

— формула Томсона. Следовательно, в единицах СИ

$$T = 2\pi \sqrt{LC}, \quad (51.45a)$$

где T выражается в секундах, L — в генри, C — в фарадах.
В гауссовых единицах

$$T = \frac{2\pi}{c} \sqrt{LC}, \quad (51.45b)$$

где T также выражается в секундах, L — в сантиметрах, C — в сантиметрах.

§ 52. Возбуждение электрических колебаний

Колебательный контур, схему действия которого мы разобрали в предыдущем параграфе, является принципиальной основой современной радиотехники. Колебания электрического заряда и тока в контуре создают вокруг контура периодически колеблющееся электромагнитное поле, порождающее электромагнитное излучение, которое распространяется во все стороны в виде электромагнитных волн (см. § 53) и, доходя до какого-либо другого контура, возбуждает в последнем переменный ток той же частоты.

Полная электромагнитная энергия

$$W = \frac{q^2}{2C} + \frac{k'^2 L I^2}{2}, \quad (52.1)$$

переходящая из катушки самоиндукции в конденсатор и обратно, в реальном контуре постепенно уменьшается. Часть этой энергии затрачивается на преодоление омического сопротивления и переходит в тепло. Другая часть энергии непрерывно расходуется на создание электромагнитного излучения, уносящего эту энергию в пространство.

Поэтому для создания и поддержания электрических колебаний в контуре к нему надо непрерывно подводить энергию от внешнего источника. Рассмотрим вкратце основные способы возбуждения колебаний электрического контура.

Вначале колебания контура возбуждались сравнительно редкими толчками с помощью индукционной катушки (индуктора). Схема такого способа возбуждения изображена на рис. 3.104. Индуктор I представляет собой катушку с железным сердечником и двумя обмотками. В первичной обмотке, обычно с помощью механического прерывателя, создается пульсирующий ток. Частота разрывов тока достигает 10^2 — 10^4 раз в секунду. Благодаря большому числу витков во вторичной обмотке в ней индуцируется переменная э. д. с. высокого напряжения, до $\sim 10\,000$ в, и той же частоты. Эта э. д. с. заряжает конденсатор C . Цепь самого колебательного контура, со-

стоящего из емкости C и индуктивности L , разомкнута воздушным промежутком S . В тот момент, когда напряжение на этом разрядном промежутке достигает пробивного значения $U_{\text{проб}}$, проскаивает искра, образовавшийся при пробое столб ионизованного воздуха замыкает цепь контура, и в нем возникают собственные колебания высокой частоты. Эти колебания быстро затухают, и контур размыкается до следующей искры.

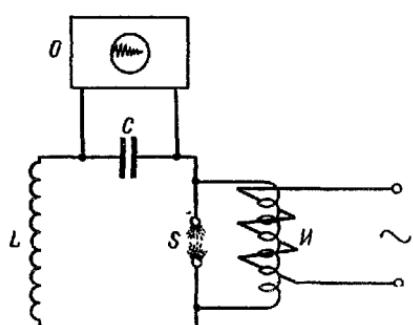


Рис. 3.104.

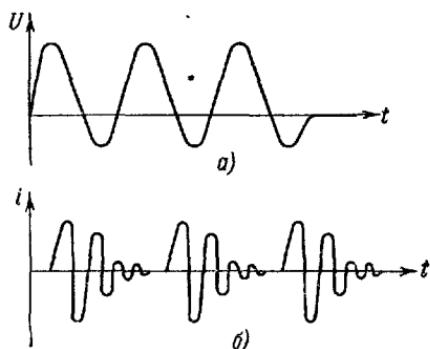


Рис. 3.105.

На рис. 3.105, а показано изменение э. д. с. вторичной катушки индуктора со временем, а на рис. 3.105, б изображен ток i в цепи колебательного контура. Для наглядности на рис. 3.104 изображен присоединенный к контуру осциллограф O , на экране которого воспроизводится кривая зависимости i от t .

