

§ 146. Принципы радиосвязи

1. Всякий провод, по которому течет переменный ток, излучает электромагнитные волны. Однако если ток замкнут и выполнено условие квазистационарности, то *излучения практически не будет*. Действительно, разобьем провод на элементы тока $\mathcal{I} dl$. Каждый из этих элементов излучает, как точечный диполь, производная дипольного момента которого по времени определяется выражением $d\dot{\mathbf{p}} = \mathcal{I} dl$. Если выполнено условие квазистационарности, то все эти дипольные моменты колеблются почти в одинаковых фазах, а потому при рассмотрении поля в волновой зоне (а только такое поле и представляет интерес в вопросах радиосвязи) все их можно считать как бы сосредоточенными в одной точке. Следовательно, весь виток с током будет излучать, как точечный диполь, для которого $\dot{\mathbf{p}} = \oint d\dot{\mathbf{p}} = \oint \mathcal{I} dl$. В случае квазистационарных токов величина \mathcal{I} одна и та же вдоль всего витка, а потому $\dot{\mathbf{p}} = \mathcal{I} \oint dl = 0$, так как для всякого замкнутого контура $\oint dl = 0$. При более точном рассмотрении замкнутый виток с током можно разбить на две половины и каждую из них заменить точечным диполем. Тогда получится система двух точечных диполей с *равными, но противоположно направленными моментами*, сдвинутыми один относительно другого на расстояние, малое по сравнению с длиной волны. Теоретически такая система излучает, но практически излучения нет, так как в волновой зоне поле излучения меняется с расстоянием, как $\frac{d}{dr} \left(\frac{1}{r} \right) \sim \frac{1}{r^2}$, т. е. убывает слишком быстро. Эти рассуждения применимы и к колебательному контуру, а также ко всякой «закрытой» системе, т. е. к системе с замкнутыми или почти замкнутыми токами. Для получения интенсивного излучения надо перейти к «открытым» системам, в которых токи не замкнуты. Теоретически наилучшей системой является прямолинейный провод, в котором возбуждаются (незамкнутые) переменные токи. Излучатель такого типа был использован уже в классических опытах Герца. В радиотехнике излучающей системой служит *антенна* — незамкнутый провод или система проводов, подвешенных высоко над землей, по которым текут переменные токи.

Низкочастотные токи, применяемые в электротехнике, не годятся для целей радиосвязи по двум причинам. Во-первых, потому, что они излучают *очень слабо*. (Мощность излучения пропорциональна четвертой степени частоты, см. § 141.) Во-вторых, для возбуждения сильных колебаний в антенне используется явление резонанса, а следовательно, размеры антенны должны быть *очень большими*. Например, если излучающей антенной служит прямолинейный провод, то для возбуждения основного колебания длина

провода должна быть $l = \lambda/2$. При частоте $\nu = 1000$ Гц это дает $l = 150$ км. Поэтому в радиотехнике излучающие антенны питаются *токами высокой частоты*. В радиовещании пользуются частотами, лежащими приблизительно в пределах от 10^5 до 10^8 Гц, чему соответствуют длины волн от 3 км до 3 м. Для решения специальных задач, где существенна острая направленность излучения, применяют дециметровые и сантиметровые волны (частоты до 10^{10} Гц и выше).

Принцип радиосвязи очень прост. В антенне передающей радиостанции, настроенной в резонанс с генератором (рис. 378, а), воз-

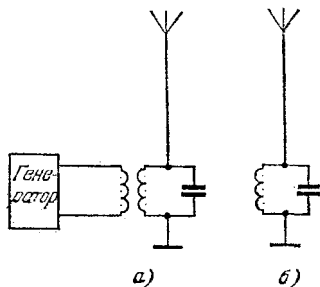


Рис. 378.

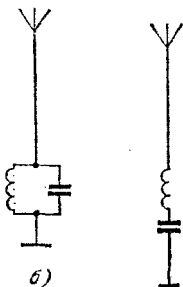


Рис. 379.

