

проводника. Амплитуда ускорения при синусоидальном колебательном движении пропорциональна квадрату частоты колебаний. В связи с этим напряженность индуцированного электрического поля (а также и связанного с ним по формуле (10) магнитного поля) будет пропорциональна квадрату частоты. Следовательно, вектор Умова — Пойнтинга и излучаемая мощность будут пропорциональны четвертой степени частоты.

Однако если сопоставлять излучение (как это обычно и делают) при одинаковых амплитудах тока, то  $E$  и  $H$  будут тем более велики, чем больше при синусоидальном изменении амплитуда  $\frac{dI}{dt}$ , т. е.  $E$  и  $H$  в этом случае пропорциональны первой степени частоты. Стало быть, излучаемая мощность для одинаковых излучающих систем при одинаковых амплитудах тока пропорциональна (как это уже было отмечено выше) квадрату частоты.

### § 90. Излучение электрического диполя. Волны в двухпроводной линии. Антенны

Воспользовавшись понятием о силовых линиях, можно построить довольно наглядную картину строения поля волн, излучаемых проводником, несущим переменный ток. Выделим мысленно из всей массы движущихся зарядов два равных по величине и противоположных по знаку заряда  $e_1$  и  $e_2$  и

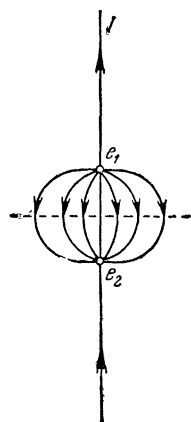


Рис. 381.

рассмотрим синусоидальное колебательное движение таких зарядов около положения равновесия. Это даст нам представление об излучении, производимом электрическим диполем Герца.

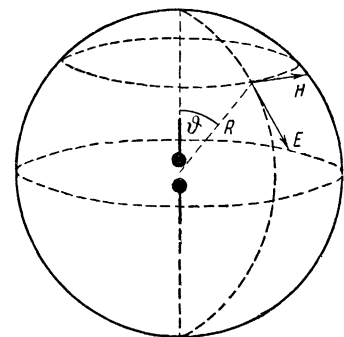


Рис. 382. В электромагнитной волне, излучаемой диполем, векторы  $E$  направлены по меридианам, а векторы  $H$  — по параллелям.

Легко видеть, что силовые линии электрического поля лежат в плоскостях, проходящих через ось проводника (рис. 381); силовые линии магнитного поля кольцами охватывают проводник. Эта взаимная перпендикулярность направлений электрического и магнитного полей сохраняется и в распространяющейся электромагнитной волне (рис. 382).

Расстояние между зарядами и их скорость меняются во времени синусоидально, поэтому и изменение напряженностей электриче-

ского и магнитного полей вдоль направления распространения волны также подчиняется синусоидальному закону, а именно в плоскости, перпендикулярной к оси диполя Герца,

$$E = \frac{E_0}{r} \sin \omega \left( t - \frac{r}{u} \right) = \frac{E_0}{r} \sin 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{r}{\lambda} \right), \quad (13)$$

где  $r$  — расстояние рассматриваемой точки от диполя, а  $\omega$ ,  $T$ ,  $\lambda$  — угловая частота, период и длина волны (т. I, § 63).

По другим направлениям напряженность поля отличается от указанной в формуле (13) множителем  $\sin \vartheta$ .

На рис. 383 даны последовательные моменты образования электромагнитной волны. Мы видим, что в момент возвращения зарядов к положению равновесия электрические силовые линии смыкаются. Возникающая электромагнитная волна не имеет строго шаровой формы; излучение электрического диполя происходит главным образом в плоскости, перпендикулярной к оси диполя, однако по мере распространения волны ее форма все более приближается к шаровой. Таким образом, можно считать, что на достаточном отдалении от излучающего проводника напряженность полей изменяется обратно пропорционально расстоянию соответственно формуле (13) и аналогичной формуле для  $H$ .

Рис. 383. Картина поля электромагнитных волн, излучаемых диполем.

