

колебаний. Возникающие амплитудные изменения снимаются особыми «ограничителями», дополняющими схему рис. 414.

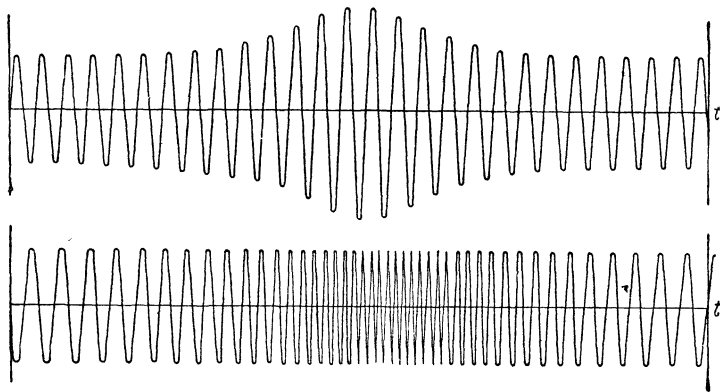


Рис. 415. Сопоставление амплитудной и частотной модуляций.

При частотной модуляции изменение несущей частоты происходит по закону

$$\frac{d\omega}{dt} = \omega + (\Delta\omega)_{\text{макс}} \cos \omega_{\text{ав}} t.$$

На рис. 415 сопоставлены амплитудно-модулированный сигнал (верхний график) и тот же сигнал частотно-модулированный (нижний график; изменения частоты представлены на нем преувеличенно).

§ 94. Прием, детектирование и усиление радиосигналов. Супергетеродины

Рассмотрим, как происходит прием радиосигналов. На значительных расстояниях от передающей радиостанции электрическое поле волн направлено при длинноволновой радиосвязи (§ 91) перпендикулярно к поверхности земли, магнитное поле ориентировано горизонтально. Если в таком поле волн вертикально расположен какой-либо проводник, то силовые линии магнитного поля волн, пересекая этот проводник, вызовут в проводнике электродвижущую силу. В случае синусоидальной электромагнитной волны в проводнике получится синусоидальная электродвижущая сила. Частота индуцированной электродвижущей силы будет равна частоте переменного тока, питающего излучающую систему передатчика.

Прием сигналов должен производиться иногда на расстояниях тысяч километров от излучающей системы. На таких расстояниях напряженность поля электромагнитной волны крайне мала.

Приемная радиоустановка состоит из ряда устройств, задачей которых является, во-первых, собственно прием электромагнитных волн выбранной радиостанции, затем усиление полученных сигналов и, наконец, их регистрация или же преобразование их в звуковые волны.

В сущности, приемные системы проводников («приемные антенны») ничем не отличаются от описанных в § 90 излучающих систем проводников. Имеется много типов приемных антенн, в том числе: замкнутая антенна (рамка), разомкнутая заземленная антенна, разомкнутая незаземленная антенна, а для ультракоротких волн метрового диапазона — полуволновой вибратор, петлевая антенна и др.

В качестве антенны, вообще, может быть использован любой проводник достаточных размеров; в любом проводнике радиоволна порождает электродвижущие силы. Часто пользуются в качестве антенны проводами электрического освещения, телефонной проводкой и т. д. Однако такие «суррогатные» антенны очень несовершенны.

Проводник приемной антенны следует располагать так, чтобы направление его совпадало с направлением электрических силовых линий поля волн и было перпендикулярно к силовым линиям магнитного поля волн. Для случая, когда волны с вертикальным направлением электрического поля принимаются на вертикально расположенный прямолинейный провод, легко рассчитать возникающую в антенне электродвижущую силу. Пусть напряженность электрического поля волн в месте приема равна E вольт на сантиметр. Так как направление провода совпадает с направлением электрического поля, то на каждый сантиметр длины антенны получается электродвижущая сила E вольт. Полная электродвижущая сила в антенне будет равна El , где l — длина (высота) вертикального провода (точнее, это так называемая «действующая», эффективная высота антенны).

Одна и та же приемная антенна может обычно служить для приема по выбору той или иной радиостанции; для этого необходимо иметь возможность «настроить» антенну на частоту передающей радиостанции. С указанной целью в провод антенны (рис. 416) включают колебательный контур, состоящий из емкости C и индуктивности L . Величина переменного тока, возбуждаемого электродвижущей силой антенны в колебательном контуре, будет наибольшей тогда, когда достигнуто (путем изменения C или L) совпадение резонансной частоты контура с частотой принимаемых волн.

«Настройка» приемной антенны на частоту принимаемых волн позволяет значительно увеличить напряжение, получаемое от антенны. Предположим, что мы принимаем отдаленную станцию, для которой E равно 10^{-6} в/см. В прямолинейной антенне высотой в 25 м получится электродвижущая сила не более $2,5 \cdot 10^{-3}$ в. При хорошем исполнении включенного в антенну колебательного

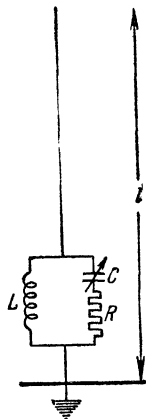


Рис. 416. Вертикальная приемная антенна с колебательным контуром для настройки.

контура его коэффициент усиления может быть равен 20—30. Таким образом, на катушке контура получится переменное напряжение 0,05—0,07 в.

При приеме метровых волн телевизионных передач (электрическое поле которых, как упоминалось в § 90, направлено горизонтально) для увеличения эффективности действия антенн (типа общеизвестных полуволновых вибраторов и петлевых) антенны оснащают так называемыми «пассивными элементами». Это — металлические трубки, расположенные в горизонтальной плоскости перпендикулярно, как и сама антенна, к лучу принимаемых волн; эти трубки, однако, в отличие от активной части антенны, изолированы от фидера,

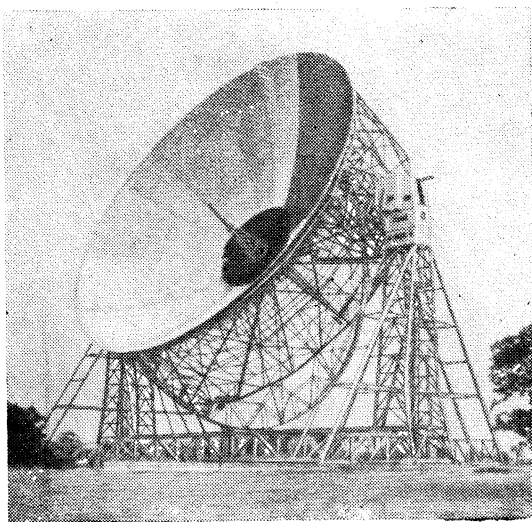


Рис. 417. Радиотелескоп.

