

Лекция 30

Электромагнитные волны

Вопросы. Плоские электромагнитные волны, скорость их распространения. Излучение электромагнитных волн. опыты Герца. Объемная плотность энергии электромагнитного поля. Поток энергии. Вектор Умова–Пойнтинга. Изобретение радиосвязи Поповым. Принцип радиосвязи. Шкала электромагнитных волн.

30.1. Электромагнитные волны

Согласно теории Максвелла электромагнитное поле, которое возникает в контуре или вокруг проводников с переменными токами, распространяется в пространстве в виде электромагнитных волн. Очевидно, что характеристики волн, т. е. период, время, частота и длина волны, зависят от параметров контура: его индуктивности L и емкости C . Для того чтобы волны распространялись в пространстве, колебательные контуры делают открытыми.

Существование электромагнитных волн следует непосредственно из уравнений Максвелла. Выведем уравнение плоской электромагнитной волны. Для этого используем уравнения Максвелла (29.8) и (29.9) с учетом выражений (29.23) и (29.24):

$$\oint_l H_l dl = \frac{\partial}{\partial t} \oint_S D_n dS = \epsilon_0 \epsilon \frac{\partial E}{\partial t} \oint_S dS, \quad (30.1)$$

$$\oint_l E_l dl = -\frac{\partial}{\partial t} \oint_S B_n dS = \mu_0 \mu \frac{\partial H}{\partial t} \oint_S dS. \quad (30.2)$$

Представим, что волна распространяется вдоль координатной оси OX , при этом вектор напряженности электрического поля волны $\vec{A}$ колеблется вдоль оси OZ , а вектор напряженности магнитного поля $\vec{H}$ – вдоль оси OY (рис. 30.1). Так как уравнения (30.1) и (30.2) справедливы для контуров любых размеров, формы и ориентации в поле, то для их использования выберем соответственно два элементарных контура: $oabco$ и $ofedo$. Векторы $\vec{H}$ и $\vec{A}$ являются функциями координат, поэтому их значения в разных местах выделенных контуров будут различными. Если в начале системы отсчета значения этих векторов равны соответственно H и E , то спустя промежуток времени dt , когда волна переместится на расстояние dx , их значения станут равными:

$$H + \frac{\partial H}{\partial x} dx + \frac{\partial H}{\partial y} dy \text{ и } E + \frac{\partial E}{\partial x} dx.$$

На рис. 30.1 приведены значения H и E на концах элементарных участков выделенных контуров.

Рассчитаем циркуляцию вектора $\vec{H}$ по контуру $oabco$ и циркуляцию вектора $\vec{E}$ по контуру $ofedo$. Значения произведений $H_l dl$ на участках контуров oa и bc , а произведений $E_l dl$ на участках od и ef равны нулю. На участках ab и oc , а также de и of возьмем произведение длины каждого участка на средние значения величин H и E в пределах этих участков. Получим:

$$\oint_{oabco} H_l dl = \frac{1}{2} dy \left[\left(H + \frac{\partial H}{\partial x} dx + H + \frac{\partial H}{\partial x} dx + \frac{\partial H}{\partial y} dy \right) - \left(H + \frac{\partial H}{\partial y} dy + H \right) \right] = \frac{\partial H}{\partial x} dx dy, \quad (30.3)$$

$$\oint_{ofedo} E_l dl = \frac{1}{2} dz \left[\left(E + E + \frac{\partial E}{\partial z} dz \right) - \left(E + \frac{\partial E}{\partial x} dx + \frac{\partial E}{\partial z} dz + E + \frac{\partial E}{\partial x} dx \right) \right] = -\frac{\partial E}{\partial x} dx dz. \quad (30.4)$$

Подставим (30.3), (30.4) соответственно в выражения (30.1) и (30.2), примем во внимание, что $dx dy = dS$ и получим:

$$\frac{\partial H}{\partial x} = \epsilon_0 \epsilon \frac{\partial E}{\partial t}, \quad (30.5)$$

$$\frac{\partial E}{\partial x} = \mu_0 \mu \frac{\partial H}{\partial t}. \quad (30.6)$$

Продифференцируем (30.5) и (30.6) по времени, после чего получим:

$$\frac{\partial H}{\partial x \partial t} = \epsilon_0 \epsilon \frac{\partial^2 E}{\partial t^2};$$

$$\frac{\partial E}{\partial x \partial t} = \mu_0 \mu \frac{\partial^2 H}{\partial t^2}.$$