На рис. 384 ординаты синусоидальных кривых изображают напряженность электрического поля распространяющейся волны; на этом рисунке графически показано распределение напряженностей электрического и магнитного полей волны вдоль линии ее распространения. Понятно, что показанная на этом рисунке длина электромагнитной волны  $\lambda$  равна тому расстоянию, которое волна

проходит в продолжение одного периода изменения тока в излучающем проводнике. Если частота переменного тока равна  $\nu$  герц, то продолжительность одного периода равна  $T = \frac{1}{\nu}$  сек., и длина волны, очевидно, будет:

$$\lambda = uT = \frac{u}{\nu},$$

а в вакууме, где  $u = c$ ,

$$\lambda = \frac{3 \cdot 10^{10}}{\nu} \text{ см.}$$

Рис. 384 дает мгновенную картину поля. Изменение со временем поля в электромагнитной волне соответствует перемещению в на-

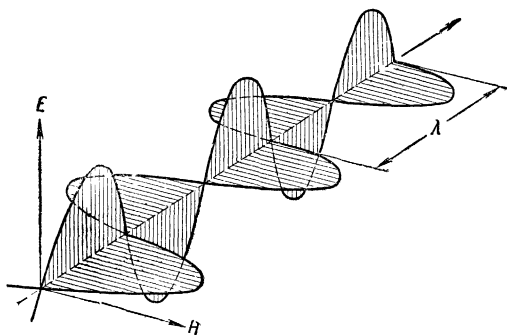


Рис. 384. График распределения напряженности электрического и магнитного полей вдоль линии распространения электромагнитной волны.

правлении луча с фазовой скоростью  $u$  двух изображенных на рис. 384 взаимно-перпендикулярных синусоид  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{H}$ , причем в плоской волне амплитуды этих синусоид остаются неизменными, а в шаровой волне они изменяются обратно пропорционально удалению от излучателя.

В классических опытах, проведенных в 1887—1891 гг., Герц всесторонне исследовал строение поля, излучаемого электрическим диполем. Индикатором напряженности поля в опытах Герца служила искра, образующаяся в резонансном контуре, представлявшем собой проволочный прямоугольник с миниатюрным искровым промежутком, величину которого можно было регулировать посредством винта с тонкой нарезкой. Размеры резонатора выбирались такими, чтобы его собственная частота электрических колебаний, определяемая формулой Томсона, была равна частоте излучаемых волн (совпа-

давшей в опытах Герца с собственной частотой вибратора). Изменяя положение резонатора по отношению к излучателю и наблюдая, появляется ли искра в резонаторе или нет (рис. 385), Герц экспериментально определил строение поля волн, излучаемых вибратором. Применяя в опытах с малыми вибраторами (имеющими высокую частоту собственных колебаний) вогнутые и плоские металлические зеркала, Герц показал, что очень короткие электромагнитные волны (сантиметровые волны) распространяются лучеобразно, отражаются от проводящих поверхностей, преломляются в диэлектриках.

Аналогичным образом П. Н. Лебедев в 1895 г. получил и исследовал еще более короткие, миллиметровые волны.

Последующие экспериментаторы (Мёбиус, Никольс, Глаголева-Аркадьева), усовершенствовав методику, получили еще более короткие волны и сомкнули область искусственно генерируемых волн с областью тепловых (инфракрасных) лучей, исследованных Рубенсом (рис. 386).

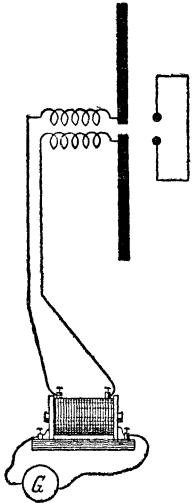


Рис 385. Схема излучателя и резонатора в опытах Герца.

Ежегодно 7 мая (День радио) советская общественность отмечает успехи отечественной радиотехники и очередную годовщину знаменательной даты (7 мая 1895 г.), когда выдающийся русский ученый Александр Степанович Попов демонстрировал изобретенный им радиоприемник. Усовершенствовав вибратор Герца и применив свой радиоприемник, А. С. Попов в 1896 г. впервые в мире наладил опытную радиотелеграфную связь сначала на небольшом расстоянии в  $\frac{1}{4}$  км, в следующем году на расстоянии 5 км, а в 1899 г. на расстоянии около 50 км. За

границей эксплуатация, усовершенствование (и присвоение) изобретений Попова проводились фирмой, организованной итальянским инженером Маркони. В 1901 г. была осуществлена радиотелеграфная связь через Атлантический океан. Изобретение электронных ламп (1904—1907 гг.) и применение их для генерирования незатухающих колебаний (1913 г.) сделало возможным развитие радиотелефонии и радиовещания. В 20-х и 30-х годах весь мир покрылся сетью мощных радиовещательных станций (Москвой первый радиовещательный концерт был передан 17 сентября 1922 г.).