буждаются сильные высокочастотные токи. Электромагнитные волны, излучаемые этой антенной, достигая приемной антенны (рис. 378, б), также настроенной в резонанс с генератором, в свою очередь возбуждают в ней токи той же частоты, которые могут быть усилены и использованы. Для настройки антенны конденсатор

можно включать не только параллельно катушке индуктивности (рис. 378), но и последовательно с ней (рис. 379). При параллельном включении увеличивается общая емкость системы, а следовательно, ее собственная частота уменьшается. При последовательном соединении, наоборот, емкость уменьшается, а частота увеличивается.

2. Однако чисто синусоидальные волны высокой частоты, излучаемые антенной, не только *не несут никакой информации*, но и *не воспринимаются ухом человека*, если их преобразовать в звуковые волны той же частоты. Для передачи информации, например человеческой речи или музыки, требуются *низкочастотные сигналы*, с частотами примерно от 100 до нескольких тысяч герц. Для передачи телеграфных сигналов требуемые частоты еще ниже. Непосредственная передача низкочастотных сигналов радиоволнами тех же частот, как указывалось выше, невозможна из-за невозможности их генерации. Эта трудность устраняется в радиотехнике тем, что *передача осуществляется синусоидальными волнами высокой частоты, измененными низкочастотными сигналами*. Такое изменение называется *модуляцией*, а сами волны — *модулированными* (см. § 128). Модуляция состоит в изменении во времени *амплитуды, частоты или фазы колебания*. Во всем последующем изложении имеется в виду наиболее простая, *амплитудная, модуляция*.

Если из студии радиостанции не производится передача, то колебания тока в передающей антенне синусоидальны:

$$\mathcal{I} = \mathcal{I}_0 \sin \omega t \quad (146.1)$$

(рис. 380, а). Во время передачи (речь, музыка перед микрофоном) эти колебания преобразуются в

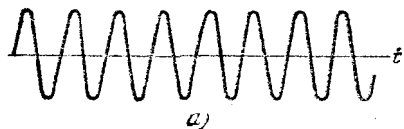
$$\mathcal{I} = \mathcal{I}_0 [1 + f(t)] \sin \omega t, \quad (146.2)$$

где функция $f(t)$ зависит от формы передаваемого (модулирующего) сигнала [$|f(t)| < 1$]. Она называется *модулирующей функцией*. Простейшая модулирующая функция соответствует передаче чисто музыкального тона, например звучания камертона. В этом случае $f(t) = \alpha \sin \Omega t$ (рис. 380, б). Постоянная Ω называется *частотой*, а постоянная α — *глубиной модуляции*. (Начальную фазу мы взяли равной нулю, так как она не играет принципиальной роли.) Подставляя $f(t)$ в формулу (146.2), представим модулированное колебание в виде

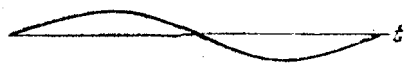
$$\mathcal{I} = \mathcal{I}_0 [1 + \alpha \sin \Omega t] \sin \omega t \quad (146.3)$$

(рис. 380, в). Преобразовывая это выражение, получим

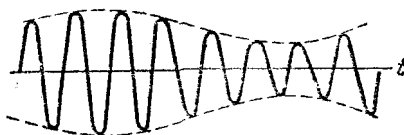
$$\begin{aligned} \mathcal{I} = & \\ = & \mathcal{I}_0 \sin \omega t + \frac{\alpha \mathcal{I}_0}{2} \cos(\omega - \Omega)t - \\ & - \frac{\alpha \mathcal{I}_0}{2} \cos(\omega + \Omega)t. \end{aligned} \quad (146.4)$$



а)



б)



в)

Рис. 380.

Если модулирующая функция $f(t)$ не синусоидальна, но периодична, то ее можно разложить в ряд Фурье и к каждому члену этого разложения применить рассуждение, приведенное выше. Тогда вместо двух частот $\omega - \Omega$ и $\omega + \Omega$ слева и справа от ω появится несколько боковых частот. Они образуют *боковые полосы*, состоящие из дискретного набора частот. Если же модулирующая функция не периодична, то она разлагается в интеграл Фурье. В этом случае боковые полосы слева и справа от ω содержат не только бесконечное, но и *непрерывное* множество частот. Примером могут служить модулирующая функция и модулированные колебания в случае телеграфных знаков, передаваемых по азбуке Морзе (рис. 381). Существенно, что все боковые частоты расположены *очень близко* от «несущей» частоты ω . Все колебания с такими

частотами являются *высокочастотными*, а потому они пригодны для излучения радиоволн. Приемник должен принимать *не только колебания несущей частоты, но и колебания примыкающих к ней боковых полос*. Иначе вся информация, содержащаяся в передаваемом сигнале, будет утеряна. Поэтому настройка приемника *не должна быть особенно острой*.

