

## Тема: **Электромагнитные волны (ЭМВ)**

### Содержание лекции:

- 7.1. Генерация ЭМВ;
- 7.2. Дифференциальное уравнение ЭМВ;
- 7.3. Экспериментальное исследование ЭМВ;
- 7.4. Энергия ЭМВ. Импульс ЭМВ.
- 7.5. Излучение диполя.

## 7.1. Генерация ЭМВ

Согласно Максвеллу, изменяющееся электрическое поле порождает в пустом пространстве магнитное поле. На этом основании Максвелл пришел к следующему заключению. Если изменяющееся магнитное поле приводит к появлению электрического поля, то электрическое поле также будет изменяться. Это изменение электрического поля приведет в свою очередь к появлению изменяющегося магнитного поля и т.д. Анализируя свои уравнения, Максвелл обнаружил, что в конечном итоге подобной связи изменяющихся полей будет появление волны, которая содержит электрическое и магнитное поля и способна распространяться в пустом пространстве! Попробуем качественно разобраться в том, как возникает подобная ЭМВ.

Рассмотрим “антенну” из двух проводящих стержней. Допустим, что стержни через ключ соединены с клеммами батареи. При замыкании ключа верхний стержень быстро приобретает положительный заряд, а нижний- отрицательный. Силовые линии электрического поля показаны на рис.7.1,б.

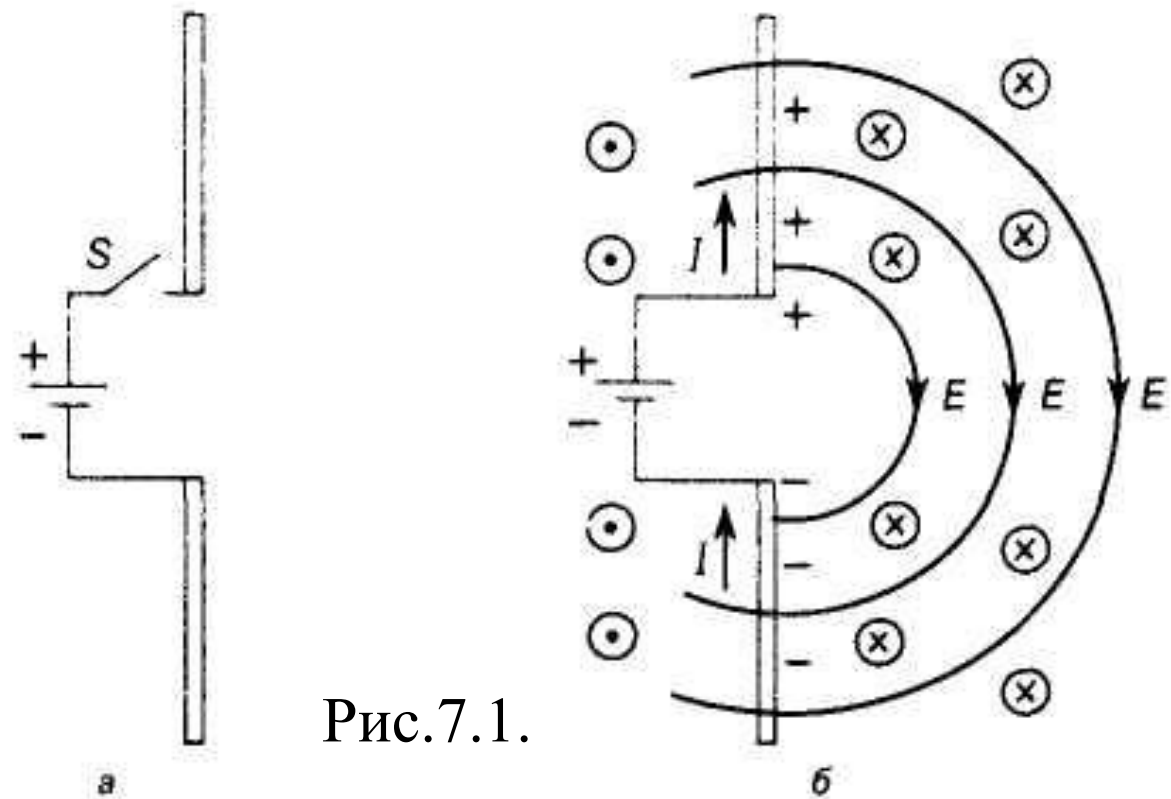


Рис.7.1.