передающего напряжение от антенны к телевизору. Пассивные элементы антенны излучают обратно всю воспринимаемую ими мощность. При правильно выбранных расстоянии между элементами антенны и их длине активная часть антенны оказывается расположенной в месте благоприятной интерференции волн, приходящих и излучаемых обратно ее пассивными элементами. Это существенно увеличивает электродвижущую силу, индуцируемую полем волн в активной части антенны.

По тому же принципу интерференционного усиления поля в месте расположения активной части антенны построены сложные антенны некоторых радиотелескопов (стр. 515). На рис. 417 изображена антенна одного из крупнейших радиотелескопов, построенного

в 1955 г. в Англии. Пассивные элементы этой антенны образуют параболическое «зеркало», в фокусе которого находится активная часть антенны. Диаметр «зеркала» 76 м; моторы вращают его вокруг горизонтальной оси; другая система моторов поворачивает все сооружение (весьящее с опорными башнями 1300 м) по рельсам вокруг вертикальной оси.

Напряжение высокой частоты, получающееся на катушке колебательного контура, включенного в антенну, подается на сетку электронно-лампового усилителя (рис. 418). В анодную цепь лампы включен в качестве нагрузки второй колебательный контур. Этот второй колебательный контур настраивается, как и первый, на частоту принимаемого сигнала.

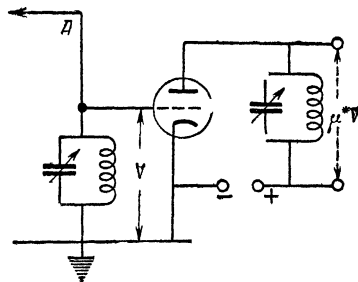


Рис. 418. Резонансный усилитель высокой частоты

Для электрических колебаний всех остальных частот, в достаточной мере отличающихся от собственной частоты резонансного контура, этот контур не представляет большого сопротивления (§ 83); для этих нерезонансных частот цепь анода лампы является как бы закороченной. Поэтому резонансный усилитель не только усиливает колебания той частоты, на которую он настроен, но в то же время и отфильтровывает все остальные колебания, индуцированные в приемной антенне другими радиостанциями.

Если коэффициент усиления лампы равен μ , то мы получим в анодной цепи лампы напряжение, в μ^* раз большее, чем то, которое подведено к сетке, где μ^* — коэффициент усиления каскада, равный [согласно формуле (14) § 53]

$$\mu^* = \frac{\mu}{1 + \frac{R_i}{R_{\text{рез}}}}$$

здесь $R_{\text{рез}}$ — сопротивление резонансного контура для усиливаемого высокочастотного тока, а R_i — внутреннее сопротивление лампы при выбранном режиме ее работы.

Во многих случаях бывает достаточно одной лампы усиления высокой частоты, тем более, что существуют типы приемных ламп, обладающие коэффициентом усиления μ порядка 1000; такие лампы позволяют получить усиление μ^* в одном каскаде 200—300, а при очень большом резонансном сопротивлении контура — даже еще больше. Нередко пользуются второй лампой для усиления напряжения, полученного в анодной цепи первой лампы, и т. д. Тогда общее усиление

$$\mu^* = \mu_{\text{рез. конт. антенны}} \mu^*_{1 \text{ каск}} \mu^*_{2 \text{ каск}} \dots$$

Но усилитель (и в особенности многокаскадный) может работать устойчиво только в том случае, если его анодные цепи хорошо экранированы от сеточных цепей и поэтому нет обратной связи (§ 92), которая способна превратить усилитель в генератор колебаний. При всех предосторожностях в выполнении монтажа всегда существует некоторая связь анодной цепи с сеточной цепью, создаваемая межэлектродной емкостью сетка — анод C_{ag} . Чем выше частота ω усиливаемых колебаний, тем сильнее сказывается наличие этой неустранимой обратной связи. Поэтому максимальное усиление, которое можно получить от усилителя в устойчивом режиме его работы, практически ограничивается пределом:

$$\mu_{\text{макс}} \approx \frac{1}{2} \sqrt{\frac{S}{\omega C_{ag}}}, \quad (16)$$

где $S \left(= \frac{\mu}{R_i} \right)$ — крутизна лампы в амперах на вольт, C_{ag} — емкость сетка — анод в фарадах и ω — частота усиливаемых колебаний в герцах.

Как показывает формула (16), даже при большой крутизне лампы, порядка 10 ма/в , для получения тысячекратного усиления высокочастотных колебаний ($\omega \approx 0,2 - 0,3 \text{ Мгц}$) емкость цепи сетка — анод не должна превышать $0,01 \text{ см}$; это достижимо только при высококачественной конструкции усилителя.

От усилителя высокой частоты требуется, чтобы он не только давал большое усиление, но имел также нужную *избирательность*, т. е. хорошо отфильтровывал колебания, возбужденные в приемнике «соседними» (по частоте) радиостанциями. Высокую избирательность нетрудно получить, улучшая параметры колебательных контуров (уменьшая их активное сопротивление) и увеличивая число каскадов резонансного усилителя. Однако получающаяся при этом в итоге очень острая резонансная кривая может явиться причиной искажения принимаемых модулированных колебаний. Усилитель с чрезмерной избирательностью усиливает должным образом только колебания несущей частоты и смежные с ними колебания боковых полос, образованных низкими звуковыми колебаниями (§ 93, рис. 411), но он не дает *р а в н о м е р н о г о* усиления всей боковой полосы модуляции, или, как говорят, «срезает» все более высокие звуковые колебания, применявшиеся при модуляции. Чрезмерная избирательность высококачественного усилителя, полученная за счет чрезмерной остроты итоговой резонансной кривой, сказывается в характерном занижении и обеднении всех звуков, воспроизводимых радиоприемником (приемник «басит», дает звук «как из бочки»). Для исправления этого недостатка в описанную схему резонансного усилителя вносят чрезвычайно существенное дополнение — *полосовые резонансные фильтры*. Такой фильтр получается, если сетку первой лампы подключить не к резонансному контуру антенны, а к тож-

дественному, но особому резонансному контуру, который *небольшой взаимной индуктивностью связан* с колебательным контуром антенны. Часто вместо индуктивной связи между двумя колебательными контурами полосового фильтра применяют емкостную связь, заземляя эти контуры через общий конденсатор в несколько тысяч (или десятков тысяч) сантиметров или же связывая верхние точки колебательных контуров конденсатором небольшой емкости в несколько сантиметров. Аналогично через полосовой фильтр осуществляют связь между анодным контуром и сеткой следующей лампы.

На рис. 419 представлены схемы полосовых фильтров, а на рис. 420 сопоставлены резонансные кривые усилителя высокой частоты без полосовых фильтров и с полосовыми фильтрами. Понятно, что параметры колебательных контуров фильтра и связи между этими контурами выбирают так, чтобы полоса равномерно усиливаемых частот охватывала весь спектр принимаемых модулированных колебаний.