3. Для осуществления модуляции применяются устройства, образующие *произведения*, а не сумму подводимых к ним напряжений. Такие устройства принадлежат к классу нелинейных систем. На рис. 382 приведена простейшая схема генератора радиотелефонного

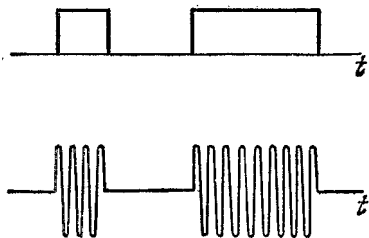


Рис. 381.

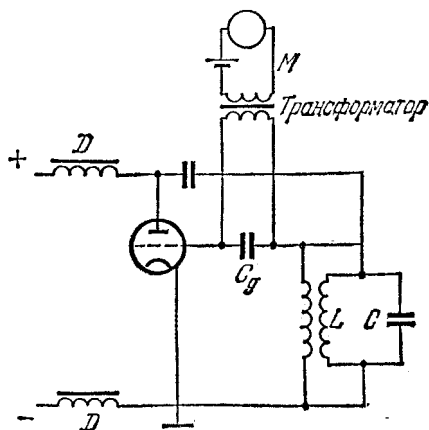


Рис. 382.

передатчика с модуляцией на сетку. Колебательный контур включен в цепь анода. Модулирующее напряжение возникает в цепи микрофона M и повышается трансформатором. Сопротивление сеточного конденсатора C_g для высокочастотных токов генератора мало, а сопротивление вторичной обмотки трансформатора благодаря ее большой индуктивности, наоборот, велико. Поэтому токи высокой частоты не ответвляются в модулирующую микрофонную цепь, и генератор работает практически так же, как и в отсутствие этой цепи. Иначе ведут себя микрофонные токи, идущие от вторичной обмотки трансформатора. Это — токи низкой частоты. Для них конденсатор C_g оказывает очень большое сопротивление, а потому напряжение трансформатора оказывается целиком приложенным между сеткой и катодом лампы. Это напряжение и модулирует выходное напряжение генератора. Действительно, анодный ток \mathcal{I} есть функция анодного V_1 и сеточного V_2 напряжений: $\mathcal{I} = \mathcal{I}(V_1, V_2)$. Разложим эту функцию в ряд Тейлора по обоим аргументам, оборвав разложение на членах второй степени. Получим

$$\mathcal{I} = a_0 + a_1 V_1 + a_2 V_2 + a_{11} V_1^2 + a_{22} V_2^2 + a_{12} V_1 V_2.$$

Последний член пропорционален *произведению* подводимых напряжений. Он и вызывает модуляцию анодного напряжения, а следовательно, и напряжения на конденсаторе или катушке индуктивности колебательного контура. Допустим, например, что $V_1 = A_1 \sin \omega t$, $V_2 = A_2 \sin \Omega t$.

Тогда

$$\mathcal{E} = a_1 A_1 \left(1 + \frac{a_{12}}{a_1} A_2 \sin \Omega t \right) \sin \omega t + \\ + (a_0 + a_2 A_2 \sin \Omega t + a_{11} A_1^2 \sin^2 \omega t + a_{22} A_2^2 \sin^2 \Omega t).$$

Первая скобка и есть требуемое модулированное колебание. Его можно выделить с помощью резонансного контура, настроенного (но не слишком остро) на частоту ω . Из приведенного анализа следует, что для модуляции колебаний лампа обязательно должна работать в таком режиме, чтобы ее вольтамперная характеристика была *нелинейна*. Модулированные колебания передаются в антенный контур, связанный индуктивно с катушкой L колебательного контура.