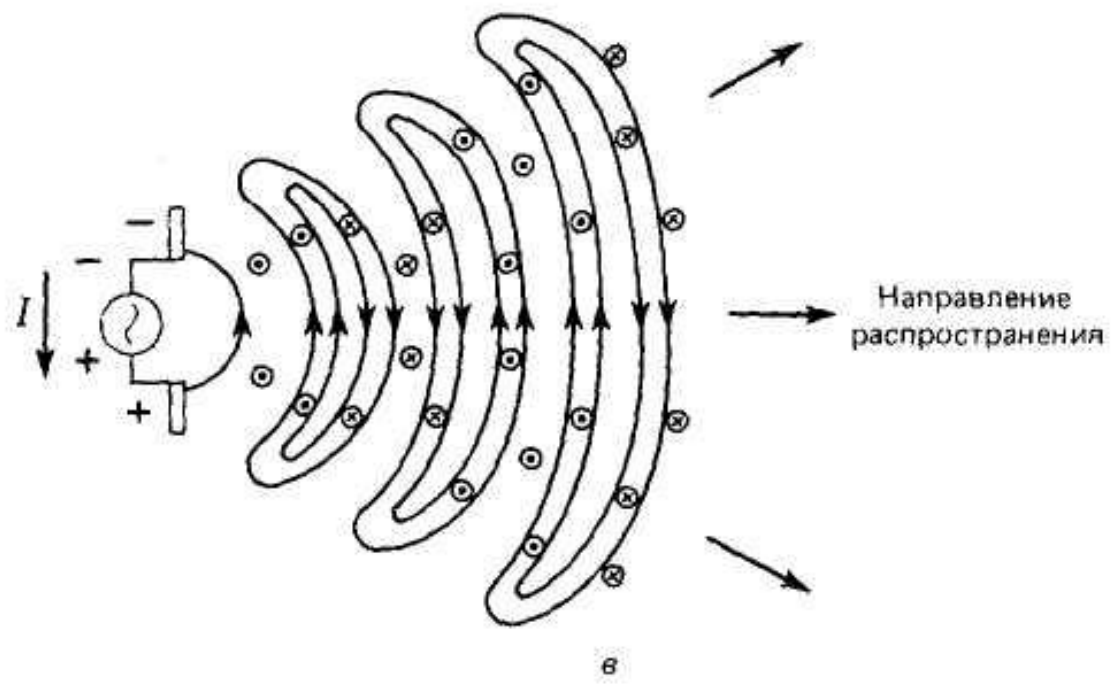
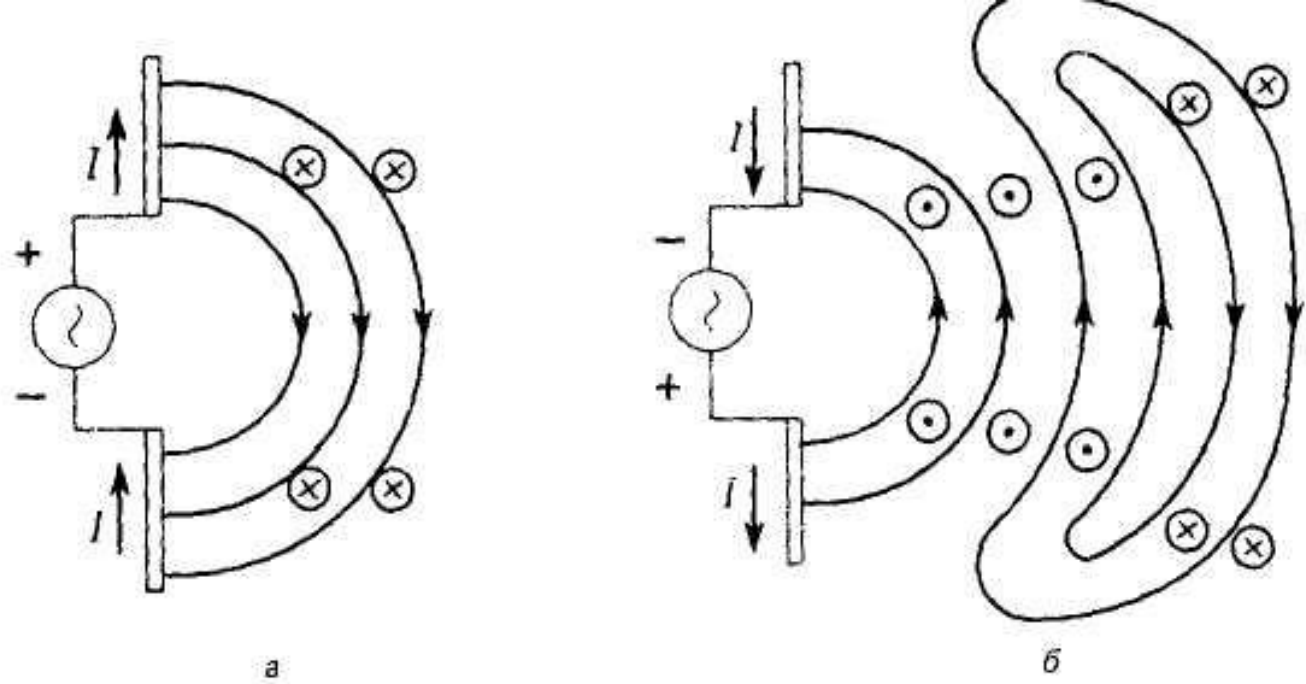
Пока заряды перемещаются к стержням, в антенне течет электрический ток  $I$  (стрелка указывает направление движения тока положительных зарядов).