Несмотря на все несовершенство такого метода возбуждения, с его помощью Герц в 1886 г. впервые получил и изучил электромагнитные волны. Из формулы (51.45) следует, что частота собственных колебаний контура с достаточно малым омическим сопротивлением связана с остальными параметрами контура соотношением

$$\nu = \frac{1}{T} = \frac{1}{2\pi k^2 \sqrt{LC}}. \quad (52.2)$$

Отсюда видно, что для увеличения собственной частоты колебаний контура надо уменьшить его емкость C и индуктивность L . Идя по этому пути, Герц оставил в контуре всего один виток, а затем стал уменьшать площадь пластин конденсатора и раздвигать их друг от друга, как показано на рис. 3.106, а—в.

В результате вибратор Герца получил форму, изображенную на рис. 3.106, в,—двух стерженьков с разрядным промежутком между ними, к которому подводились провода от индуктора.

Принципиально важным для увеличения интенсивности излучения явилось то обстоятельство, что контур при этом стал открытym.

Если в первоначальной форме контура переменное электрическое поле было все заключено внутри конденсатора (рис. 3.106, а), то в окончательной форме оно уже окружало вибратор снаружи (рис. 3.106, б).

Используя такой вибратор, Герц получил электромагнитные волны с частотой v до 10^8 сек $^{-1}$ (10^8 гц). Позже П. Н. Лебедев,

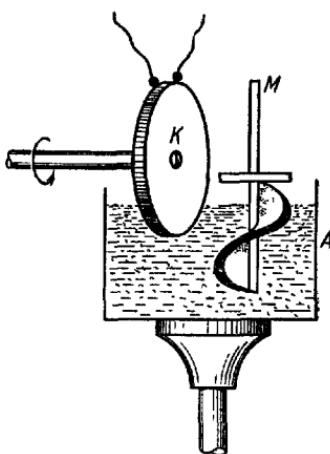
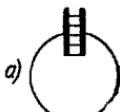


Рис. 3.106.

Рис. 3.107.

применив маленькие тоненькие платиновые стерженьки, сконструировал вибратор с еще большей частотой: $\sim 10^{10}$ гц.

Частоты собственных колебаний электрических зарядов в атомах и молекулах еще выше и достигают примерно 10^{12} — 10^{16} гц.

Для получения близких к этим частотам электрических колебаний макроскопических вибраторов А. А. Глаголева-Аркадьева в 1922 г. построила прибор, названный ею массовым излучателем. В сосуд A (рис. 3.107) наливается масло со взвешенными в нем мелкими металлическими опилками, непрерывно перемешиваемое мешалкой M . Колесико K , вращающееся вокруг горизонтальной оси, захватывает слой масла с опилками, покрывающий его обод в виде тонкой пленки — своеобразной «шины». Сверху к этойшине подводятся концы проводов от индуктора, возбуждающего электрические колебания в опилках. Благодаря непрерывной смене опилок при вращении колесика K они не успевают сгорать от проскаивающих между ними искр. Большое число одновременно возбуждаемых вибраторов обеспечивает достаточную для обнаружения интенсивность электромагнитных волн. Неоднородность размеров и формы отдельных вибраторов вызывает в массовом излучателе одновременные электрические колебания с различными частотами в интервале 10^{10} — 10^{12} гц, перекрывающем промежуток на шкале частот между электрическими колебаниями атомов и макроскопических вибраторов.

В своих опытах 1887—1891 гг. для регистрации электромагнитного поля, излучаемого вибратором, Герц использовал явление электрического резонанса. Вибратор B , возбуждаемый индуктором I , являлся источником электромагнитного поля определенной частоты (рис. 3.108). Достигая второго контура с искровым промежутком, являющегося в данном случае резонатором P , переменное магнитное поле возбуждало в нем электрические колебания той же частоты.

При достаточной амплитуде последних через искровой промежуток резонатора проскачивала искра, сигнализировавшая о приходе электромагнитной волны.

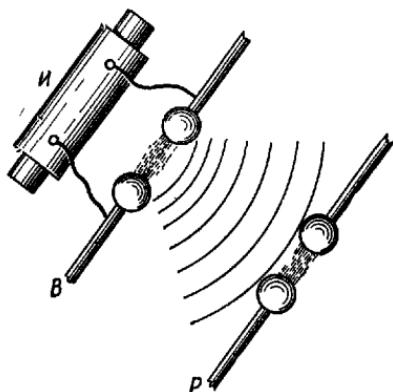


Рис. 3.108.