4. Обратимся теперь к приему модулированных колебаний. Под действием модулированной волны передающей антенны в приемной антенне возникают такие же модулированные колебания, только более слабые. Однако даже после предварительного усиления они еще не годятся для непосредственного воспроизведения посланного сигнала. Дело в том, что модулированные колебания, если их разложить на синусоидальные составляющие, будут содержать *только высокие частоты*, с которыми мембрана телефона (благодаря своей инерционности) не может колебаться с заметными амплитудами. Если даже изготовить малоинерционную мембрану (что в принципе возможно), то все равно возбуждаемые ею звуковые колебания (с частотами 10^5 — 10^8 Гц) будут находиться *вне пределов слышимости человеческого уха*. Поэтому принятые модулированные колебания подвергаются в приемнике *демодуляции*, или *детектированию*, превращаясь в колебания низких частот, соответствующих частотам посланного сигнала.

Демодуляция состоит в том, что высокочастотные колебания выпрямляются (с помощью *кристаллического детектора* или *электронной лампы*), а затем *сглаживаются* цепью, обладающей подходящим временем релаксации (постоянной времени). На рис. 383 изображена одна из возможных схем детектирования. Выпрямление производится с помощью кристаллического детектора D , сглаживание — с помощью цепи из параллельно соединенных конденсатора C и сопротивления R . Допустим, например, что модулирующий сигнал радиопередатчика состоит из одинаковых равноотстоящих прямоугольных импульсов длительностью t_1 каждый, следующих друг за другом через равные промежутки времени t_2 (рис. 384, а). На вход приемника подается модулированный сигнал (рис. 384, б).

Детектор D «срезает» верхнюю часть этого сигнала. Если бы не было конденсатора C , то на сопротивлении R появилось бы переменное напряжение V_R , представляемое кривой на рис. 384, в. В течение времени t_1 оно состояло бы из большого числа равноотстоящих одинаковых микроимпульсов длительностью $T/2$ каждый, где T — период высокочастотных колебаний. В последующий промежуток времени t_2 оно было бы равно нулю. При наличии конденсатора C большая часть тока от первого микроимпульса пойдет на конденсатор, заряжая его до напряжения, малого по сравнению с высотой микроимпульса. Такое же напряжение появится на сопротивлении R . В промежутках между микроимпульсами заряд конденсатора и напряжение на нем убывают экспоненциально по закону $e^{-t/\tau}$, где $\tau = RC$ — время релаксации (постоянная времени) RC -цепи. Если τ велико по сравнению

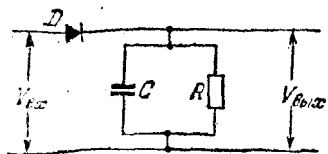


Рис. 383.

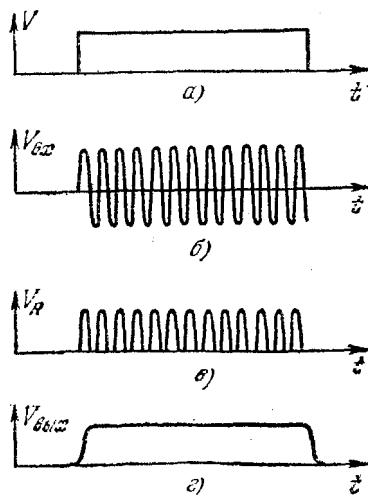


Рис. 384.

с промежутком времени Δt между последовательными микроимпульсами, то за время Δt заряд и напряжение на конденсаторе при разряде изменятся мало. Второй микроимпульс сигнала немного повысит это напряжение. За ним последует второй разряд и т. д. Этот процесс будет продолжаться до тех пор, пока повышение напряжения от микроимпульса при заряде конденсатора не сделается равным последующему понижению того же напряжения при разряде. С этого момента на сопротивлении R установится практически постоянное напряжение. Когда через систему пройдет последний микроимпульс, напряжение на выходе начнет экспоненциально убывать к нулю. Напряжение появится вновь, когда детектор пропустит второй импульс, и т. д. Если время установления напряжения мало по сравнению с t_1 и t_2 , то напряжение на выходе будет иметь вид, представленный на рис. 384, г. При надлежаще выбранных параметрах системы форма выходного импульса практически не будет отличаться от формы низкочастотного сигнала, посланного передающей радиостанцией. Так же обстоит дело и

в случае передачи низкочастотных сигналов непрямоугольной формы.

