве усилителей и маломощных генераторов в широком диапазоне волн.

В основе работы туннельного диода лежит физическое явление, называемое квантово-механическим туннельным эффектом, сущность которого заключается в способности электронов при определенных условиях преодолевать значительные потенциальные барьеры, где потенциальная энергия электрона больше его полной энергии. По законам механики такой переход невозможен. Однако электрон не является полностью частицей, определяемой обычной механикой: он обладает и волновыми свойствами.

Туннельный эффект представляет собой квантовое явление, обусловленное волновыми свойствами электронов.

В туннельных диодах используются полупроводниковые материалы с относительно большим содержанием примесей. Толщина *p-n*-перехода значительно меньше обычных диодов. Очень малая толщина *p-n*-перехода обуславливает высокую напряженность поля и резкий переход от дырочной проводимости к электронной, что способствует заметному проявлению туннельного эффекта.

Характеристика туннельного диода имеет падающий участок, т. е. участок с отрицательным сопротивлением, на котором увеличение приложенного к диоду напряжения вызывает уменьшение тока.

Последовательно с источником постоянного тока включается источник переменного напряжения, а усиленное напряжение снимается с зажимов диода.

Если в качестве нагрузки туннельного диода использовать колебательный контур, то можно получить генерацию колебаний.

Полевые транзисторы

Полевые транзисторы представляют полупроводниковые приборы, у которых выходная цепь не имеет *p-n*-переходов. Ток в выходной цепи управляется электрическим полем. От обычного транзистора полевой транзистор отличается тем, что в нем усиление происходит за счет основных носителей.

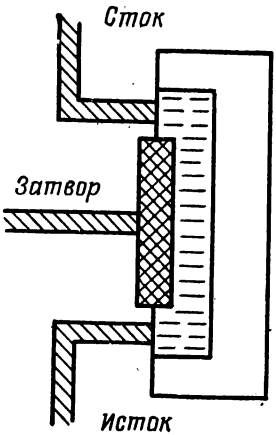


Рис. 237. Структура полевого транзистора

Полевой транзистор часто называют униполярным или канальным транзистором.

Работа всех полевых транзисторов основана на изменении эффективной толщины проводящего канала путем изменения толщины пространственного заряда *p-n*-перехода или его эквивалента.

Электронный ток (рис. 237) протекает от истока к стоку по каналу *n*-типа, ограниченному двумя *p*-областями. Эффективной шириной канала, а следовательно, и сопротивлением между истоком и стоком можно управлять, меняя напряжение на затворе. В отличие от обычного транзистора входное сопротивление (сопротивление затвора) очень большое, особенно на средних частотах. В полевом транзисторе можно управлять током, протекающим в любом направлении, так как сток и исток взаимозаменяемы. Ток образуют носители только одной полярности (в нашем примере электроны). Отсюда название — униполярный.

В МОП-транзисторе (металл — оскид — полупроводник) затвором является не *p-n*-переход, а металлическая пленка, напыленная на оксидный слой, покрывающий поверхность кристалла полупроводника. Канал образуется путем инверсии типа проводимости вблизи поверхности кристалла, а величина проводимости канала меняется главным образом за счет зарядов, наводимых на «пластинах» конденсатора, образованного оксидной пленкой. Приложенное напряжение к затвору индуцирует соответствующий заряд в области канала, либо увеличивая, либо уменьшая концентрацию электронов, и тем самым изменяет проводимость канала.

Некоторые рекомендации по эксплуатации полупроводниковых приборов

1. Нельзя допускать нагревания полупроводниковых приборов до температуры большей, чем указано в паспорте.

Перегрев может произойти при пайке приборов или вследствие чрезмерного тока, проходящего в них. В процессе эксплуатации нельзя превышать максимально допустимых режимов работы.