Электрическое поле создает магнитное поле; силовые линии

индукции магнитного поля представляют собой окружности, охватывающие стержни антенны; на рисунке вектор индукции  $B$  направлен к плоскости страницы справа от стержня  $\otimes$  и от плоскости страницы слева от стержня  $\odot$ . Насколько далеко эти поля распространяются в пространстве? В статическом случае они уходили бы в бесконечность. Однако при замыкании ключа эти поля быстро возникают вблизи стержней, но для того, чтобы

достичь удаленных точек, потребуется время: и электрические и магнитные поля обладают энергией, а энергия не может переноситься с бесконечно большой скоростью. Этот пример служит иллюстрацией того, что электрическому и магнитному полям, чтобы достигнуть удаленных точек, требуется время. Представим себе теперь более интересную ситуацию. Предположим, что антенна подключена к генератору переменного тока (рис.7.2) (В этом случае она называется электрическим дипольным вибратором: в любой момент времени в системе существует разделение положительных и отрицательных зарядов, и ее дипольный момент осциллирует). На рис.7.2.а антенна только что подключена к генератору; на стержнях сейчас положительный заряд, и картины полей выглядят как на рис.7.1.б. Знаки  $+$  и  $-$  — соответствуют полярности зарядов на стержнях. Стрелки указывают направление тока. Электрическое поле изображено силовыми линиями в плоскости рисунка, а магнитное поле, согласно правилу левой руки, направлено к плоскости страницы  $\otimes$  или от нее  $\odot$ . На рис.7.2.б ЭДС генератора проходит через максимум

Рис.7.2.



и начинает убывать; ток в системе течет в противоположном направлении, и его магнитное поле направлено в противоположную сторону. Однако, существовавшие до этого поля внезапно не исчезают: они распространяются в пространстве. Поскольку направление вновь возникших полей противоположно прежнему, силовые линии полей «замыкаются» и образуют замкнутые контуры. Спустя некоторое время эта картина силовых линий принимает вид, показанный на рис. 7.2,в (обратите внимание на изменение масштаба). Силовые линии полей продолжают распространяться от вибратора. Магнитные силовые линии также замкнуты. Поля продолжают распространяться в пространстве, удаляясь от антенны. Они распространяются во все стороны, а не только вправо, как показано на рис.7.2. Напряженность электрического поля  $\mathbf{E}$  и индукция магнитного поля  $\mathbf{B}$  максимальны в направлениях, перпендикулярных направлению колебаний заряда в вибраторе; вдоль направления колебаний заряда – над и под антенной – поля обращаются в нуль.