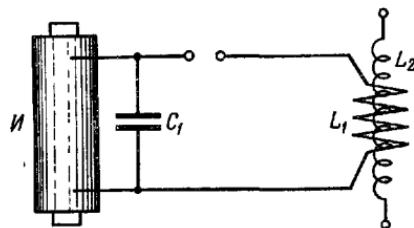


Рис. 3.109.

Для получения максимальной амплитуды колебаний контура P он настраивался в резонанс с вибратором B .

В данном случае резонатор представляет собой контур, в котором возникают вынужденные электрические колебания. Периодическая э. д. с. возникает в нем под действием переменного электромагнитного поля первого вибратора.

Принцип электрического резонанса используется и в трансформаторе Тесла, схема которого проведена на рис. 3.109. В первичной обмотке этого трансформатора с помощью индуктора I возбуждаются электрические колебания высокой частоты $\Omega = 1/\sqrt{L_1 C_1}$. Значительная часть подаваемой в контур энергии при этом излучается в пространство в виде переменного электромагнитного поля. Чтобы большая часть этой энергии передавалась во вторичную обмотку и возбуждала в ней электрические колебания значительной амплитуды, частота собственных колебаний вторичного контура $\omega_0 = 1/\sqrt{L_2 C_2}$ должна совпадать с частотой вынуждающей силы Ω . Условие резонанса тогда примет вид

$$L_1 C_1 = L_2 C_2. \quad (52.3)$$

Для получения во вторичной обмотке очень высоких напряжений

необходимо делать ее из большого числа витков и тем самым увеличивать ее индуктивность, так что $L_2 \gg L_1$. Для соблюдения условия резонанса (52.3) приходится соответственно сильно уменьшать емкость вторичного контура: $C_2 \ll C_1$, для чего его делают открытым. С помощью трансформатора Тесла удается получать токи высокой частоты, до 10^6 Гц, с напряжением около миллиона вольт. Концы катушки L_2 на воздухе искрят, а в помещенных поблизости разрядных трубках с разреженными газами возникает свечение.

Для переменного тока технической частоты, 50 Гц, потери на излучение относительно малы. Поэтому в обычных технических трансформаторах нет необходимости в строгом соблюдении условия резонанса (52.3).

Во всех рассмотренных выше системах частота подвода энергии от индуктора много меньше частоты собственных колебаний контура. Вследствие потерь энергии на джоулево тепло и на излучение после каждого «толчка» амплитуды колебаний заряда и тока в контуре

быстро убывают (см. рис. 3.105, б). Для техники особый интерес представляет контур, в котором и при потере энергии могли бы поддерживаться незатухающие колебания. Такой контур способен испускать незатухающие электромагнитные волны. При наличии потерь незатухающие колебания можно получать только за счет постоянного притока энергии в колебательный контур. Создать такой устойчиво работающий контур удалось лишь благодаря изобретению триода.

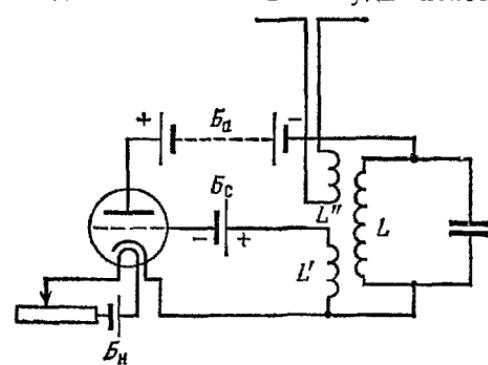


Рис. 3.110.

какой устойчиво работающий контур удалось лишь благодаря изобретению триода.

Рассмотрим простейший колебательный контур с триодом, в котором незатухающие колебания поддерживаются за счет энергии источника постоянной э. д. с. (например, аккумулятора). Схема такого генератора незатухающих электромагнитных колебаний показана на рис. 3.110.