2. При впайке полупроводниковых приборов в схему не следует коротко отрезать выводы электродов. Паять надо на расстоянии не менее 10 мм от корпуса как можно быстрее: хорошо нагретым паяльником (мощностью 50—60 Вт) и легкоплавким припоем (с температурой плавления не выше 150° С). Вывод электродов при пайке следует поддерживать массивными плоскогубцами, чтобы обеспечить лучшую теплоотдачу.

Полупроводниковые приборы можно располагать в любом физическом положении, но не слишком близко к сопротивлениям, рассеивающим большие мощности, и к электронным лампам.

3. Нельзя изменять полярность питающих напряжений для данного типа транзистора, так как это ведет к выходу его из строя.

4. Нельзя допускать больших бросков токов и напряжений в устройствах, где применяются полупроводниковые приборы. Их можно повредить даже при небольшом изменении напряжения в переходных режимах. Источник питания следует выключить, когда заменяется или переставляется транзистор.

При проверке сопротивлений в цепи, если есть возможность, удалите или отключите транзистор, так как напряжение внутренней батареи омметра может создать чрезмерное положительное смещение.

5. При включении транзисторов к источникам напряжений во всех случаях вывод базы необходимо присоединять первым.

6. При испытании транзисторов в новых цепях необходимо:

— убедиться в правильной полярности подключаемого напряжения; высокое напряжение отрицательного смещения, приложенное по ошибке как положительное смещение, вызовет чрезмерный ток, который выведет из строя транзистор;

— вначале приложить меньшие, чем нормальные, напряжения и произвести измерения эмиттерного и коллекторного токов; при нормальных показаниях довести напряжения до номинальных величин.

МИНИАТЮРИЗАЦИЯ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

Полупроводниковые приборы все время совершенствуются. Расширяется область усиливаемых частот транзисторов, увеличиваются границы температурных ограничений, растет величина мощности. Появляются новые конструкции транзисторов с другими принципами работы. Существенно уменьшаются размеры, вес и потребляемая энергия. Происходит миниатюризация отдельных элементов радиоаппаратуры. Микроминиатюризация представляет новое направление технического прогресса.

Обычный объемный монтаж в радиоэлектронике все больше заменяется печатными схемами, а за последнее время появились такие конструкции, как модули, микромодули, пленочные микросхемы, твердые схемы.

В понятие радиоэлектроника входят электротехника, электроника (область физики и техники, разрабатывающая теорию и практику изготовления и применения электронных приборов) и все многочисленные применения этих дисциплин в самых разнообразных областях науки и техники.

Микромодули представляют собой миниатюрные модульные блоки, каждый из которых является функционально законченным узлом, например усилителем. Микромодуль имеет размеры порядка 10×10×20 мм и менее при плотности размещения 10—20 деталей и более в 1 см^3. Каждый микромодуль — это набор резисторов, конденсаторов, полупроводниковых диодов, транзисторов и других приборов, соединенных пайкой в нужную схему. Обычно микромодуль герметизирован (защищен твердеющим лаком и заливкой) и представляет собой небольшой блочек с выступающими из него кончиками — отводами.

Микромодуль представляет предел уменьшения аппаратуры, составляемой из отдельных (дискретных) элементов. При дальнейшем уменьшении деталей соединительные проводники стали бы занимать большую часть объема. Возникли новые направления, известные под общим названием микроэлектроника.

В микроэлектронике используются последние достижения физики, химии, металлургии, радиотехники, математики, приборо- и машиностроения, биологии и других наук и технических направлений.

Интегральной (т. е. объединенной, обобщенной) *схемой* считают микроэлектронную схему, которая выполнена из участков или слоев, осуществляющих функции обычных радиоэлементов (активных и пассивных). Одним из классов интегральных схем являются тонкопленочные.

Интегральная схема — это микроминиатюрный функциональный узел электронной аппаратуры, в котором элементы и соединительные проводники, входящие в схему узла, изготовляются в едином технологическом цикле на поверхности (или в объеме) материала основания (подложки) и имеют общую герметизацию и защиту от механических воздействий.