Из рис.7.2. можно сделать несколько выводов. Во-первых, в любой точке вектора  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{B}$  взаимно  $\perp$  и  $\perp$  направлению распространения. Во-вторых, поля изменяют свое направление в пространстве: в одних точках вектор  $\mathbf{B}$  направлен к плоскости страницы, в других – от нее; аналогично ведет себя и вектор  $\mathbf{E}$ . Напряженность электрического поля (и индукция магнитного поля) изменяется от максимума в одном направлении до нуля и возрастает до максимума в другом направлении. Электрическое и магнитное поля находятся в фазе, т.е. они достигают максимума и обращаются в нуль в одних и тех же точках.

Если ЭДС генератора изменяется по синусоидальному закону, то и напряженность электрического поля и магнитного поля будут изменяться по синусоидальному закону. Строго говоря, это справедливо в точках, достаточно удаленных от источника; вблизи антенны (в так называемом ближнем поле) картина полей

оказывается довольно сложной. Нас интересуют поля на достаточном удалении от антенны (поля излучения); именно этой ситуации соответствует картина, изображенная на рис. 7.2,в. Здесь, правда невозможно усмотреть синусоидальный характер изменения удаленных полей или полей излучения, т.к. изображены только силовые линии. На рис 7.3 показано изменение напряженности электрического поля и индукции магнитного поля в пространстве в фиксированный момент времени; видно, что векторы  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{B}$   $\perp$  друг другу и направлению распространения.

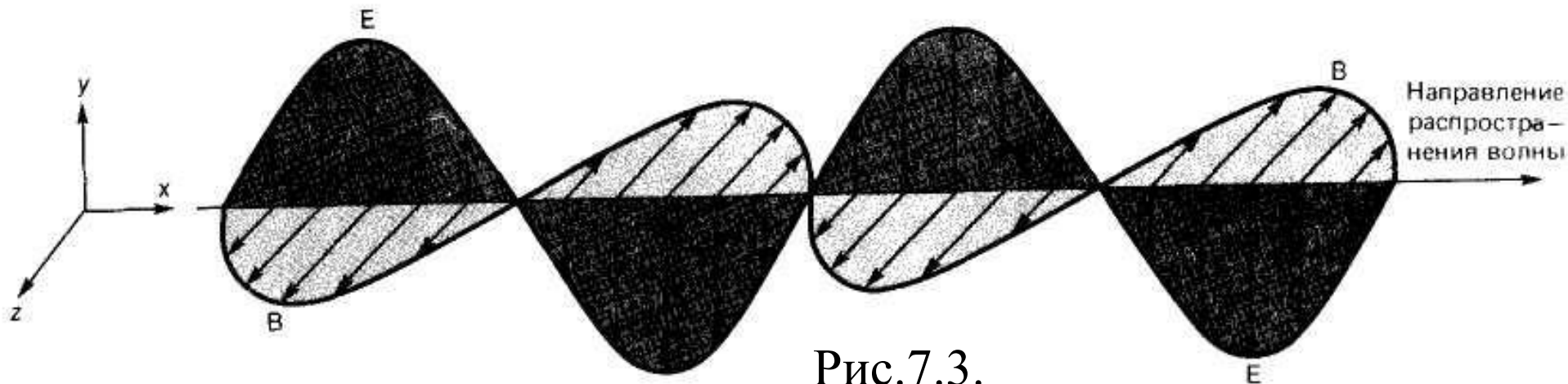


Рис.7.3.



Электромагнитные волны представляют собой поперечные волны и аналогичны другим типам волн. Однако в ЭМВ происходят колебания полей!!!, а не вещества!!!, как в случае волн на воде или в натянутом шнуре.

Таким образом, ЭМВ генерируются колеблющимися, т.е. движущимися с ускорением электрическими зарядами. Справедливо и общее утверждение: движущийся с ускорением электрический заряд испускает электромагнитные волны.

## 7.2. Дифференциальное уравнение ЭМВ

Одним из важнейших следствий уравнений Максвелла является существование ЭМВ. Можно показать, что для однородной и изотропной среды вдали от зарядов и токов, создающих электромагнитное поле, из уравнений Максвелла следует, что векторы напряженности и электромагнитного поля удовлетворяют волновому уравнению типа

$$\nabla^2 \vec{E} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \quad (7.2.1)$$

$$\nabla^2 \vec{H} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} \quad (7.2.2)$$

где  $\nabla = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial t^2}$  – оператор Лапласа,  $v$  – фазовая скорость.