Продифференцируем (30.5) и (30.6) по координате x , после чего получим:

$$\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} = \epsilon_0 \epsilon \frac{\partial E}{\partial x \partial t};$$

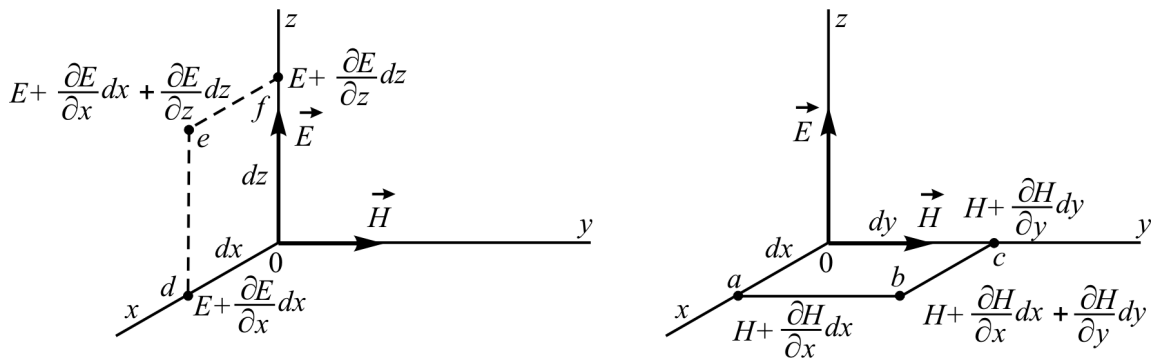


Рис. 30.1

$$\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} = \mu_0 \mu \frac{\partial H}{\partial x \partial t},$$

откуда следует:

$$\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} = \varepsilon_0 \varepsilon \mu_0 \mu \frac{\partial^2 H}{\partial t^2}, \quad (30.7)$$

$$\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} = \varepsilon_0 \varepsilon \mu_0 \mu \frac{\partial^2 E}{\partial t^2}. \quad (30.8)$$

Обозначим через

$$v = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \varepsilon \mu_0 \mu}} \quad (30.9)$$

и вместо (30.7) и (30.8) получим выражения в виде двух волновых уравнений:

$$\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 H}{\partial t^2}, \quad (30.10)$$

$$\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2}, \quad (30.11)$$

где v – скорость волны.

Для вакуума $\varepsilon = 1$ и $\mu = 1$, поэтому

$$v = c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с.}$$

Решением уравнений (30.10) и (30.11) является уравнение бегущей волны:

$$H = H_0 \sin \omega \left(t - \frac{x}{v} \right), \quad (30.12)$$

$$E = E_0 \sin \omega \left(t - \frac{x}{v} \right). \quad (30.13)$$

Продифференцируем (30.12) и (30.13) по времени, после чего получим:

$$\frac{\partial H}{\partial t} = H_0 \omega \cos \omega \left(t - \frac{x}{v} \right), \quad (30.14)$$

$$\frac{\partial E}{\partial t} = E_0 \omega \cos \omega \left(t - \frac{x}{v} \right). \quad (30.15)$$

Подставив (30.14) и (30.15) соответственно в (30.6) и (30.7), получим выражения:

$$\frac{\partial H}{\partial x} = \varepsilon_0 \varepsilon E_0 \omega \cos \omega \left(t - \frac{x}{v} \right), \quad (30.16)$$

$$\frac{\partial E}{\partial x} = \mu_0 \mu H_0 \omega \cos \omega \left(t - \frac{x}{v} \right). \quad (30.17)$$

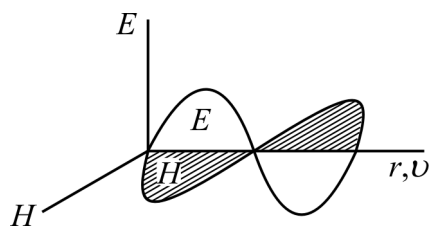


Рис. 30.2

Величину

Проинтегрируем выражения (30.16) и (30.17) по x и получим соотношения между E и H :

$$H = \sqrt{\frac{\epsilon_0 \epsilon}{\mu_0 \mu}} E \text{ или } E = \sqrt{\frac{\mu_0 \mu}{\epsilon_0 \epsilon}} H,$$

откуда следует, что

$$\epsilon_0 \epsilon E^2 = \mu_0 \mu H^2. \quad (30.18)$$

$$Z = \sqrt{\frac{\mu_0 \mu}{\epsilon_0 \epsilon}} \quad (30.19)$$

называют *волновым сопротивлением (импедансом) среды*. Тогда $E = ZH$, откуда следует, что векторы $\vec{H}$ и $\vec{E}$ в волне колеблются в одинаковой фазе. Так как эти векторы перпендикулярны направлению распространения волны, то электромагнитную волну называют *поперечной* (рис. 30.2).