При использовании многокаскадных усилителей слабые переменные токи могут быть усилены в такой мере, что обнаруживается атомистическая природа термоэлектронной эмиссии. Неизбежные случайные *флуктуационные колебания* числа электронов, покидающих катод в какой-либо данный малый промежуток времени, проявляются как колебания величины тока, которые после многократного усиления в нескольких каскадах приводят к появлению в телефоне особого рода шумов. Это явление называют *дробовым эффектом* [*шрот-эффектом*¹⁾]. Исчерпывающая теория этого явления была разработана Шоттки в 1922 г.

Отрыв от поверхности катода отдельных атомов, влияя на работу выхода электронов, создает еще большие пульсации термоэлектронного тока, чем наблюдаемые в шрот-эффекте. Это явление, исследованное в 1925 г. Джонсоном, носит название *фликкер-эффекта*²⁾.

Шрот-эффект и, в особенности, фликкер-эффект ограничивают возможное усиление слабых переменных токов, так как при уве-

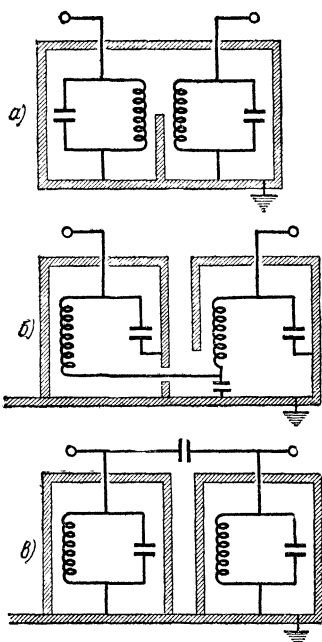


Рис. 419. Полосовые фильтры с индуктивной (а) и емкостной (б, в) связью, помещенные в металлические экраны.

1) От нем. Schrot—дробь.

2) От англ. flicker—дрожать, колебаться.

личении числа каскадов усилителя быстро возрастает шум, производимый лампами первых звеньев усилителя.

Как уже упоминалось в связи с пояснением формулы (16), для устойчивой работы усилителя высокой частоты важно, чтобы емкость между цепью анода и управляющей сеткой в каждом каскаде усилителя была весьма мала. (В противном случае часть напряжения высокочастотных колебаний из цепи анода окажется поданной через эту емкость обратно на сетку, и будет происходить самовозбуждение колебательного контура, как в генераторной схеме Мейснера.) Обычно в усилителях высокой частоты применяют экранированные лампы с противодинаatronной сеткой — пентоды (§ 56), в которых емкость между анодом и управляющей сеткой понижена до тысячных долей сантиметра.

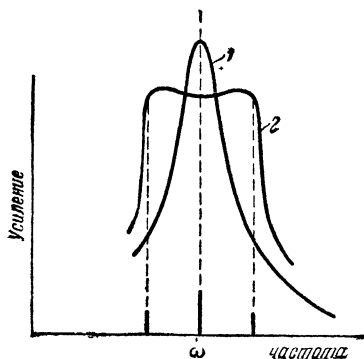


Рис. 420. Резонансные кривые высокочастотного усилителя: с одинарными колебательными контурами (1) и с полосовыми фильтрами (2).

Для устранения емкостных и индуктивных обратных связей между анодными и сеточными цепями резонансные контуры в высокочастотных усилителях помещают в металлические экраны, все подводящие провода делают возможно более короткими и располагают их так, чтобы индуктивность и емкость проводов анодной цепи по отношению к сеточной цепи были возможно меньшими.

Радиоприемная установка, подобная той, которая изображена на рис. 418, воспроизводит в уменьшенном масштабе все происходящее в антенне отправительной станции изменения амплитуды высокочастотных колебаний. На этом основан главный принцип радиосвязи (применяемый теперь и в связи по проводам): использование высокочастотных (несущих) колебаний для передачи низкочастотных (звуковых) колебаний. Посредством микрофона, преобразующего звуковые колебания воздуха без изменения частоты в электрические колебания (§ 95), в антенне отправительной станции вызываются происходящие со звуковой частотой колебания амплитуды высокочастотного тока, модулируют звуком высокочастотный ток (§ 93).

В приемной антенне будут воспроизводиться изменения тока в антенне излучающей. Таким образом, в приемной антенне также получается модулированный ток. Дальнейшей задачей является преобразование этого тока в ток звуковой частоты с тем, чтобы подать его в телефон или после соответствующего усиления низкой частоты — в громкоговоритель или автомат записи колебаний.

В приемной антенне будут воспроизводиться изменения тока в антенне излучающей. Таким образом, в приемной антенне также получается модулированный ток. Дальнейшей задачей является преобразование этого тока в ток звуковой частоты с тем, чтобы подать его в телефон или после соответствующего усиления низкой частоты — в громкоговоритель или автомат записи колебаний.

Для преобразования модулированного высокочастотного тока в ток звуковой частоты применяют так называемые *детекторы*. Простейшим (внешне) детектором является контакт металлического острия с некоторыми кристаллами (с галенитом PbS , пиритом FeS_2 , цинкитом ZnO и др.). Лучшие результаты дает применение ламповых детекторов. Общим свойством детекторов является односторонняя проводимость. Детектор выпрямляет высокочастотный ток.

В отличие от невыпрямленных модулированных высокочастотных колебаний (которые, как было пояснено в предыдущем

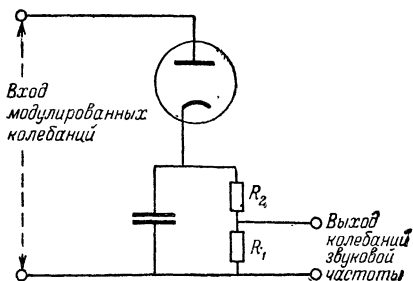


Рис. 421. Диодный детектор.

параграфе, не представляют собой просто суммы высокочастотных и низкочастотных колебаний, а слагаются из трех гармонических колебаний с относительно близкими частотами ω , $\omega + \omega_{зв}$ и $\omega - \omega_{зв}$) выпрямленные модулированные колебания являются сочетанием од-

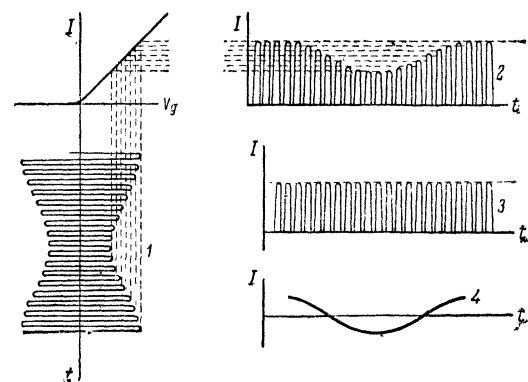


Рис. 422. Диодное детектирование. 1 — модулированный ток высокой частоты, 2 — выпрямленный ток, 3 и 4 — расчленение модулированных высокочастотных пульсаций на высокочастотные пульсации постоянной интенсивности и переменный ток звуковой частоты.