Всякая функция, удовлетворяющая уравнениям (7.2.1) и (7.2.2), описывает некоторую волну. Следовательно, электромагнитные поля действительно могут существовать в виде ЭМВ. Фазовая скорость ЭМВ определяется выражением

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\epsilon \mu}} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon \mu}} \quad (7.2.3)$$

где  $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$ ,  $\epsilon_0$  и  $\mu_0$  – соответственно электрические и магнитные постоянные,  $\epsilon$  и  $\mu$  – соответственно электрическая и магнитная проницаемость среды.

В вакууме ( при  $\epsilon = 1$  и  $\mu = 1$  ) скорость распространения ЭМВ совпадает со скоростью распространения света  $C$ . Т.к.  $\epsilon \mu > 1$ , то скорость распространения ЭМВ в среде всегда меньше, чем в вакууме.

При вычислении скорости распространения ЭМП по формуле (7.3) получается результат, достаточно хорошо совпадающий с экспериментальными данными, если учитывать зависимость  $\epsilon$  и  $\mu$  от частоты. Совпадение размерного коэффициента в (7.3) со скоростью распространения света в вакууме указывает на глубокую связь между электромагнитными и оптическими явлениями, позволившую Максвеллу создать электромагнитную теорию света, согласно которой свет представляет собой электромагнитные волны.

Следствием теории Максвелла является поперечность ЭМВ: векторы напряженностей магнитного и электрического полей волны взаимно перпендикулярны и лежат в плоскости, перпендикулярной вектору скорости распространения волны, причем векторы  $\mathbf{H}$ ,  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{v}$  образуют правовинтовую систему. Из уравнений Максвелла следует также, что в электромагнитной волне

векторы  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{H}$  всегда колеблются в одинаковых фазах, причем амплитудные значения  $E_m$  и  $H_m$  связаны соотношением

$$E_m \sqrt{\epsilon_0 \epsilon} = H_m \sqrt{\mu_0 \mu} \quad (7.2.4)$$

Следовательно  $E$  и  $H$  одновременно достигают максимума, одновременно обращаются в нуль и т. д. От уравнений (7.2.1) и (7.2.2) можно перейти к уравнениям

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 E_y}{\partial t^2} \quad (7.2.5)$$

$$\frac{\partial^2 H_z}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 H_z}{\partial t^2} \quad (7.2.6)$$

где соответственно -  $y$  и  $z$  при  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{H}$  подчеркивают лишь то, что векторы  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{H}$  направлены вдоль взаимно перпендикулярных осей  $y$  и  $z$ .

Уравнениям (7.2.5) и (7.2.6) удовлетворяют, в частности, плоские монохроматические электромагнитные волны (ЭМВ одной строго определенной частоты), описываемые уравнениями

$$E_y = E_m \cos(\omega t - kx + \phi), \quad (7.2.7)$$

$$H_z = H_m \cos(\omega t - kx + \phi) \quad (7.2.8)$$

где  $E_m$  и  $H_m$  - соответственно амплитуды напряженностей электрического и магнитного полей волны,  $\omega$  - круговая частота,  $k = \omega/v$  волновое число,  $\phi$  - начальные фазы колебаний в точках с координатой  $x = 0$ . В уравнениях (7.2.7) и (7.2.8)  $\phi$  одинаково, т.к. колебания электрического и магнитного векторов в ЭМВ происходит в одинаковых фазах.

## 6.3. Волновые уравнения

Оказывается, что уравнение любой волны есть решение некоторого дифференциального уравнения, называемого *волновым*. Найдем общий вид волнового уравнения. Для этого продифференцируем дважды уравнение плоской волны по  $t$  и всем координатам

$$\xi = A \cos(\omega t - kr) \quad (6.3.1)$$

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = -\omega^2 A \cos(\omega t - kr) = -\omega^2 \xi$$

$$\xi = -\frac{1}{\omega^2} \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} \quad (6.3.2)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} &= -k_x^2 A \cos(\omega t - kr) = -k_x^2 \xi \\ \frac{\partial^2 \xi}{\partial y^2} &= -k_y^2 A \cos(\omega t - kr) = -k_y^2 \xi \\ \frac{\partial^2 \xi}{\partial z^2} &= -k_z^2 A \cos(\omega t - kr) = -k_z^2 \xi \end{aligned} \right\} (6.3.3)$$