Эффективность радиосвязи обеспечивается тем, что радиопередатчики (генераторы электрических колебаний и излучающие системы) и радиоприемники конструируют в самом строгом соответствии с расчетными выводами теории, которая детально разработана усилиями многих физиков и инженеров.

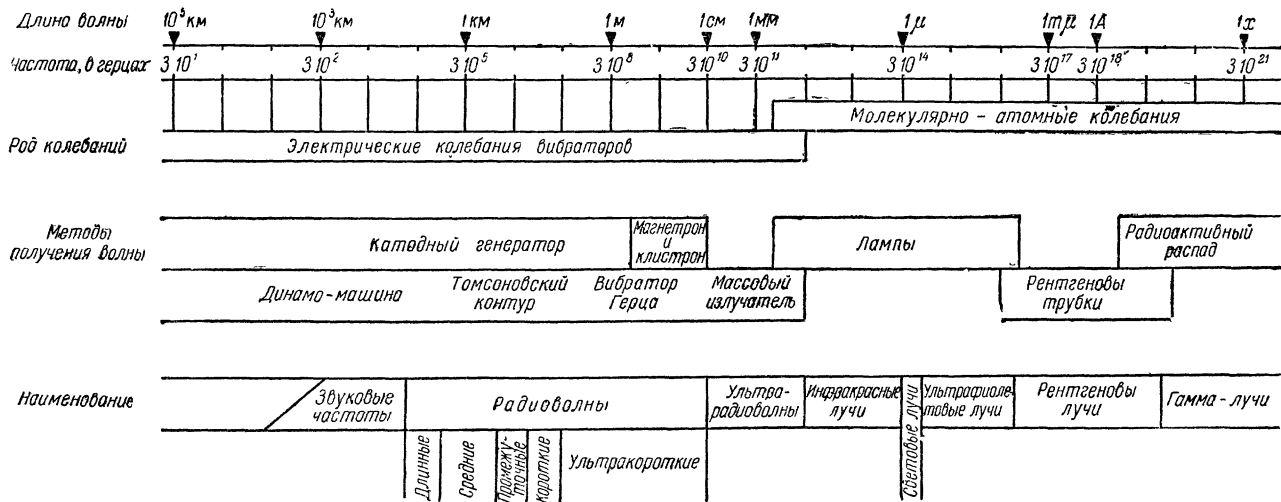


Рис 386. Электромагнитные волны.

Чтобы оценить наивыгоднейшие условия работы генератора, возбуждающего электрические колебания в излучающей системе, излучающую систему заменяют *эквивалентной цепью* (рис. 387), составленной из индуктивности  $L$ , емкости  $C$  и сопротивления  $R$  ( $L$  и  $C$  — индуктивность и емкость излучающей системы). Под  $R$  понимают сопротивление, на котором затрачивается мощность, излучаемая



Александр Степанович Попов  
(1859—1905).

системой. Это сопротивление, действием которого подменяют действительный процесс излучения энергии, называют *сопротивлением излучения*<sup>1)</sup>.

Эквивалентная цепь излучающей системы представляет собой электрический колебательный контур, резонансная частота которого равна

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

Генератор, питающий эту цепь, будет находиться в наивыгоднейших условиях в том случае, когда отдаваемая им частота совпадает с резонансной частотой контура; при этом ток в контуре будет максимальным и будет определяться только напряжением, которое дает генератор, и сопротивлением  $R$ . Поэтому генератор, питающий излучающую систему, настраивают с нею в резонанс, причем момент совпадения частоты генератора с собственной частотой излучающего контура наблюдают по амперметру, включенному в провод излучающей системы. В момент резонанса величина тока, а следовательно, и показания амперметра будут наибольшими.

1) Вычисления показывают, что сопротивление излучения пропорционально квадрату отношения полной длины (т. е. обих плеч) симметричного вибратора  $l$  к длине излучаемой волны  $\lambda$  (формула Рюденберга):

$$R_{\text{изл}} = 80\pi^2 \left( \frac{l}{\lambda} \right)^2 \text{ ом.}$$

Мощность излучения выражается произведением сопротивления излучения на квадрат амплитуды тока:

$$P = R_{\text{изл}} I_0^2.$$

Характер электрических колебаний, возбуждаемых генератором в *двухпроводной линии излучающей системы*, зависит, как мы сейчас убедимся, от соотношения между длиной проводов и частотой колебаний, а также от сопротивления, подключенного к концу линии (ее *нагрузки*).