носторонних высокочастотных пульсаций постоянной интенсивности и колебаний звуковой частоты (рис. 422). Таким образом, выпрямление модулированных колебаний приводит к их *демодуляции*, т. е. к фактическому расчленению модулированных колебаний на те колебания (теперь выпрямленные), которые были использованы передающей радиостанцией в качестве несущих, и те колебания, которыми производилась модуляция. Поэтому после детектора для полного разъединения этих колебаний достаточно создать две цепи такие, чтобы одна из них была легко проходимой для высокочастотных токов (это — конденсатор), а другая была бы пригодна для токов звуковой частоты.

В ламповых радиовещательных приемниках для детектирования применяют двухэлектродные лампы — диоды, а также и многоэлек-

тродные лампы (триоды и пентоды). На рис. 421 показана схема *диодного детектора*, а на рис. 422 дан график колебаний, подводимых к диоду и получающихся в цепи диода. Высокочастотные пульсации тока замыкаются через конденсатор емкостью порядка 50 см. Такой конденсатор при приеме волн 200—2000 м оказывает высокочастотным колебаниям сопротивление в несколько тысяч омов. Для токов звуковой частоты его емкостное сопротивление составляет миллионы омов, и поэтому эти токи проходят преимущественно через цепь $R_1 + R_2$, имеющую сопротивление 200—400 тыс. омов. Напряжение, создаваемое токами звуковой частоты на сопротивлении

R_1 , подается к усилителю низкой частоты. Сопротивление R_2 (порядка 50—100 тыс. омов) преграждает путь к усилителю низкой частоты для высокочастотных колебаний.

Если диодный детектор подключить (конечно, через разделительный конденсатор) к аноду последней лампы высокочастотного усилителя, имеющей в качестве анодной нагрузки резонансный контур, то этот резонансный контур окажется, очевидно, зашунтированным небольшим внутренним сопротивлением диода и большая часть усиления и избирательности будет потеряна.

Поэтому последний резонансный контур высокочастотного усилителя, диод и нагрузку диода включают не параллельно, а последовательно или же последний каскад высокочастотного усилителя делают «широкополосным» (на высокочастотных дросселях) и подводят к диоду часть напряжения от дроссельного потенциометра (рис. 423).

Диодное детектирование в сравнении с другими схемами обеспечивает наименее искаженное воспроизведение звуковых колебаний, но к диоду должны подводиться уже значительно усиленные колебания (до 1—2 в). Когда необходимо детектировать слабые сигналы, их подают на сетку триода (или пентода) и при этом ставят лампу в такой режим работы, чтобы выпрямление колебаний происходило вследствие односторонней проводимости участка лампы сетка — катод (*сеточное детектирование*). При положительных потенциалах сетки через нее проходит небольшой сеточный ток. У начала кривой, выражающей зависимость этого сеточного тока от потенциала сетки, и выбирают рабочую точку. У многих ламп для этой точки характеристика анодного тока прямолинейна (рис. 424), что позволяет совместить детектирование в цепи сетки с усилением в той же лампе выделенных звуковых колебаний (а также и ставших ненужными высокочастотных пульсаций, которые из анодной цепи лампы отво-

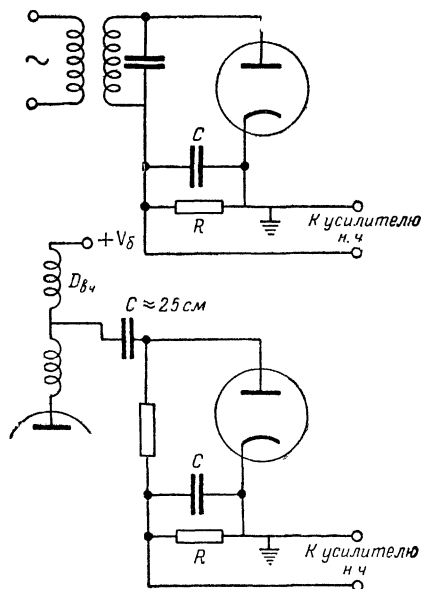


Рис. 423. Схемы присоединения диодного детектора к резонансному высокочастотному усилителю (верхний рисунок) и к широкополосному усилителю на высокочастотных дросселях (нижний рисунок).

дятся в землю через конденсатор C . Заметим, что сопротивление R_g , по которому проходит ток сетки, что и поддерживает на сетке отрицательный потенциал, часто подключают параллельно конденсатору C_g (тогда цепь сетки замыкается на землю через индуктивную катушку резонансного контура на входе к детектору).

При приеме частотно-модулированных колебаний для детектирования применяют два ламповых диода или, чаще, два кристаллических детектора (на рис. 425 D_1 и D_2). Их включают в два симметричных плеча резонансного контура II , который настраивают, так же как и контур I , подводящий частотно-модулированные колебания,

на основную частоту колебаний ω_0 . Связь между контурами I и II устанавливают через высокочастотный трансформатор (который называют *фазосдвигающим*) и дополнительно через конденсатор $C_{св}$, имеющий емкость порядка 10—50 см. На схеме рис. 425 сопротивления R_1 и R_2 представляют собой нагрузочные сопротивления

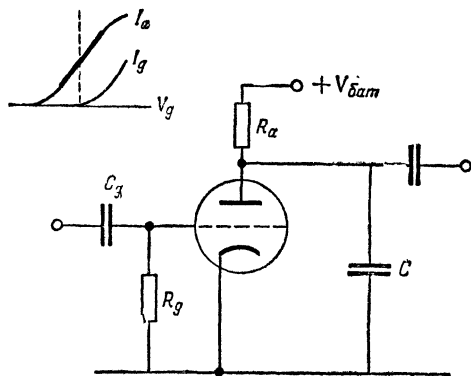


Рис. 424. Схема сеточного детектирования.

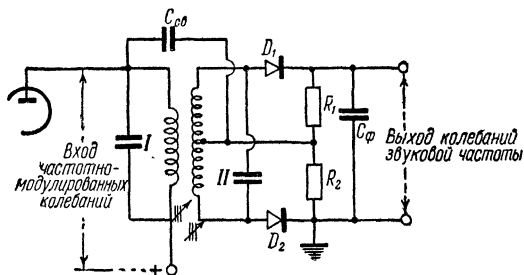


Рис. 425. Детектор частотно-модулированных колебаний (дискриминатор).

диодов ($R_1 = R_2 \approx 50\,000 - 100\,000$ ом), а $C_{ф}$ — конденсатор (емкостью порядка 500—1000 см), замыкающий цепь для высокочастотных колебаний — отфильтровывающий их перед входом в усилитель звуковых колебаний. Вследствие симметричного включения диодов токи через них для основной частоты ω_0 взаимно компенсируются, но для всех остальных частот ω эта компенсация уже не имеет места, и на выходе создаются колебания с амплитудой, пропорциональной

$\left| \frac{\omega - \omega_0}{\omega} \right|$, т. е. колебания, воспроизводящие те звуковые колебания, которыми была частотно модулирована несущая частота¹⁾).