Задача состоит в том, чтобы, грубо говоря, включать и выключать источник постоянного напряжения с частотой, равной частоте колебаний контура ν , так, чтобы при включениях э. д. с. источника усиливала ток в контуре.

Основная идея всех автоколебательных систем (механических и прочих, в том числе рассматриваемой) состоит в том, что «клапан», открывающий доступ энергии в контур, управляемся самой колебательной частью прибора (в данном случае — колеба-

тельным контуром). Часть прибора, осуществляющая связь колебательной части и клапана, носит название обратной связи. При таком управлении работой клапана исключается возможность включения и выключения источника энергии «не в такт».

В нашем примере источником энергии является батарея B_a , в цепь которой включен колебательный контур. Клапаном же является триод. Обратная связь реализуется следующим образом. Как известно, небольшие изменения сеточного напряжения (по отношению к катоду) сильно меняют сопротивления триода (см. § 23). Между сеткой и катодом включается катушка L' , которая связывается индуктивно с катушкой L колебательного контура. Катушка L индуцирует в L' колебания, очевидно, той же самой частоты, что и частота колебаний v в контуре. Таким образом, ток в анодной цепи (анод \rightarrow батарея $B_a \rightarrow$ колебательный контур \rightarrow катод) модулируется с частотой v^*). Таким образом, в колебательный контур оказывается включенной сторонняя э. д. с. нужной частоты, передающая ему энергию.

Отвод необходимой энергии в antennу также можно осуществить с помощью катушки L'' , индуктивно связанной с L . Если частота контура L'' близка к v , то передача энергии от L к L'' будет достаточно большой.

Описанный способ получения незатухающих электромагнитных колебаний используется в современной радиотехнике в области частот от 10^5 гц (и, при желании, меньших) до 10^9 гц, что отвечает диапазону длин волн от 3 км до 30 см.

Дальнейшее повышение частоты и переход к так называемому сантиметровому диапазону электромагнитных волн с помощью лампового генератора рассмотренной схемы наталкивается на два существенных затруднения. Во-первых, в соответствии с (52.2) необходимо уменьшать размеры самого контура, что, помимо прочих трудностей, снижает мощность контура. Во-вторых, при этом будет не успевать срабатывать «клапан», т. е. электронный поток в лампе. Действительно, при частоте порядка 10^{11} гц электроны, летящие со скоростью порядка 10^9 см/сек, за время одного периода $T \approx 10^{-11}$ сек пройдут расстояние всего лишь 10^{-2} см = 0,1 мм и будут доходить до противоположного электрода, когда его потенциал будет уже совсем не тот, что был в момент их вылета из катода.

Радиоволны сантиметрового диапазона генерируются с помощью клистронов и магнетронов. Электромагнитные волны возбуждаются в клистроне примерно так, как возбуждаются звуковые волны в органной трубе или свистке.

*) Батарея B_c включена в цепь обратной связи для того, чтобы лампа работала на линейной части своей характеристики

Клистрон состоит из двух полых резонаторов P_1 и P_2 (рис. 3.111), настроенных в резонанс с помощью винтов настройки H_1 и H_2 . Донышки резонаторов сделаны в виде сеток C_1 , C_2 , C_3 , C_4 , C_5 , сквозь которые может проходить пучок электронов. Электроны испускаются плоским подогревным катодом K , ускоряются между ним и сеткой C_1 и попадают через C_2 в первый резонатор P_1 . В зависимости от фазы стоячей волны в P_1 , т. е. направления вектора \mathbf{E} в области между C_2 и C_3 , электроны либо ускоряются в этом поле, либо тормозятся.

Представим себе, что в начальный момент электроны в P_1 тормозятся. Тогда, выходя в пространство между резонаторами, они будут двигаться медленнее, чем двигались раньше. Электроны, попадающие в резонатор через время $T/2$, будут ускоряться электрическим полем, так что их скорость возрастет. Расстояние между C_3 и C_4 — пространство дрейфа — подобрано так, чтобы запаздывавшие на $T/2$, но более быстрые электроны нагнали электроны, которые движутся медленнее, вблизи C_4 . В дальнейшем эта же картина будет повторяться с периодом T .