Процесс распространения тока вдоль провода обуславливается, по существу, распространением импульса электрического поля. Поэтому и скорость распространения тока в проводе не может быть больше скорости света. Провод определяет путь распространения электромагнитного возмущения.

Когда генератор переменного тока питает пару проводников, вдоль них распространяется серия электромагнитных волн, длина которых соответствует частоте генератора (рис. 388). Если длина провода значительно больше длины волны, то генератор может совершить много периодов, прежде чем электромагнитная волна достигнет конца провода.

В случае бесконечно длинной двухпроводной линии (а также линии конечной длины, но имеющей, как пояснено ниже, вполне определенную нагрузку на конце) вдоль линии от генератора высокочастотного тока стационарно распространяются *бегущие волны*. В любой момент времени распределение тока вдоль провода линии подчиняется синусоидальному закону; в любой точке провода ток изменяется с течением времени тоже синусоидально.

Рис. 388 Картина электромагнитного поля, распространяющегося вдоль двухпроводной линии.

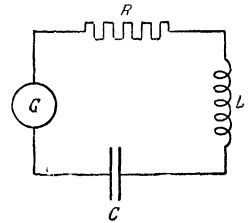
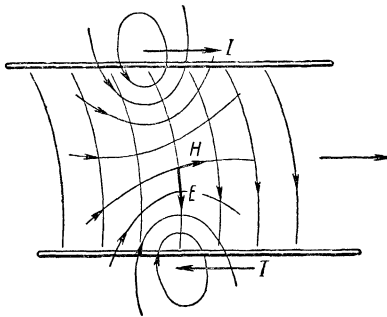


Рис. 387. Электрический колебательный контур, которому эквивалентна излучающая система проводников.

определяется свойствами среды по формуле  $u = \frac{c}{\sqrt{\epsilon\mu}}$ , т. е. практически оказывается равной скорости света в вакууме (поскольку для воздуха  $\epsilon$  и  $\mu$  близки к единице)<sup>1)</sup>. В плоскости поперечного

<sup>1)</sup> Индуктивность и емкость проводящей линии, отнесенные к единице длины, связаны соотношением  $LC = \epsilon\mu \approx 1$  (где  $L$  и  $C$  выражены в сантиметрах); поэтому в данном случае можно написать также, что

$$u = \frac{c}{\sqrt{LC}} \approx c.$$

сечения на некотором расстоянии от проводящей линии противоположно направленные векторы напряженности электрических полей (а также и магнитных), связанных с каждым из проводов, дают ничтожно слабое результирующее поле. Таким образом, двухпроводная линия направляет электромагнитные волны, концентрируя в то же время их энергию главным образом в пространстве между проводами.

Отношение амплитуд напряжения и тока в волне, бегущей вдоль двухпроводной линии, для всех точек однородной линии одинаково (фазы напряжения и тока в бегущей волне совпадают) и не изменяется со временем. Это отношение  $\frac{V_0}{I_0}$  называют *волновым сопротивлением линии*; оно зависит только от индуктивности и емкости линии и определяется (как и волновое сопротивление контура, стр. 484) формулой

$$R_{\text{волн}} = \sqrt{\frac{L}{C}}.$$

Поскольку напряжение и ток в бегущей волне совпадают по фазе, волновое сопротивление является активным сопротивлением <sup>1)</sup>.

Когда линия в конце замкнута на сопротивление, то энергия, приносимая электромагнитной волной, частично рассеивается в этом сопротивлении. *Когда конец линии не замкнут*, бегущая волна *отражается* от конца линии, подобно тому как отражается от точки крепления волна, бегущая вдоль струны. Отраженная волна, бегущая по направлению к генератору, слагаясь с прямой волной, дает довольно сложную картину распределения токов и напряжений вдоль провода линии.

Поскольку на конце линии не происходит поглощения энергии, то имеет место наложение отраженной волны на падающую и в результате возникает *стоячая электромагнитная волна*. Стоячая электромагнитная волна сопровождается стоячей волной тока; мы имеем здесь, как и в случае колебаний струны, «пучности» и «узлы», т. е. точки, в которых величина переменного тока наибольшая (пучность), и точки, в которых она равна нулю (узлы). Если включить в провод лампочки накаливания, то они светятся сильнее всего в пучностях тока, в узлах они не светятся. Двухпроводную линию, открытую с одного конца и имеющую генератор колебаний, подключенный к другому концу, можно рассматривать как полуоткрытый электрический диполь. На концах открытой линии, как и на концах диполя, образуются узлы тока (рис. 389 и 390).