Тонкопленочные схемы представляют собой миниатюрные узлы или модули радиоэлектронной аппаратуры, выполненные путем нанесения через маски тонких слоев проводящих и изолирующих веществ на поверхность керамической или стеклянной подложки. Маска — трафарет изготовляется по фотошаблону с высокой степенью точности.

Для образования соединительных проводов и обкладок конденсаторов используется золото, медь, алюминий. Резисторы образуются пленками нихрома, тантала, окислов некоторых материалов. В роли диэлектриков выступают пленки окислов кремния, алюминия, фтористого магния. Пленки наносятся путем напыления в вакууме, для чего проволочку или таблетку распыляемого материала нагревают до высокой температуры. Некоторые вещества наносятся путем электролитического или химического осаж-

дения из раствора. Толщина слоев в тонкопленочных схемах составляет единицы микрометров. Число слоев, наносимых последовательно при изготовлении тонкопленочной схемы, может доходить до 10—20. Ограничения, свойственные технологии тонкопленочных схем, заключаются в трудности изготовления катушек с индуктивностью более нескольких микрогенри и полупроводниковых приборов (диодов, транзисторов) с удовлетворительными характеристиками. По этой причине тонкопленочные схемы часто дополняются «навесными» деталями, образуя так называемые гибридные схемы. Таким образом, гибридная схема представляет собой сочетание тонкопленочной схемы, образующей пассивные элементы (резисторы, конденсаторы, соединительные проводники) с припаянными к ней активными элементами (транзисторы, полупроводниковые диоды).

Другой класс интегральных схем представляют полупроводниковые интегральные схемы. В них элементы выполняются не на поверхности изолирующей подкладки, а внутри, в толщине твердого полупроводникового материала.

Полупроводниковую интегральную схему часто называют «твердой схемой», подчеркивая тем самым, что в основе данного вида технологии лежит физика твердого тела.

Твердая схема представляет собой микросхему, элементы которой выполнены в объеме и на поверхности полупроводниковой подложки.

В зависимости от типа используемого полупроводникового материала твердые схемы делятся на кремниевые интегральные схемы, германиевые интегральные схемы и т. д.

Твердая схема создается в чистом кристалле этапами обработки, которая представляет собой «вмешательство» в строение и физические свойства, например диффузией примесей, создающих электронно-дырочные переходы, которые способны выполнять функции диодов, конденсаторов, транзисторов и т. д. Таким образом, внутри кусочка полупроводника образуется сверхминиатюрная схема, составленная из активных и пассивных элементов и способная выполнять ту или иную самостоятельную электрическую функцию.

Различают два вида твердых схем: *интегральные* и *функциональные,* или *молектронные.* В молектронных твердых схемах невозможно указать отдельные элементы (зоны), соответствующие эквивалентной принципиальной схеме. Работу такой твердой схемы можно оценить только по конечному результату и по функциям, исполняемым молекторной схемой. Функциональные компоненты не имеют физического подобия с общепринятыми цепями.

Техника твердых схем позволяет резко уменьшить размеры радиоэлектронной аппаратуры по сравнению с размерами аппаратуры на обычных полупроводниковых приборах. Малые размеры аппаратуры достигаются применением новых технологических достижений и интеграции, а не простым геометрическим уменьшением размеров уже существующих дискретных элементов.

Молектроника — сокращенное название молекулярной электроники. Открывается возможность методами молектроники выращивать «в колбе» схему усилителя, радиоприемника и других устройств по принципу, близкому к выращиванию кристалла из перенасыщенного раствора, причем в толще выращиваемого кристалла под специальным воздействием формируется та структура, которая позволяет кристаллу выполнять заданные функции усиления, приема и т. д.