Для выпрямления колебаний при детектировании по схеме рис. 383 кристаллический детектор можно заменить двухэлектродной электронной лампой — диодом. Однако вместо диода обычно применяют трехэлектродную лампу (триод), которая не только выпрямляет, но и усиливает колебания. Соответствующая схема с сеточной демодуляцией показана на рис. 385. Ясно, что для получения выпрямляющего действия необходимо, чтобы рабочая точка электронной лампы лежала в нелинейной части характеристики, например у ее нижнего загиба.

5. Теперь можно понять действие радиоприемника. Высокочастотные колебания, возбужденные в приемной антенне, попадают сначала в усилитель высокой частоты. Входной колебательный контур этого усилителя должен быть настраиваемым, чтобы можно было выделять волну определенной радиостанции. Настройка, однако, не должна быть слишком острой, чтобы практически одинаково усиливались колебания с несущей частотой и колебания с частотами боковых полос (см. пункт 2). Усиленные колебания

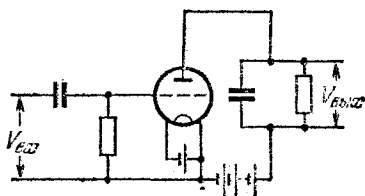


Рис. 385.

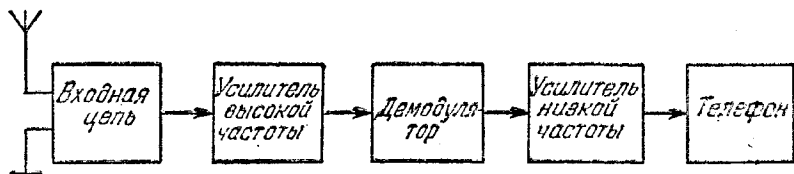


Рис. 386.

высокой частоты попадают в демодулятор и там преобразуются в колебания низких частот, содержащихся в передаваемом сигнале. Эти низкочастотные колебания опять усиливаются и попадают в громкоговоритель или другой индикатор. Приемник, работающий по такому принципу, называется «приемником прямого усиления». Блок-схема такого приемника приведена на рис. 386. Следует отметить, однако, что в радиовещании обычно применяются так называемые супергетеродинные приемники, работающие по несколько измененной схеме (см. пункт 7).

6. Скажем сначала о гетеродинном приеме, применяемом в радиотелеграфии. В настоящее время телеграфные сигналы азбуки Морзе принимают почти исключительно с помощью телефона, «на слух». Для этого импульсы высокочастотных колебаний не подвергаются

демодуляции, а *превращают их в колебания звуковой частоты*. С этой целью на одну из ламп приемника подают два переменных высокочастотных напряжения: напряжение сигнала $V = a \sin \omega t$ и напряжение $V_1 = a_1 \sin \omega_1 t$ от *гетеродина*, т. е. местного мало-мощного генератора, смонтированного в приемнике. Если лампа работает в нелинейном режиме, то происходит умножение этих напряжений и образование колебаний с комбинированными частотами $\omega - \omega_1$ и $\omega + \omega_1$ (см. пункт 3). Величину ω_1 подбирают так, чтобы частота $\omega - \omega_1$ лежала в области звуковых частот, воспринимаемых ухом. Если радиостанция работает, но не передает сигналов, то в телефоне слышен *непрерывный свист* (музыкальный тон с частотой $\omega - \omega_1$). Если же станция начинает передавать телеграфные сигналы, то непрерывный свист сменяется последовательностью *длинных* и *коротких* звуков. Натренированное ухо телеграфиста воспринимает длинный звук как тире, а короткий как точку. Среди других преимуществ гетеродинный прием обладает еще одним преимуществом, разъясняемым на следующем примере. Допустим, что на приемник действуют одновременно волны от нескольких радиостанций с практически совпадающими амплитудами и настолько близкими частотами, что их невозможно выделить путем резонанса. Гетеродинный прием в некоторых случаях делает возможным и это. Пусть, например, таких волн три с частотами 99 000, 100 000 и 101 000 Гц, а частота колебаний гетеродина 101 000 Гц. Тогда последнюю волну мы совсем не услышим, так как после гетеродинирования ей соответствует колебание с нулевой частотой. Первым же двум волнам соответствуют частоты в 2000 и 1000 Гц, отличающиеся на целую октаву. Такая разница в высоте звука легко различима, и при некотором навыке можно принимать радиотелеграмму одной волны, не обращая внимания на другую.