<sup>1)</sup> Индуктивность и емкость кабелей, применяемых в практике телевидения, таковы, что волновое сопротивление этих кабелей составляет: для многих марок симметричных двужильных кабелей 100—300 ом, для большинства коаксиальных кабелей 75 ом.



Фазы напряжения и тока в стоячей волне отличаются на  $\frac{\pi}{2}$  (в узлах тока находятся пучности напряжений). Их амплитуды в два раза превышают амплитуду бегущей волны, отражаемой от конца линии.

К двухпроводной линии, разомкнутой на конце, около одного из узлов напряжения подключают генератор колебаний; тогда он создает в линии напряжения, амплитуды которых существенно превышают амплитуду напряжений генератора.

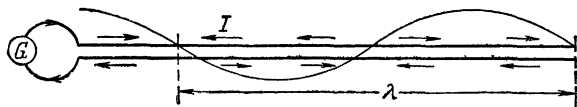


Рис. 389. Стоячие волны тока в двухпроводной разомкнутой на конце электрической линии.

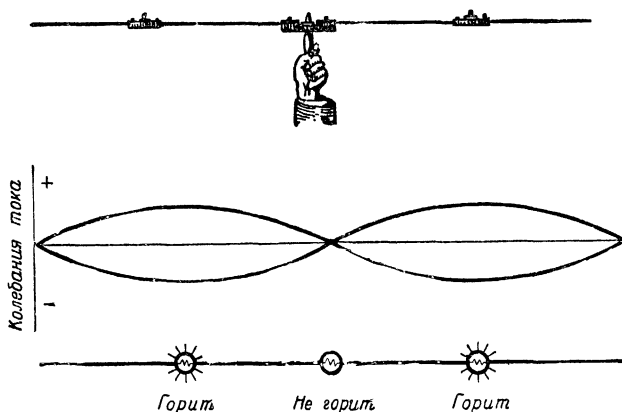


Рис. 390. Диполь с тремя лампочками для исследования распределения тока в нем и распределение тока в диполе, колеблющемся в первом обертоне.

В короткозамкнутой на конце двухпроводной линии фаза волны тока, отраженной от конца линии, не меняется, т. е. на конце линии образуются пучность тока и узел напряжения. Если в этом случае генератор подключить к линии в одном из узлов тока, то он создаст на конце линии ток с амплитудой, превышающей амплитуду тока, питающего линию.

Экспериментальное исследование поля стоячих волн, образующихся в двухпроводной линии, открытой с одного конца, впервые было выполнено Лехером (1890 г.). Картина электрического поля

стоячих волн, установленная Лехером, показана на рис. 391. Стрелки на этом рисунке показывают направление силовых электрических линий (направление токов смещения между проводниками), густота стрелок отображает напряженность электрического поля. Места сгущения электрических силовых линий соответствуют пучностям напряжения поля, совпадающим с узлами тока в проводниках. В течение каждого полупериода колебаний направление поля меняется на обратное, проходя через нуль. Если провода поместить в трубку с разреженным газом, то при достаточно высоком напряжении генерируемых колебаний наблюдаются яркие полосы светящегося газа, указывающие положение пучностей напряжения. Их можно обнаружить также, просто помещая здесь газосветные лампочки (тогда как лампочки накаливания светятся в пучностях тока).

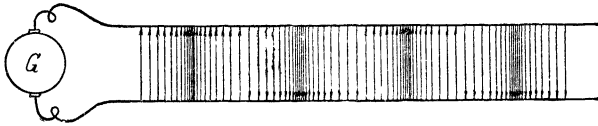


Рис 391. Электрическое поле стоячей волны.

В отличие от открытого диполя лехерова система даже при высоких и ультравысоких частотах генерируемых в ней колебаний дает малое излучение энергии в окружающее пространство.

Режим стоячих электромагнитных волн используется в применяемых на практике излучающих системах — *антеннах*.

Подключая генератор колебаний к середине антенного провода и подбирая соответствующим образом частоту, можно уложить в антенном проводе то или иное количество узлов и пучностей тока (рис. 392).

Когда длина проводника равна половине длины волны, то получается простейшая картина стоячей волны: пучность тока — в середине провода и узлы — на концах (на открытых концах проводника ток, очевидно, должен равняться нулю). Если бы мы измерили амперметром ток высокой частоты в различных точках провода, то получили бы ту картину распределения величины тока, которая дана на рис. 392, *а*. Эта простейшая картина соответствует тому случаю, когда генератор дает **р е з о н а н с н у ю ч а с т о т у** излучающего провода.