30.2. Излучение электромагнитных волн.

Опыты Герца

Электромагнитные волны впервые экспериментально получил Г. Герц (1887–1975) в 1888 г. Для этого он использовал открытый колебательный контур, который позднее назвали *вибратором Герца*. При колебаниях в закрытом колебательном контуре электрическое поле конденсатора и магнитное поле катушки разграничены в пространстве (электрическое поле в основном сконцентрировано между обкладками конденсатора, а магнитное поле в середине катушки индуктивности). В пространстве вокруг закрытого колебательного контура его электрическое и магнитное поля практически отсутствуют.

Если обкладки конденсатора раздвигать, отдаляя их друг от друга, электрическое поле конденсатора будет охватывать все большую и большую область пространства. Если, кроме того, растянуть витки катушки так, чтобы она вытянулась в прямолинейный провод, то магнитное поле катушки также будет занимать все большую и большую область пространства, причем электрическое и магнитное поля будут совмещаться в одной и той же области (рис. 30.3).



Рис. 30.3

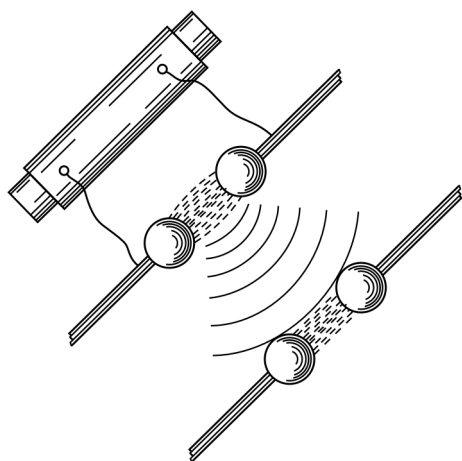


Рис. 30.4

Связь полей между собой обеспечивается тем, что они порождаются одним и тем же процессом – процессом колебаний в контуре. Действительно, изменение электрического поля со временем вызывает перемещение зарядов, т. е. возбуждает в проводе ток, который создает в пространстве вокруг себя магнитное поле. Значит, изменение электрического поля с течением времени ведет к изменению магнитного поля в пространстве. И наоборот, изменение магнитного поля вызывает ЭДС на разных участках провода и, значит, изменение в пространстве электрического поля.

Переменное электромагнитное поле, которое образуется вокруг открытого контура, распространяется в пространстве в виде электромагнитных волн.

Вибратор Герца состоит из двух проводников одинаковой длины, разделенных небольшим воздушным зазором, который называют искровым промежутком. На рис. 30.4 изображен вибратор Герца, который включен последовательно в цепь вторичной обмотки индукционной катушки, которая представляет собой повышающий высоковольтный импульсный трансформатор с низкочастотным механическим прерывателем на входе. Катушка состоит из двух обмоток, навитых на общий железный сердечник. Первичная обмотка подключается к источнику постоянного тока через механический прерыватель. При замыканиях и размыканиях цепи первичной обмотки во вторичной обмотке возникает ЭДС индукции, которая достигает 20–25 кВ.

Половинки вибратора подключены к концам вторичной обмотки катушки и заряжаются от нее до высокой разности потенциалов. Если эта разность потенциалов достигает значения, достаточного для пробоя воздушного зазора, между ними проскакивает искра. Искра играет роль проводящего мостика, который соединяет половинки вибратора, в один проводник. При этом в вибраторе возникают электромагнитные колебания высокой частоты. Для того чтобы переменный ток высокой частоты, который возникает в вибраторе, при колебаниях не шел во вторичную обмотку катушки, между половинками вибратора и концами вторичной обмотки включаются дроссели (катушки с большой индуктивностью).