Усилитель низкой частоты должен усиливать напряжение одинаково для всех звуковых частот (в противном случае он внесет искажения в радиоприем, подчеркивая одни звуки и заглушая другие). В связи с этим устройство усилителя низкой частоты существенно отличается от устройства описанного выше усилителя высокой частоты.

Очевидно, что усилитель резонансного типа здесь неприменим. Вместо резонансного контура в цепь анода усилительной лампы включают омическое сопротивление или трансформатор.

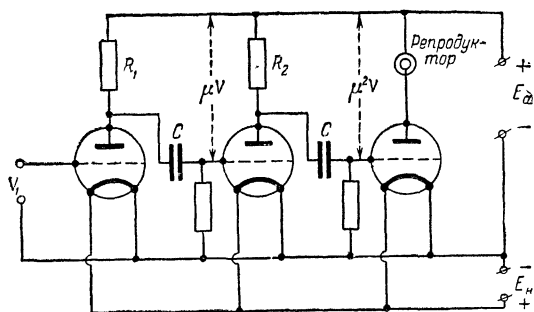


Рис. 426. Двухкаскадный усилитель низкой частоты на сопротивлениях

На рис. 426 дана схема *усилителя на сопротивлениях*. Здесь на сетку последующей лампы подается переменное напряжение звуковой частоты из анодной цепи предыдущей лампы. Конденсатор C служит для того, чтобы оградить сетку лампы от постоянного положительного напряжения цепи анода. Емкость его выбирается так, чтобы сопротивление его для токов звуковой частоты было незначительным. Но при слишком больших значениях емкости этого переходного конденсатора («конденсатора связи») и при больших

¹⁾ В супергетеродинных приемниках, принцип действия которых пояснен далее, частотный детектор помещают вслед за каскадами усиления промежуточной частоты и за так называемым ограничителем—лампой, которая поставлена в такой режим, что она выравнивает амплитуды для колебаний всех частот, освобождая, таким образом, частотно-модулированные колебания от амплитудной модуляции, вносимой действием помех; в данном случае промежуточная частота и является основной (ω_0), на которую настраивают контуры I и II .

Вместо описанной схемы, получившей название *дискриминатора* (от лат. *discriminato*—разделяющий), нередко применяют другие, например *дробный детектор*, в котором один из диодов включен катодом к обмотке II и иначе распределены нагрузки диодов.

величинах сопротивления R в цепи сетки стекание зарядов, подводимых к сетке, происходит медленно, что может повлечь за собой перерывы в работе усилителя и вызвать самовозбуждение колебаний («прерывистую генерацию»). Поэтому величины C и R должны быть согласованы; в высококачественных усилителях низкой частоты обычно берут: при сопротивлении в цепи сетки $R=1\ 000\ 000$ ом емкость конденсатора связи $C=25\ 000$ см; при $R=250\ 000$ ом $C=100\ 000$ см (т. е. 0,1 мкф); при $R=100\ 000$ ом $C=0,25$ мкф.

Схема усилителя на трансформаторах дана на рис. 427. Она не требует пояснений; заметим только, что в данном случае применяются трансформаторы с железным сердечником, чтобы обеспечить максимальную связь первичной обмотки трансформатора со вторичной.

Чтобы получить наибольшую отдачу на протяжении усиливаемых колебаний, во всех каскадах высокочастотного и низкочастотного усилителя (кроме выходного каскада) применяют большие анодные нагрузки, превышающие в два — четыре раза внутреннее сопротивление триода.

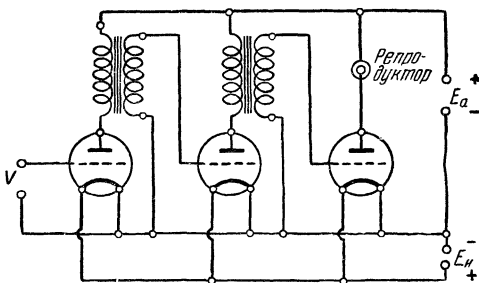


Рис. 427. Двухкаскадный трансформаторный усилитель низкой частоты.

От выходного каскада требуется получить наибольшую отдачу мощности усиленных колебаний; поэтому анодная нагрузка выходной лампы выбирается такой, чтобы получить максимальную не искаженную мощность.

Наиболее прямолинейный участок динамической характеристики лампы получается обычно при некотором отрицательном потенциале сетки. Этот отрицательный по отношению к катоду потенциал сетки часто создают, включая между катодом и землей сопротивление R_k такое, чтобы проходящий через него постоянный ток I_a создавал на катоде положительный потенциал, численно равный нужному значению $V_g = I_a R_k$, что равносильно отрицательному потенциалу сетки V_g при заземленном катоде. Чтобы это автоматическое смещение потенциала сетки не изменялось колебаниями тока, катодное сопротивление R_k шунтируют конденсаторами достаточно большой емкости (при усилении низких частот — десятки микрофард).

Анодный ток выходной лампы значителен (40—70 ма) и вызывает сильное намагничивание сердечника выходного трансформатора, что приводит к некоторому искажению трансформируемых колебаний; чтобы устранить это бесполое намагничивание сердечника, вызываемое постоянной составляющей анодного тока, в высококачественных приемниках обычно применяют так называемую

пушпульную схему выходного каскада (рис. 428). В этой схеме используются две одинаковые выходные лампы (триоды или лучевые тетроды) и питающие их токи подводятся к средней точке первичной обмотки выходного трансформатора, что создает противоположные по направлению и взаимно компенсирующие намагничивания сердечника. Чтобы колебания тока при этом не были направлены противоположно и чтобы их намагничивающее действие взаимно не уничтожалось, фазы колебаний, подводимых к выходным лампам, должны быть сдвинуты на 180° . Это может быть достигнуто подачей колебаний на сетки выходных ламп от входного трансформатора с заземленной средней точкой вторичной обмотки, как показано на рис. 428.