сложим уравнения (6.3.3):

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 \xi}{\partial y^2} = \frac{\partial^2 \xi}{\partial z^2} = -(k_x^2 + k_y^2 + k_z^2) \xi = -k^2 \xi \quad (6.3.4)$$

подставим из (6.3.2) значение  $\xi = -\frac{1}{\omega^2} \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2}$ , получим

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \xi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \xi}{\partial z^2} = \frac{k^2}{\omega^2} \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} \text{ учтем, что } v = \frac{\omega}{k}, \text{ а } \frac{k}{\omega} = \frac{1}{v}$$

и получим

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \xi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \xi}{\partial z^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} \quad (6.3.5)$$

Всякая функция удовлетворяющая уравнению (6.3.5), описывает некоторую волну; причем корень квадратный из величины, обратный коэффициенту при  $\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2}$  дает фазовую скорость волны.

Можно записать уравнение (6.3.5) короче, используя оператор Лапласа:

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}, \text{ тогда } \Delta \xi = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} \quad (6.3.6)$$



**Показать, что**

$$E = E_m \cos(\omega t - kr + \phi),$$

$$H = H_m \cos(\omega t - kr + \phi)$$

**удовлетворяют уравнению 6.3.5 или 6.3.6.**

### **7.3. Экспериментальное исследование ЭМВ**

Экспериментальная проверка вывода теории Максвелла о существовании ЭМВ была осуществлена Герцем в 1887 – 1888г.г. Для получения волн Герц применил изобретенный им вибратор, состоящий из двух стержней, разделенных искровым промежутком (рис. 7.4).

В колебательном контуре, образованном конденсатором  $C$  и катушкой  $L$  (рис. 7.5,*a*), электрическое поле сосредоточено в зазоре между обкладками, а магнитное – внутри катушки. В окружающем конденсатор и катушку пространстве поля практически равны нулю, поэтому заметного излучения волн не происходит. Чтобы излучение играло заметную роль, нужно сделать области, в которых

возникает поле, менее обособленным от окружающего пространства. Этого можно достигнуть, увеличивая расстояние между обкладками конденсатора и между витками катушки (рис. 7.5, б и в).

В пределе мы приходим к вибратору Герца (рис. 7.5, з). В процессе видоизменений, изображенных на рисунке 7.5, а - з, сильно уменьшается емкость и индуктивность контура, что также выгодно, так как приводит к увеличению частоты колебаний, а, следовательно, к уменьшению длины волны. С волнами меньшей длины легче экспериментировать. Герц достиг частот порядка  $10^8$  Гц и получил волны, длина которых составляла от 10 до 0,6 м.

Для возбуждения колебаний вибратор подключался к индуктору, (рис. 7.4). Когда напряжение на искровом промежутке достигало пробивного значения, возникала искра, которая закорачивала обе половинки вибратора (в соответствии с этим на рисунке 7.5., з разрыв посередине вибратора не показан). В результате возникали свободные затухающие колебания, которые продолжались до тех пор, пока искра не гасла. Для того, чтобы возникающий при колебаниях высокочастотный ток не ответвлялся в обмотку индуктора, между вибратором и индуктором включались дроссели  $D_p$ , т.е. катушки с большой индуктивностью (сопротивление индуктивности переменному току равно  $\omega L$ ). После погасания

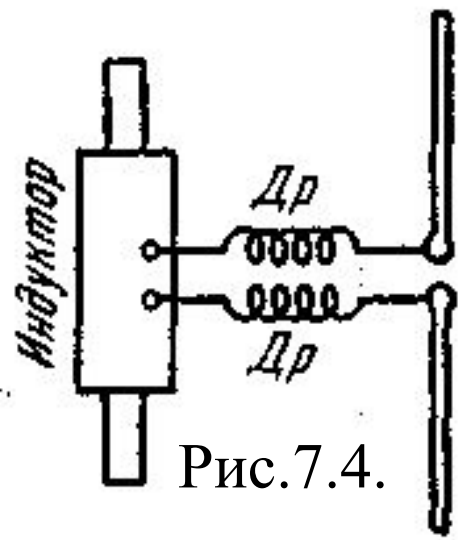


Рис.7.4.