За время существования искры происходит несколько десятков колебаний, пока из-за потерь энергии на активном сопротивлении вибратора и за счет излучения электромагнитных волн разность потенциалов между половинками вибратора не уменьшается до значения, при котором искровой разряд прекращается.

После этого наступает сравнительно большой промежуток времени, когда вибратор не излучает, а его половинки снова заряжаются до напряжения, при котором происходит пробой. Время зарядки обычно в десятки раз больше времени разрядки. Если разность потенциалов достигает значения, при котором происходит пробой воздушного промежутка, проскакивает вторая искра, и процесс повторяется. Поэтому электромагнитные волны, излучаемые вибратором, представляют собой серию затухающих импульсов малой длительности и малой интенсивности.

Прием электромагнитных волн в исследованиях Герца осуществлялся при помощи такого же приемного вибратора, позднее названного резонатором Герца. Электромагнитная волна, которая дошла до резонатора, возбуждала в нем электромагнитные колебания, о наличии которых можно было судить по маленькой искре, которая проскакивала в искровом промежутке резонатора (или по свечению разрядной трубки, электроды которой были соединены с искровым промежутком).

Основным недостатком приемной аппаратуры Герца была низкая чувствительность ее приемной части (искра или свечение разрядной трубки были очень слабыми и могли наблюдаться только в темноте на расстоянии в несколько метров от вибратора).

30.3. Энергия электромагнитных волн. Радиосвязь

Энергия, которую переносит электромагнитная волна, состоит из двух частей – электрической и магнитной:

$$W = W_{\text{э}} + W_{\text{м}}.$$

Объемная плотность энергии также состоит из двух частей:

$$\omega = \frac{W}{V} = \omega_{\text{э}} + \omega_{\text{м}} = \frac{\epsilon_0 \epsilon E^2}{2} + \frac{\mu_0 \mu H^2}{2} = \frac{1}{2} (\epsilon_0 \epsilon E^2 + \mu_0 \mu H^2),$$

или с учетом выражения (30.18)

$$\omega = \sqrt{\epsilon_0 \epsilon} E \sqrt{\mu_0 \mu} H = \sqrt{\epsilon_0 \epsilon \mu_0 \mu} E H = \frac{EH}{v}. \quad (30.20)$$

Рассчитаем плотность потока S энергии электромагнитного поля, т. е. количество энергии, приходящейся на нормально ориентированную площадку поверхностью $\Delta S = 1 \text{ м}^2$ за время $\Delta t = 1 \text{ с}$:

$$S = \frac{W}{\Delta S \Delta t} = \frac{\omega V}{\Delta S \Delta t} = \frac{\omega \Delta S v \Delta t}{\Delta S \Delta t} = \omega v = \frac{EH}{v} v = EH, \quad (30.21)$$

а в векторном виде:

$$\vec{S} = \omega \vec{v}, \quad (30.22)$$

или

$$\vec{S} = [\vec{E} \times \vec{H}]. \quad (30.23)$$

$\vec{S}$ называют *вектором Умова–Пойнтинга*. Это вектор, совпадающий по направлению со скоростью волны, ввел в 1884 г. Дж. Пойнтинг (1852–1914), воспользовавшись результатами теоретических исследований М.А. Умова (1846–1915), который ввел аналогичный вектор в 1874 г. для звуковых волн.

При использования электромагнитных волн для передачи информации необходима достаточно большая мощность излучения и чувствительный приемник, который смог бы регистрировать электромагнитные колебания, которые излучаются передатчиком, на больших расстояниях от последнего.

Русский физик А.С. Попов (1859–1906) установил, что интенсивность излучения можно значительно увеличить, если к одной половинке вибратора Герца подключить антенну, а вторую заземлить. Антенна, которая является открытым колебательным контуром, излучает в пространство электромагнитные волны достаточно большой интенсивности. Волны, достигшие антенны приемника, возбуждают в ней переменные электрические токи высокой частоты. В качестве чувствительного элемента для регистрации этих токов А.С. Попов использовал когерер, который представляет собой стеклянную трубку с двумя электродами, между которыми находится металлический порошок. Частицы металлического порошка в трубке когерера упакованы неплотно, поэтому его сопротивление в обычных условиях составляет примерно 100 кОм. Если через когерер пропустить переменный ток высокой частоты, происходит спекание частиц порошка в точках их соприкосновения. При этом сопротивление когерера уменьшается в несколько сотен раз. Сильная зависимость сопротивления металлического порошка от электромагнитного излучения обуславливает значительно более высокую чувствительность когерера по сравнению с чувствительностью резонатора Герца. Поэтому когерер, включенный в цепь постоянного тока, может управлять работой этой цепи, например, включать и выключать электрический звонок или печатный станок телеграфного аппарата при наличии специального прибора, способного после регистрации электромагнитной волны возвращать когерер в исходное положение (встряхивать порошок).