Трансформаторы не обеспечивают равномерного усиления звуковых колебаний различных частот, так как их индуктивное сопротивление зависит от частоты тока, и, кроме того, неблагоприятно сказывается электроемкость, созда-

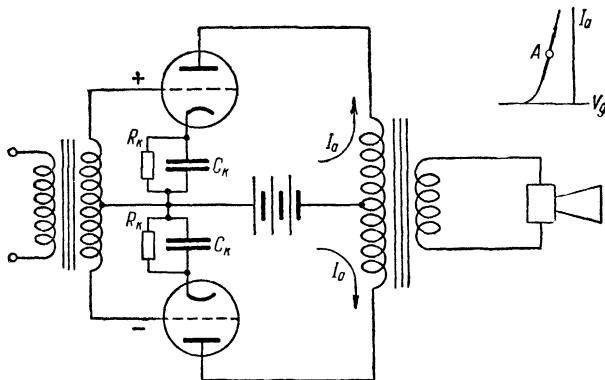


Рис. 428. Пушпульный выходной каскад с автоматическим смещением потенциала сеток (когда у первой лампы $\Delta V_g > 0$ и $\Delta I_a > 0$, то в этот момент времени у второй лампы $\Delta V_g < 0$ и $\Delta I_a < 0$; но ток второй лампы проходит через первичную обмотку выходного трансформатора в обратном направлении, и поэтому индуцирующие действия указанных изменений тока складываются).

ваемая витками обмотки. Поэтому в настоящее время в качестве предоконечного каскада часто применяют *фазоинверторы на сопротивлениях*. Инверсия, т. е. сдвиг фазы колебаний на 180° , происходит, как уже было пояснено (§ 53), в усилительной лампе, имеющей активную анодную нагрузку: увеличение положительного потенциала сетки вызывает увеличение анодного тока и увеличение напряжения, падающего на нагрузке, а стало быть, и уменьшение напряжения на аноде лампы. Если усиление в предоконечном каскаде равно μ^* , то, взяв от потенциометра, подключенного к анодной цепи предоконечного каскада, $1/\mu^*$ усиленного напряжения и подав его к сетке второй такой же предоконечной лампы, мы получим в анодной цепи этой лампы колебания, противоположные по фазе тем, которые происходят в анодной цепи первой предоконечной лампы, и равные им по интенсивности. Указанные колебания от второй предоконечной лампы подают к сетке второй лампы пушпульного выходного каскада (рис. 429). Обе предоконечные лампы часто объединяют в одном баллоне (*двойные триоды*).

Правильно сочетав усилитель высокой частоты, детекторный каскад и усилитель низкой частоты, мы получим приемник *прямого усиления*. При сочетании

этих частей приемника, которое осуществляется через конденсаторы или трансформаторы, возникают некоторые трудности. Так, могут обнаружиться паразитические обратные связи, делающие работу приемника неустойчивой, вызывающие самовозбуждение высокочастотных или низкочастотных колебаний; может также возникнуть «фон»—шум, создаваемый плохо сглаженными пульсациями переменного тока, при питании приемника от осветительной сети через «силовую» трансформатор и кенотрон. Для устранения обратных связей применяют *развязывающие фильтры* и для устранения фона—*сглаживающие фильтры*. И те и другие состоят из сопротивлений (активных и индуктивных) и конденсаторов, которые перед этими сопротивлениями отводят путь для нежелательных колебаний к земле.

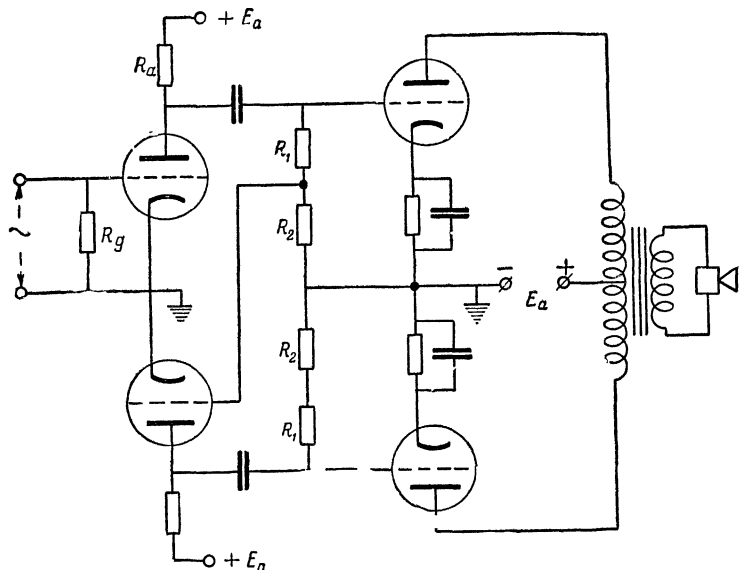


Рис 429. Фазоинвертор и пушпульный выходной каскад.

Кроме того, при сочетании частей приемника, как и отдельных каскадов усилителей, может сильно сказаться шунтирующее действие всей последующей части приемника на работу предыдущей части.

Изыскание наиболее целесообразных способов сочетания основных частей и каскадов приемника и наилучших фильтров привело к большому разнообразию применяемых схем, преимущества и недостатки которых анализируются в специальных курсах радиотехники.

Ограничиваясь здесь упоминанием только принципиальных, важнейших особенностей применяемых на практике схем, отметим, что часто в приемниках преднамеренно создают обратные связи. Обратную связь, но не настолько сильную, чтобы она привела к самовозбуждению (§ 92), нередко применяют для увеличения усиления высокочастотных колебаний (попутно получают и улучшение избирательности). Такое вспомогательное усиление, создаваемое умеренной подачей части напряжения уже усиленных сигналов обратно к сетке той же лампы или одной из предыдущих ламп, называют *регенерацией колебаний*, а приемники, где этот метод используется,—*регенеративными приемниками* или «*приемниками с положительной обратной связью*».

При определенном соотношении фаз колебаний в двух цепях усилителя, разделенных лампами, обратная связь между этими цепями приводит не к усилению, а к ослаблению сигналов; ее называют тогда *отрицательной обратной связью*. Преднамеренно созданные отрицательные обратные связи широко используют в современных приемниках для подавления положительных связей, для снижения фона и для регулирования «частотной характеристики» приемника (т. е. относительной величины усиления звуковых колебаний различной частоты).

Положительная обратная связь, приводящая к самовозбуждению колебаний, используется во вспомогательных генераторах колебаний—в *гетеродинах*, которые составляют существенную часть наиболее распространенного типа современных приемников—*супергетеродинных приемников*, или, как их называют сокращенно, «суперов». Резонансные контуры гетеродина настраиваются (поворотом общей оси всех переменных конденсаторов в приемнике) так, что при приеме антенным контуром колебаний любой несущей частоты гетеродин генери-



Рис. 430. Блок-схема супергетеродинного приемника.