Таким образом, в результате взаимодействия с полем первого резонатора однородный пучок электронов, проходящих через C_2 , разбивается на ряд «сгустков», или пакетов, формирующихся перед сеткой C_4 . Если фаза поля в резонаторе P_2 такова, что пролетающий сквозь него пакет электронов тормозится полем P_2 , то это же будет происходить и со всеми последующими пакетами. Это означает, что в P_2 электроны будут терять свою энергию, передавая ее электромагнитному полю, амплитуда которого будет возрастать.

Часть этого поля будет поступать через специальную полуую металлическую трубку в резонатор P_1 , поддерживая колебания в нем. Эта трубка играет роль обратной связи рассматриваемой автоколебательной системы; на рис. 3.111 она обозначена $O. C.$ Часть энергии отводится от P_2 с помощью другой металлической трубы — волновода, оканчивающегося металлическим рупором, который является излучателем электромагнитного поля.

Клистроны очень легки и удобны в обращении. Но значительно большую мощность излучения можно получить с помощью магнетрона. Магнетрон представляет собой диод с очень большим анодным напряжением. Однако ток в нем весьма невелик, так как внутри лампы имеется мощное магнитное поле \mathbf{H} , параллельное оси диода. Электроны, вылетающие из катода и ускоряемые электрическим полем по направлению к аноду, отклоняются магнитным

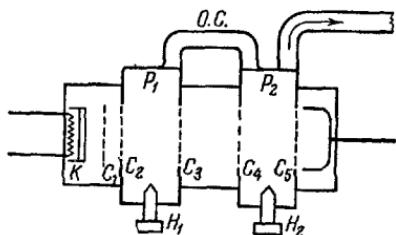


Рис. 3.111

полем и описывают траектории, показанные на рис. 3.112. Двигаясь ускоренно, электроны испускают электромагнитное излучение, которое выводится затем из магнетрона так же, как из клистрона.

Для вывода излучения высокой частоты в пространство в случае волновода можно использовать рупор, в прочих случаях — антенну, механизм действия которой будет разобран в следующем параграфе.

Для передачи электромагнитного поля без излучения его в про-

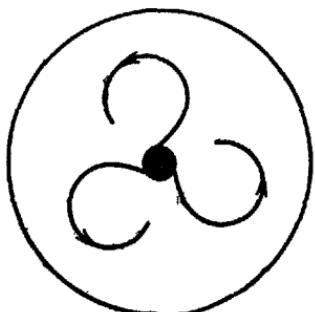


Рис. 3.112.

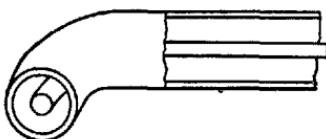


Рис. 3.113.

странстве можно пользоваться также коаксиальным кабелем, состоящим из центрального провода и соосной с ним металлической оболочки (рис. 3.113). Токи в этом кабеле идут по поверхности внутреннего проводника и по внутренней поверхности проводника — оболочки. Электромагнитное поле в таком кабеле целиком распространяется в пространстве между проводниками и вне проводника всегда равно нулю. Поэтому коаксиальный кабель в отличие от обычных «открытых» линий, состоящих из двух параллельных проводников, ничего не излучает.

§ 53. Электромагнитные волны

В идеальном колебательном контуре (см. рис. 3.98) электрические заряды противоположного знака то разделяются на противоположных пластинах конденсатора, то компенсируют друг друга в моменты максимума тока. Та же картина движения зарядов и токов наблюдается в вибраторе Герца (рис. 3.106, в) при возбуждении его индуктором и в антenne, возбуждаемой от лампового генератора (рис. 3.110).

Для выяснения механизма образования электромагнитных волн этими излучателями представим излучатель схематически в виде колеблющегося электрического диполя. Такой простейший вибратор, изображенный на рис. 3.114, состоит из двух зарядов $+q$ и $-q$, гармонически колеблющихся с некоторой частотой v вдоль вертикальной прямой в противоположные стороны. Амплитуда колебаний обоих зарядов одинакова, а фазы противоположны. На рис. 3.114,