искры вибратор снова заряжался через индуктор и весь процесс повторялся вновь. Таким образом, вибратор Герца возбуждал ряд цугов слабо затухающих волн. В вибраторе во время колебаний устанавливалась стоячая волна тока и напряжения. Сила тока

$I$  рис. 7.6,*а* была максимальна в середине вибратора (пучность тока) и обращалась в нуль на его концах (узлы тока). Напряжение  $U$  (рис. 7.6,*б*) в середине вибратора имело узел, на концах пучности. Таким образом, вибратор аналогичен струне, колеблющейся с основной (т. е. с наименьшей частотой). Длина  $\lambda$  излучаемых вибратором волн приблизительно в 2 раза превышала длину вибратора. По этой причине подобный вибратор называют *полуволновым*. Заметим, что если каким-либо

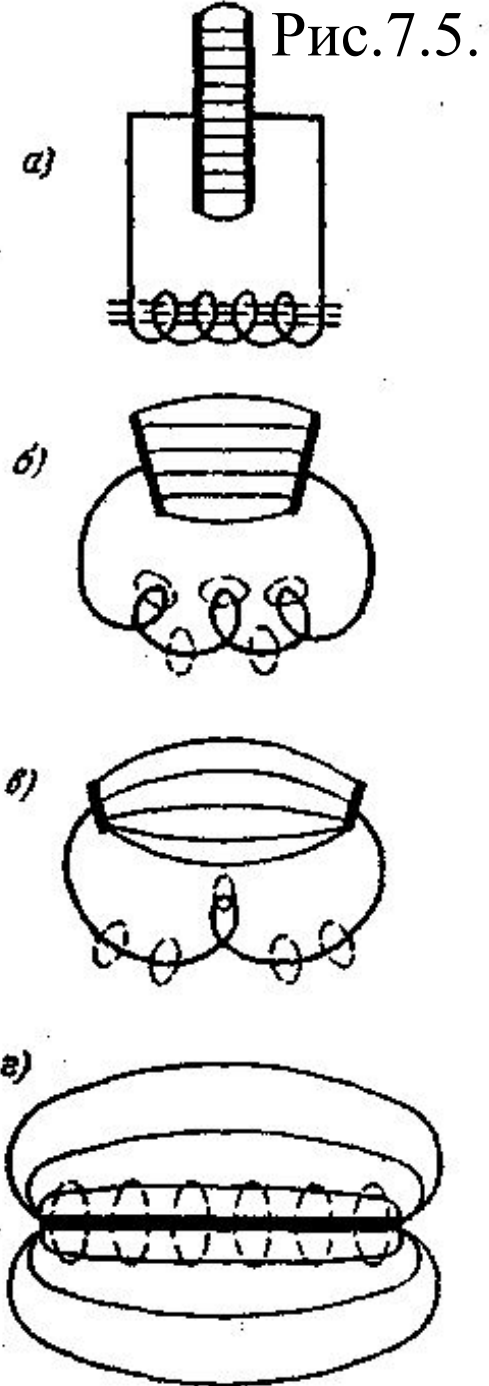
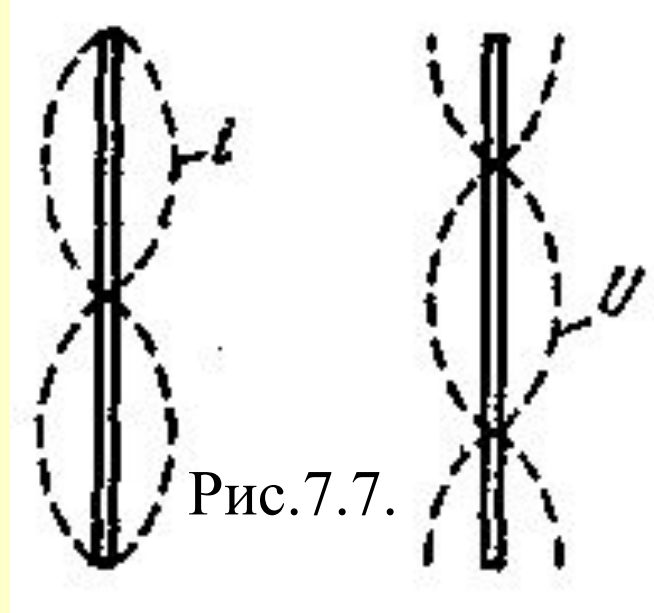
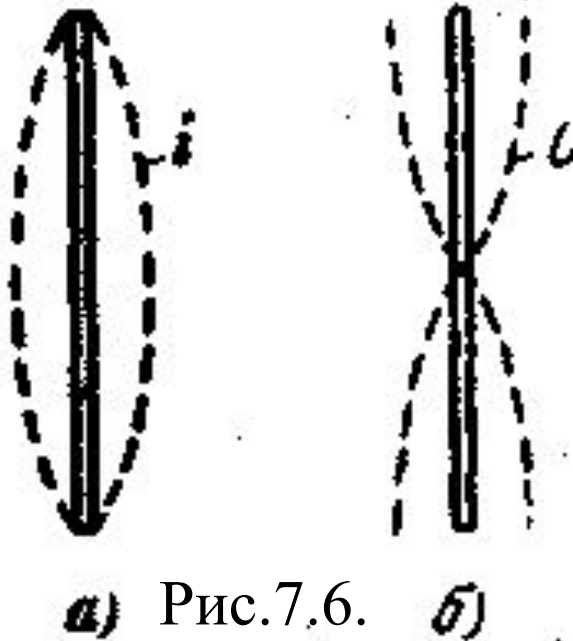