А.С. Попов сконструировал прибор, который автоматически, при помощи электромагнитного реле, восстанавливал высокое сопротивление когерера. Реле позволило Попову не регистрировать непосредственно волны, которые принимаются антенной, а использовать их малую энергию, для того чтобы управлять источником энергии, которая питает аппарат, регистрирующий волны.

Для осуществления радиосвязи используют электромагнитные волны с частотой от 30 кГц до 30 ГГц. Это обусловлено следующими причинами. Теоретический расчет показывает, что интенсивность излучения электромагнитных

волн антенной передатчика пропорциональна четвертой степени частоты колебаний. Поэтому использование низкочастотных электромагнитных колебаний для радиосвязи нецелесообразно из-за необходимости передатчиков большой мощности. Для получения электромагнитных волн большой интенсивности антенна, которая их излучает, должна быть настроена в резонанс с задающим генератором. Если такой антенной является прямолинейный провод, то его длина l связана при резонансе с длиной электромагнитной волны излучения соотношением $\lambda = 2l$. Поэтому применение низких частот требует очень больших антенн, что также нецелесообразно. Кроме того, чем выше диапазон частот, тем больше независимых радиостанций можно в нем разместить. Электромагнитные волны, используемые для радиосвязи, называют радиоволнами. С учетом качественных особенностей распространения, способов генерации, излучения и приема радиоволны можно разделить на четыре диапазона.

Длинные волны (диапазон ДВ) – радиоволны длиной от 10 км до 1 км, что соответствует частотам от 30 кГц до 300 кГц. Этот диапазон занимает полосу частот шириной 270 кГц. Поскольку для передачи одной радиовещательной программы требуется частотный канал шириной, не менее 9 кГц (при этом могут создаваться наиболее высокие или низкие частоты, но общий характер звучания передается достаточно отчетливо), то в диапазоне ДВ может находиться не более 30 радиовещательных каналов.

Средние волны (диапазон СВ) – радиоволны длиной от 1000 м до 100 м, что соответствует частотам от 300 кГц до 3 МГц. Полоса частот, которая соответствует этому диапазону, составляет 2,7 МГц и имеет 300 каналов.

Короткие волны (диапазон КВ) – от 100 м до 10 м, частоты – от 3 МГц до 30 МГц соответственно. Этот диапазон шире диапазона длинных и средних волн в 9 раз. Коротковолновые антенны имеют достаточно острую направленность, поэтому на одной и той же частоте могут одновременно работать без взаимных помех несколько станций, которые вещают в разных направлениях.

Ультракороткие волны (диапазон УКВ) – радиоволны длиной от 10 м до 1 см, что соответствует частотам от 30 МГц до 30 ГГц. Диапазон УКВ делится на три диапазона: метровые волны (1 ÷ 10 м), дециметровые волны (10 ÷ 100 см) и сантиметровые волны (1 ÷ 10 см). Главная отличия этого диапазона – его ширина, почти 30000 МГц, поэтому в этом диапазоне можно передавать информацию, которая имеет широкий спектр (набор) частот, например, радиосигналы телевидения, осуществлять радиолокацию, космическую радиосвязь и др. Следует заметить, что прием в этом диапазоне является устойчивым при наличии прямой видимости между антеннами передатчика и приемника.

Для передачи по радио звуковой информации необходимо изменять во времени один из параметров радиоволн, которые излучаются передатчиком, в соответствии с изменениями во времени звуковых колебаний, которые несут

передаваемую информацию; это значит необходимо осуществить *модуляцию*. Модуляцией электромагнитной волны называется изменение ее параметров (амплитуды, частоты, фазы) с частотами, значительно меньшими, чем частота самой электромагнитной волны. Частота исходной (немодулированной) волны называется *несущей* частотой, а частота изменения параметров волны при модуляции – *частотой модуляции*.