Увеличим теперь частоту питающего генератора в три раза. Очевидно, что длина волны уменьшится в три раза, и в проводе уложится уже не половина волны, а *три* полуволны (рис. 392, *б*). Так как на концах проводника должны быть узлы, то в середине провода будет пучность тока. Про этот случай говорят, что «антенна возбуждена на третьей гармонической частоте». Здесь мы опять имеем явление резонанса.

Увеличивая дальше частоту генератора, можно «возбудить антенну на пятой гармонической частоте» (рис. 392, в) и т. д.

Можно возбудить антенну и на четных гармонических частотах, однако при этом в середине провода получается узел тока; поэтому при таком возбуждении генератор приходится включать не в середине провода, а в какой-либо из пучностей тока (рис. 392, г).

Мы видим, что антенна (благодаря тому, что ее размеры сравнимы с длиной волны) обладает существенным свойством — *многократным резонансом*, в то время как колебательная система, составленная из конденсатора и катушки самоиндукции, обладает только одной резонансной частотой.

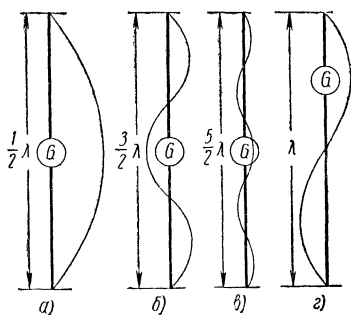


Рис. 392. Стоячие волны в симметричной излучающей системе.

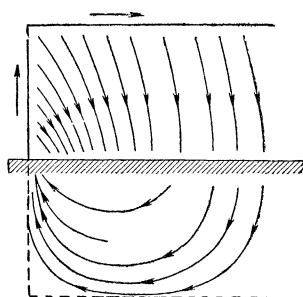


Рис. 393. Картина токов, индуцированных проводниками в земле.

Расположение антенны над поверхностью земли позволяет уменьшить длину антенны, ограничивая антенну одной ее ветвью и заменяя другую ее ветвь «зеркальным отражением антенны в земле». Один полюс генератора колебаний приключают к нижнему концу излучающего провода, а другой полюс заземляют. На рис. 393 схематически показано распределение почвенных токов; они дают грубое зеркальное отражение верхней части системы.

Горизонтальная система проводников длинноволновой антенны почти не излучает, так как ее поле ослабляется полем земных токов. *Основная часть энергии излучается вертикальным проводом и его зеркальным изображением*; излучение происходит главным образом в плоскости, перпендикулярной к излучающему проводу, т. е. по горизонтальным направлениям. При этом напряженность электрического поля направлена вертикально; электромагнитные волны поляризованы.

Увеличивая частоту, следовательно, уменьшая длину волны, можно уменьшить необходимые размеры антенны. Так, для частоты  $10^5$  гц длина волны равна 3000 м, и наименьшая длина излучателя (т. е. антенны, работающей на собственной частоте) равна половине

длины волны, т. е. 1500 м. Если заменить нижнюю ветвь излучателя поверхностью земли, необходимая длина сети будет все же 750 м. Для частоты же в 100 раз большей, т. е. для волны в 30 м, длина симметричного излучателя получается всего 15 м.

Обычно подобная коротковолновая антенна подвешивается горизонтально на некоторой высоте над землей; так как поместить питающий генератор в середине подвешенного проводника, очевидно, невозможно, энергия подводится к излучателю двумя проводниками, несущими бегущую волну (рис. 394).

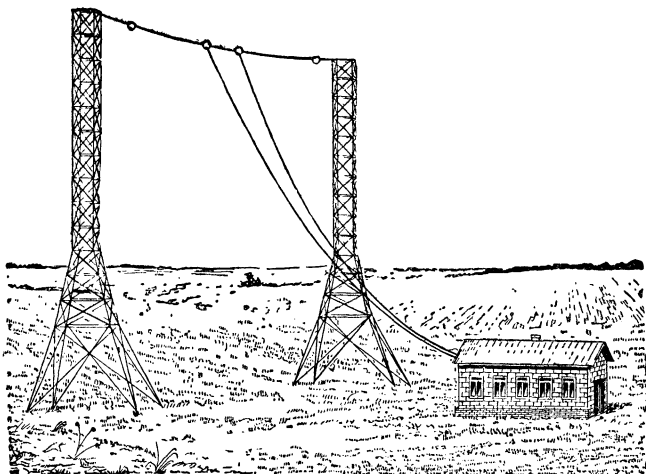


Рис. 394. Коротковолновая антенна.