7. Недостаток описанного выше приемника прямого усиления состоит в том, что при очень высоких частотах он не позволяет получать большие усиления сигналов. Этому препятствуют неизбежные *паразитные емкости* (емкости электронных ламп, емкости соединительных проводов и пр.), которые при очень высоких частотах оказывают току ничтожные сопротивления и потому *шунтируют лампы*. Имеются и другие причины, связанные с процессами внутри самих электронных ламп. Применять же демодуляцию непосредственно после поступления принимаемого сигнала в антенну, отказавшись вовсе от усиления высокой частоты, нельзя, так как в этом случае при усилении низкой частоты усиливался бы не только сигнал, но и различные *помехи*, которые особенно велики при низких частотах. От указанного недостатка в значительной степени свободен *супергетеродинный приемник*, наиболее распространенный в настоящее время. Основная идея этого приемника состоит в *преобразовании несущей частоты ω в частоту более низкую*. Блок-схема супергетеродинного приемника изображена на рис. 387.

Высокочастотное модулированное колебание $V = a [1 + f(t)] \sin \omega t$ подводится к одному, а колебание $V_1 = a_1 \sin \omega_1 t$ от местного гетеродина — к другому электроду специальной лампы C . Если лампа C работает в нелинейном режиме, то происходит *умножение напряжений* V и V_1 с образованием колебаний типа

$$[1 + f(t)] \cos (\omega - \omega_1) t \quad (146.5)$$

и

$$[1 + f(t)] \cos (\omega + \omega_1) t, \quad (146.6)$$

которые модулированы той же функцией $f(t)$, что и исходное колебание в передающей антенне. Однако несущая частота ω в них

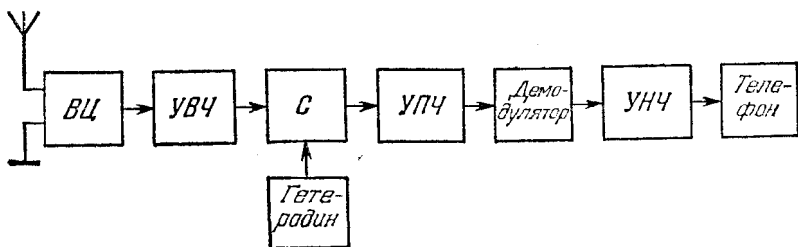


Рис. 387.

заменена на $\omega - \omega_1$ и $\omega + \omega_1$. Этот процесс преобразования частоты в радиотехнике называется *смещением частот*, а лампа, осуществляющая его, — *смесительной лампой* или *смесителем*. В супергетеродинном приемнике представляет интерес колебание (146.5) с частотой $\omega - \omega_1$, называемой *промежуточной частотой*. В отличие от простого гетеродинного приема, промежуточную частоту выбирают *достаточно высокой*, чтобы колебания с этой частотой *не воспринимались ухом*. Колебание (146.5) выделяют резонансным способом и поступают с ним так же, как с исходным колебанием $[1 + f(t)] \sin \omega t$ в приемнике прямого усиления, т. е. усиливают в усилителе промежуточной частоты (УПЧ), демодулируют, усиливают в усилителе низкой частоты (УНЧ) и, наконец, направляют в телефон или другой индикатор. Заметим еще, что при настройке на разные станции с изменением емкости конденсатора входного контура приемника изменяется и емкость конденсатора колебательного контура гетеродина таким образом, что промежуточная частота $\omega - \omega_1$ *остается неизменной*. С этой целью подвижные пластины обоих конденсаторов насаживают на общую ось.