рует колебания, частота которых ω' отличается от частоты принимаемых колебаний ω всегда (т. е. для всех принимаемых волн) на одну и ту же величину, которую называют промежуточной частотой $\omega_{\text{пр}}$:

$$\omega_{\text{пр}} = |\omega' - \omega| = \text{const}$$

Колебания несущей частоты принимаемой радиостанции из усилителя высокой частоты подаются к детектору и к тому же детектору подводятся колебания, созданные гетеродином. В этом детекторе (его называют «первым», так как имеется еще второй) происходит смещение колебаний, приводящее к преобразованию частоты. А именно, как и при модулировании колебаний, образуются колебания с комбинационными частотами: разностной ($\omega' - \omega = \omega_{\text{пр}}$) и суммарной ($\omega' + \omega$). Колебания с повышенной частотой отфильтровывают, а колебания с разностной частотой, т. е. с одинаковой для всех принимаемых радиостанций промежуточной частотой $\omega_{\text{пр}}$, усиливают в *усилителе промежуточной частоты*. Эти колебания промежуточной частоты при смещении колебаний получают модулированными, причем их модуляция воспроизводит модуляцию принимаемых радиосигналов. Для выделения колебаний звуковой частоты применяют диодное детектирование («второй» детектор) и затем, как и в других приемниках, усиливают полученные колебания звуковой частоты (рис. 430).

Таким образом, главным отличием супера от приемника прямого усиления является преобразование частоты колебаний, происходящее в *первом детекторе*, или, как его иначе называют, в *смесителе колебаний*.

Криволинейная характеристика тока через детектор приближенно определяется уравнением параболы

$$I \approx aV + bV^2.$$

Когда к детектору подведены принимаемые колебания с несущей частотой ω :

$$V = V_0 \cos \omega t,$$

то одновременно с детектированием этих колебаний происходит (вследствие перемещений рабочей точки по криволинейной характеристике) изменение проводимости детектора:

$$\text{проводимость детектора} = \frac{I}{V} \approx a + bV.$$

Подавая к тому же детектору одновременно колебания другой частоты (от гетеродина)

$$V' = V'_0 \cos \omega' t,$$

мы получим колебания тока, равные проводимости детектора, умноженной на напряжение V' , т. е.

$$\begin{aligned} I' &= (a + bV) V' = bV'_0 \cos \omega' t + bV_0 V'_0 \cos \omega t \cdot \cos \omega' t = \\ &= aV'_0 \cos \omega' t + \frac{b}{2} V_0 V'_0 [\cos (\omega' - \omega) t + \cos (\omega' + \omega) t] \end{aligned}$$

Мы видим, таким образом, что ток через детектор, к которому одновременно подведены колебания с частотами ω и ω' , представляет собой сумму трех гармонических колебаний тока, причем колебания с важной для супергетеродинного приема разностной частотой происходят по закону

$$I_{\text{пр}} = \frac{b}{2} V_0 V'_0 \cos \omega_{\text{пр}} t \quad (17)$$

Следовательно, во-первых, амплитуда этих колебаний (при неизменности амплитуды колебаний, создаваемых гетеродином, $V_0 = \text{const}$) пропорциональна амплитуде колебаний несущей частоты, т. е. *колебания промежуточной частоты воспроизводят модуляцию принимаемых сигналов*. Во-вторых, *колебания промежуточной частоты получаются усиленными, и усиление это пропорционально амплитуде колебаний, генерируемых гетеродином*. Поэтому в суперах иногда и не делают усилителей высокой частоты.

В приемниках ультравысоких частот смесителем служит триод. Для приема сантиметровых волн пока единственно пригодным смесителем является кристаллический детектор (так как, применяя его, можно добиться наименьшей межэлектродной емкости). В радиовещательных приемниках для смещения колебаний применяются особые семиэлектродные (пятисеточные) лампы—*пентагриды* (их иначе называют «смесителями») и *гелтоды* (их называют «преобразователями»).

На рис. 431 приведена схема использования пентагрида как смесителя колебаний. Здесь 1—управляющая сетка триода, к ней подводятся колебания несущей частоты из антенного контура (или из усилителя высокой частоты); 2—сетка—анод триода, экранирующая триод от пентода; 3—управляющая сетка пентода, к ней от анода гетеродина подводятся колебания, создаваемые гетеродином; 4—экранирующая сетка пентода; на сетки 2 и 4 подается положительное напряжение, а возникающие в их цепи колебания отводятся через конденсатор в землю; 5—противодинатронная сетка, присоединяется к катоду. Возникающие в цепи анода пентагрида модулированные колебания промежуточной частоты подводятся к резонансному усилителю на полосовых фильтрах.

В этой схеме гетеродином служит триод. Переменный конденсатор его сеточного резонансного контура насажен на одну ось с настроенными конденсаторами антенного полосового фильтра, причем дополнительных («подстроечными») конденсаторами при налаживании супера создается выбранная разность резонансных частот антенного контура и контура гетеродина.

Лампы—преобразователи частоты (гептоды)—представляют собой сочетание смесителя колебаний с триодом гетеродина в одном баллоне.

Суперы имеют несколько больший уровень шумов, чем приемники прямого усиления, и при приеме длинных и средних волн уступают последним в качестве воспроизведения звука. Но приемники прямого усиления не дают нужного усиления коротких волн. Поэтому современные приемники прямого уси-

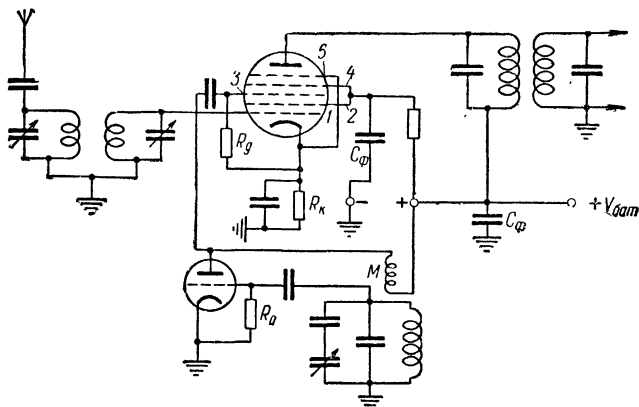


Рис. 431. Схема использования пентагрида как смесителя колебаний несущей частоты и колебаний, генерируемых гетеродином (M — индуктивная обратная связь анодного и сеточного контуров гетеродина, C_Φ — конденсаторы фильтров).

ления делают с устройством (*конвертором*), которое подключают при приеме коротких волн и которое, выполняя роль преобразователя частоты, превращает приемник (для диапазона коротких волн) в супер.

Следует отметить, что наряду с усовершенствованием многоэлектродных радиоламп в последнее время достигнуты значительные успехи в разработке

малогабаритных полупроводниковых усилителей тока. Сопротивление контакта металлического острья и полупроводникового кристалла зависит от напряженности электрического поля в поверхностном слое полупроводника. Это позволило создать *полупроводниковые кристаллические триоды (транзисторы)*. Поверхность кристалла германия контактирует с двумя проволочками из фосфористой бронзы, острия которых сближены до нескольких десятков микронов. К одной из этих проволок, которую называют *эмиттером* (на рис. 432 проволока \mathcal{E}), подводят усиливаемое напряжение и сообщают этой проволоке положительный потенциал в несколько вольт. Изменения тока, который проходит от эмиттера через кристалл к металлическому держателю M , вызывают ритмичные изменения сопротивления кристалла со второй проволокой K , которую называют *коллектором*. Коллектору сообщают отрицательный потенциал в несколько десятков вольт через сопротивление R , играющее роль нагрузки обычно

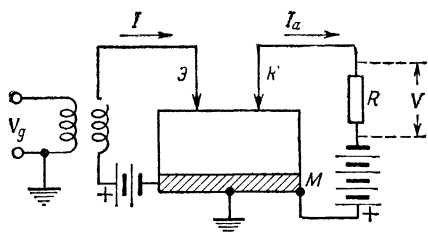


Рис. 432. Схема использования кристаллического триода для усиления колебаний.