Для линии, подводящей напряжение высокочастотных колебаний к антенне (эту проводящую линию называют *фидером*<sup>1)</sup>), режим стоячих волн непригоден: стоячие волны создаются отражением бегущей волны от конца линии; электромагнитная энергия возвращается к генератору, и нужного переноса энергии от генератора к антенне не происходит (то же можно сказать о радиоприемных устройствах, где фидер должен обеспечивать перенос энергии от антенны к приемнику).

Необходимый для фидера режим бегущих волн обеспечивается только в том случае, когда в конце фидера включено активное сопротивление, равное упомянутому выше волновому сопротивлению фидера. Тогда мощность бегущей волны полностью поглощается нагрузкой фидера и непрерывно происходит перенос энергии от генератора к антенне. Нагрузкой фидера, подключенного к антенне, является входное сопротивление антенны, которое определяется сопротивлением излучения антенны и сопротивлением, связанным

<sup>1)</sup> От англ. feed—п и т а т ь.

с потерями энергии в проводах антенны. Для длинных волн сопротивление излучения мало (доли ома, несколько омов), а потери значительны. В связи с этим к. п. д. этих антенн невелик (35—50%). Для коротких и, в особенности, ультракоротких волн соотношение более благоприятное.

Сопротивление излучения полуволнового вибратора Герца составляет 73,1 ом, а петлевой антенны А. А. Пистолькорса (широко применяемой для приема телевизионных передач) — около 300 ом; потери в них ничтожны. В этих случаях легко обеспечивается равенство: волновое сопротивление фидера  $\approx$  входное сопротивление антенны  $\approx$  сопротивление излучения.

Радиосвязь на длинных волнах осуществляют излучением волн, в которых электрическое поле направлено вертикально;

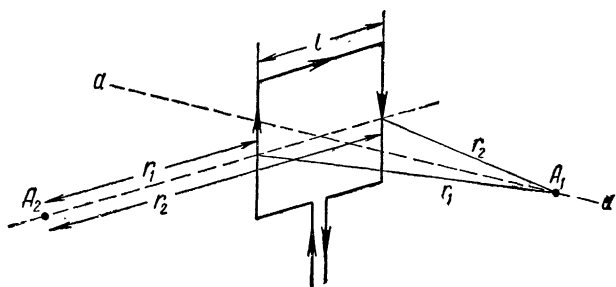


Рис 395 Рамка, обтекаемая переменным током.

поэтому и провода приемной антенны также располагают вертикально. Для уменьшения влияния промышленных помех радио- и телепередачи на волнах метрового диапазона обычно ведутся излучением волн с горизонтальной поляризацией (т. е. с горизонтальным направлением) электрического поля; поэтому в этом случае приемные антенны располагают горизонтально.

Все антенны имеют некоторую *направленность* создаваемого ими излучения. Так, для диполя Герца, как уже упоминалось, излучение является наибольшим в плоскости, перпендикулярной к оси поля. Рассмотрим, чем объясняется более острая направленность излучения, создаваемого замкнутым контуром переменного тока, например проводником, согнутым в виде квадратной рамки со стороной  $l$  (рис. 395). Электромагнитные импульсы, посылаемые противоположными сторонами квадрата, противоположны по знаку. Суммарная напряженность поля в какой-либо точке пространства  $A$  определяется расстояниями ее ( $r_1$  и  $r_2$ ) от сторон квадрата. Если эти расстояния равны, то для точки  $A_1$ , лежащей на линии  $aa$ , противоположные импульсы, достигающие точки  $A_1$  одновременно, уничтожают друг друга. Таким образом, излучение по оси рамки отсутствует.

Иной результат получается для точки  $A_2$ , лежащей в плоскости рамки. Здесь импульс, посылаемый правой стороной рамки, должен пробежать большее расстояние и достигает точки  $A_2$  позднее, чем импульс, посылаемый левой стороной рамки. Наиболее выгодный случай мы получим тогда, когда запаздывание будет точно равно половине периода; при этом в точку  $A_2$  будут приходить совпадающие импульсы, и мы получим заметное излучение в плоскости рамки. Очевидно, что это будет в том случае, когда сторона рамки  $l$  равна половине длины излучаемой волны.