Итак, микроминиатюризация открывает пути разрешения противоречия между потребностью в сложных радиоэлектронных устройствах с огромным количеством деталей, с одной стороны, и необходимостью надежной работы этих устройств при их небольших размерах и весах, с другой стороны. Нельзя, конечно, думать, что вся радиоаппаратура будущего окажется микроминиатюрной. Мощные передатчики или телевизионные трубки, естественно, не могут быть существенно сокращены в размерах.

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
Введение	3
Глава 1. **Понятие о радиосвязи**	4
Глава 2. **Звук и его преобразование**	9
Понятие о звуке	—
Преобразование звука в электрические колебания	10
Преобразование электрических колебаний в звук	13
Глава 3. **Колебательный контур**	15
Механические колебания	—
Электрические колебания	17
Незатухающие колебания в контуре	21
Основные характеристики колебательного контура	26
Настройка колебательного контура	30
Глава 4. **Фильтры**	34
Выделение переменной составляющей	35
Разделение нижних и верхних частот	38
Глава 5. **Антенны**	41
Понятие об антеннах	—
Понятие об электромагнитном поле и его излучении	42
Полуволновой вибратор	48
Направленные антенны	54
Антенны войсковых радиостанций	58
Глава 6. **Распространение радиоволн**	62
Природа электромагнитных волн	—
Как распространяются электромагнитные волны	66
Влияние атмосферы на распространение радиоволн	71
Глава 7. **Электронные и ионные приборы**	81
Двухэлектродная лампа	—
Трехэлектродная лампа	89
Четырехэлектродная лампа	99
Пятиэлектродная лампа	101
Комбинированные лампы	105
Понятие об ионных приборах	107
Электронно-лучевые трубки	110
Глава 8. **Выпрямители**	113
Кенотронный выпрямитель	—
Однополупериодный выпрямитель	114
Двухполупериодный выпрямитель	116
Полупроводниковые выпрямители	119

Стр.

Глава 9. **Радиопередающие устройства** 121

Общие сведения . . . . . —
Ламповый генератор 122
Усилитель мощности 125
Режимы работы лампового генератора 127
Умножение частоты 129
Схемы питания генераторов 131
Схемы генераторов 133
Стабилизация частоты 139
Схемы выходных каскадов 141
Управление колебаниями передатчика 143
Генераторы несинусоидальных колебаний 152

Глава 10. **Генераторы дециметровых и сантиметровых волн** 156

Клистрон 163
Лампа бегущей волны 166
Магнетрон 171
Платинотрон 177

Глава 11. **Радиоприемные устройства** 178

Общие сведения . . . . . —
Усилитель высокой частоты 182
Детектирование колебаний 186
Усилители низкой частоты 192
Приемники прямого усиления 203
Супергетеродинные приемники 212
Прием частотно-модулированных колебаний 220
Оптический индикатор настройки 224

Глава 12. **Полупроводниковые приборы** 228

Свойства полупроводников 229
Атомная структура германия 230
Валентные связи . . . . . —
Электронно-дырочный переход 238
Полупроводниковые диоды 245
Транзисторы 247
Схемы включения транзисторов 252
Характеристики и параметры транзисторов 256
Применение транзисторов 259
Миниатюризация радиоэлектронных устройств 267

Семен Николаевич Тихонов

РАДИОТЕХНИКА ДЛЯ НАЧИНАЮЩИХ

Редактор *С. М. Лайко*
Технический редактор *Г. Ф. Соколова*
Корректор *Л. Д. Сысоева*

Г-82689 Сдано в набор 26.4.76 Подписано к печати 5.8.76
Формат 60×90/16, печ. л. 17, усл. печ. л. 17, уч.-изд. л. 17,755
Тип. бумага № 2 Тираж 100 000 экз. Цена 73 коп.
Изд. № 6/1017 Зак. 566

Воениздат
103160, Москва, К-160
2-я типография Воениздата
191065, Ленинград, Д-65, Дворцовая пл., 10

Цена 73 коп.