волокна \mathcal{E}), подводят усиливаемое напряжение и сообщают этой проволоке положительный потенциал в несколько вольт. Изменения тока, который проходит от эмиттера через кристалл к металлическому держателю M , вызывают ритмичные изменения сопротивления кристалла со второй проволокой K , которую называют *коллектором*. Коллектору сообщают отрицательный потенциал в несколько десятков вольт через сопротивление R , играющее роль нагрузки обычно

го усилителя. Вследствие униполярной проводимости контакта полупроводника германия с острыми проволоком (§ 36) сопротивление контакта противоположному по направлению току в коллекторе в сотни раз больше, чем току в эмиттере. Поэтому пропорциональные изменения этого сопротивления, вызываемые пульсациями тока в эмиттере, приводят к значительным колебаниям напряжения на нагрузке R . Коэффициент усиления достигает 150—200.

Крохотные (размером в несколько миллиметров) кристаллические диоды и триоды (с точечным контактом и «плоскостные») с каждым годом все шире используются в радиоаппаратуре, в особенности в радиоприемниках ультракоротких волн. Чем выше частота принимаемых сигналов, тем вреднее сказывается межэлектродная емкость ламп, шунтирующая электрические цепи ламповых усилителей; в кристаллических триодах, заделанных в пластмассу с проволочными выводами электродов, межэлектродная емкость ничтожна. Для изготов-

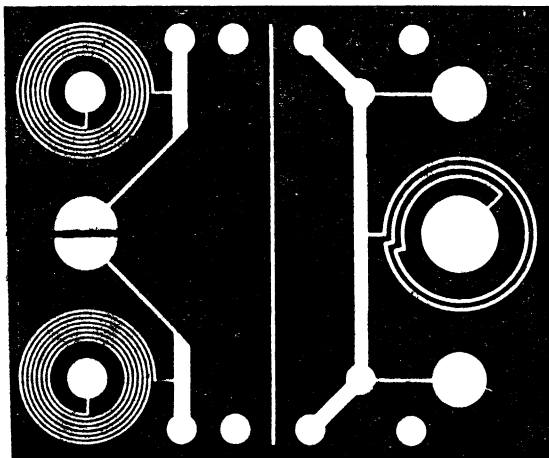


Рис. 433. Лист печатной схемы радиоприемника.

ления миниатюрных радиоприемников (например таких, какими снабжают головки управляемых по радио реактивных снарядов) весьма существенным достоинством кристаллических триодов является также то, что устраняется потребление тока, расходуемого на накал ламп. Кроме того, кристаллические триоды не выходят из строя вследствие тряски и механических вибраций.

Крупным достижением на пути к резкому снижению размеров радиоприемников и к удешевлению их производства оказалось применение так называемых *печатных схем*. Провода, соединяющие элементы и узлы радиоприемника, заменяются в печатных схемах узкими полосками из электропроводного вещества, нанесенного тонким слоем на пластину изолятора¹⁾. Две такие параллельные полоски служат конденсатором небольшой емкости. Многослойные конденсаторы большой емкости вштамповывают в пластину изолятора. Катушки коротковолнового диапазона заменяют длинной электропроводной полоской, нанесенной на изолятор в виде тесной спирали, внутренний конец которой выводят на противоположную сторону пластины или ответвляют ее по той же стороне поверх слоя изолирующего лака. На рис. 433 показан один из листов печатной схемы со спиральными коротковолновыми катушками.

¹⁾ Полоска из медной фольги толщиной в 0,04 мм при ширине в 1 мм может пропускать ток (в пределах допустимого нагревания) около 5 а.

Применение печатных схем сводит до минимума самую трудоемкую часть производства радиоприемников—их монтаж. Кроме того, достигается предельная компактность аппаратуры и улучшается ее качество (так как индуктивность и емкость соединительных цепей в этом случае могут быть заранее строго рассчитаны и устраняются неизбежные неточности монтажа).

§ 95. Преобразование звуковых колебаний в электрические и электрических в звуковые. Электрозались и воспроизведение звука

Приборы, предназначенные для преобразования звуковых колебаний в электрические, называют *микрофонами*. С электроакустической точки зрения работа микрофона характеризуется *коэффициентом преобразования*, который представляет собой отношение развиваемых микрофоном колебаний напряжения к избыточному звуковому давлению в доходящей до микрофона звуковой волне:

$$k_m = \frac{\Delta V}{\Delta P}.$$

Чтобы микрофон не вносил в передачу искажений, его коэффициент преобразования должен оставаться постоянным в широком диапазоне звуковых частот (практически в пределах от 50 до 10 000 *гц*) и, кроме того, коэффициент преобразования должен быть одинаковым для всех амплитуд звука. Важна также абсолютная величина этого коэффициента: очевидно, что чем эта величина больше, тем микрофон чувствительнее.

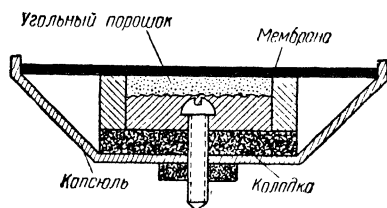


Рис. 434. Схема устройства телефонного микрофона.

подвешенный в магнитном поле проводник, создавая на его зажимах переменную электродвижущую силу.

Типичным представителем *угольных микрофонов* является обычный телефонный микрофон (рис. 434), в котором приемным органом является мембрана, зажатая по краям в капсуле. Против мембраны (позади нее) расположена угольная колодка, а промежуток между мембраной и колодкой заполнен угольным порошком. Микрофон включается в цепь источника тока (местного или центрального), причем колебания мембраны в звуковом поле подвергают порошок периодически меняющемуся давлению; вследствие этого меняются сопротивление микрофона и величина протекающего через микрофон тока. Для высококачественной передачи обычный телефонный микрофон непригоден: во-первых, резонансные свойства мембраны делают частотную характеристику такого микрофона очень неровной (рис. 435), вследствие чего микрофон искажает тембр звуков; во-вторых, такой микрофон вносит довольно значительные так называемые *нелинейные искажения*, заключающиеся в возникновении новых—«комбинационных колебаний», что делает звук хриплым и (при сильных искажениях) дребезжащим.

В радиопередаче применяют гораздо более совершенный микрофон Рейсса, в котором мембрана отсутствует и звуковые волны непосредственно действуют