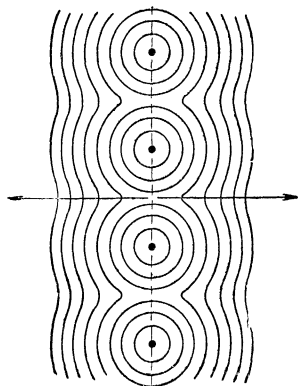


Рис 396. Поле ряда излучающих проводников (в плане) По мере увеличения расстояния от излучающей системы волна становится почти плоской,

Таким образом, мы приходим к выводу: *замкнутый провод, обтекаемый переменным током, излучает энергию главным образом в своей плоскости; излучение по оси, перпендикулярной к площади, обтекаемой током, отсутствует. Излучение ничтожно, если размеры проводника малы по сравнению с длиной волны; излучаемая энергия максимальна, когда диаметр круглой рамки равен половине длины волны.*

Компактность коротковолновых антенн дает возможность построить системы с еще более остро направленным излучением. Представим себе ряд одинаковых прямолинейных излучающих проводников, расположенных в одной плоскости (как частокол). Каждый из этих проводников дает волну, по форме близкую к шаровой. Однако, если ток в этих проводниках меняется одновременно, то суммарное их излучение образует плоскую волну (рис. 396). Излучение такой системы проводников направлено перпендикулярно к плоскости, в которой расположены проводники, при этом напряженность поля волны в точке приема складывается из напряжений полей отдельных излучающих проводников. Излучающая система такого типа позволяет получить пучок электромагнитных волн, заключенный внутри угла в  $10$ — $15^\circ$ . Очевидно, что для длинных волн подобная система становится неосуществимой из-за своей громоздкости.

Формирование и распространение ультракоротких (сантиметровых) электромагнитных волн может осуществляться в полостях, окруженных металлическими стенками (в полых резонаторах), и, в частности, в полостях металлических труб — в волноводах. Через отверстия, сделанные в стенках волновода, при верном расположении этих отверстий можно получить остро направленное излучение ультракоротких волн (*щелевые антенны*).

Используя ультракороткие волны сантиметрового диапазона и применяя правильно рассчитанные и хорошо сконструированные антенны, можно сконцентрировать большую часть излучаемой энергии в пределах угла, составляющего всего сотые доли градуса.

## § 91. Распространение электромагнитных волн. Роль ионосферы. «Радиоокно» в космос

Если бы излучающая система находилась в свободном пространстве вдали от Земли, то распространение электромагнитных волн происходило бы прямолинейно. Вследствие проводимости земной поверхности и вследствие ионизации атмосферы условия распространения электромагнитных волн на поверхности земного шара существенно отличны от условий их свободного распространения. Проводимость почвы обуславливает, во-первых, изменения направления распространения волн и, во-вторых, вызывает постепенное поглощение энергии волн при распространении волн вдоль земной поверхности.

На рис. 397 и 398 представлены картины поля электромагнитных волн, излучаемых вертикальной антенной и распространяющихся вдоль земной поверхности. На рис. 397 дан вертикальный разрез поля и показаны направление и (густотой линий) интенсивность электрических сил; рис. 398 показывает горизонтальный разрез поля и мгновенное распределение магнитных силовых линий.

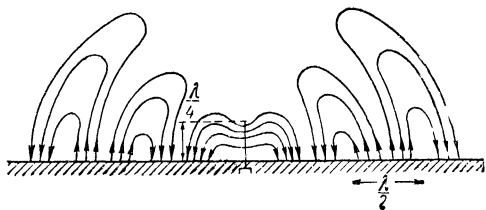


Рис. 397. Электрическое поле (в вертикальном разрезе) излучения вертикальной антенны.

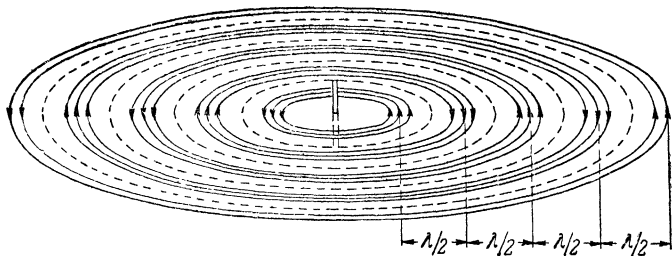


Рис. 398. Магнитное поле (в горизонтальном разрезе) излучения вертикальной антенны.

Влияние ионизации атмосферы отчасти сходно с влиянием проводимости земли, но при распространении коротких волн ионизация