Рис.7.5.

образом возбудить в вибраторе вынужденные колебания в 2 раза большей частоты, то распределение токов и напряжений будет иметь вид, изображенный на рис. 7.7. В этом случае вибратор аналогичен струне, колеблющейся с частотой первого обертона.



Исследование излучаемой волны Герц осуществлял также при помощи полуволнового вибратора с небольшим искровым промежутком посередине. При размещении такого вибратора параллельно вектору напряженности электрического поля волны в нем возбуждались колебания тока и напряжения. Так как длина вибратора была равна  $\lambda/2$ , колебания в нем вследствие резонанса

достигали такой интенсивности, что вызывали проскакивание в искровом промежутке небольших искр).

С помощью больших металлических зеркал и асфальтовой призмы (размером более 1 м и весом 1,2 т) Герц осуществил отражение и преломление электромагнитных волн и показал, что оба эти явления подчиняются законам, установленным в оптике для световых волн. Поместив излучающий вибратор в фокусе вогнутого зеркала, Герц получил направленную плоскую волну. На ее пути он расположил плоское зеркало и получил таким образом стоячую волну. Измерив расстояние между узлами и пучностями волны, Герц нашел длину волны  $\lambda$ . Произведение  $\lambda$  на частоту колебаний вибратора  $\nu$  дало скорость электромагнитных волн, которая оказалась близкой к  $c$ . Располагая на пути волн решетку из параллельных друг другу медных проволок, Герц обнаружил, что при вращении решетки вокруг луча интенсивность волн, прошедших сквозь решетку, сильно изменяется. Когда проволоки, образующие решетку, были перпендикулярны к вектору  $\mathbf{E}$ , волна проходила сквозь решетку без помех. При расположении проволок

параллельно **E** волна сквозь решетку не проходила. Таким образом, была доказана поперечность электромагнитных волн.

Опыты Герца были продолжены П. Н. Лебедевым, который в **1894** г. получил электромагнитные волны длиной 6 мм и исследовал прохождение их в кристаллах. При этом было обнаружено двойное преломление волн (см. Оптику).

В 1896 г. А. С. Попов впервые осуществил с помощью электромагнитных волн передачу сообщения на расстояние около 250 м (были переданы слова «Генрих Герц»). Тем самым было положено основание радиотехнике.

## 7.4. Энергия ЭМВ. Импульс ЭМВ

Возможность обнаружения ЭМВ указывает на то, что они переносят энергию. Объемная плотность  $W$  энергии ЭМВ-ны складывается из объемных плотностей электрического  $W_{эл}$  и магнитного  $W_{м}$  полей:

$$W = W_{эл} + W_{м} = \varepsilon_0 \varepsilon E^2 / 2 + \mu_0 \mu H^2 / 2 \quad (7.4.1)$$

Учитывая выражение (7.2.4), получим, что плотность энергии электрического и магнитного полей в каждый момент времени одинаковы, т.е.  $W_{\text{эл}} = W_{\text{м}}$ . Поэтому  $W = 2W_{\text{эл}} = \varepsilon_0 \varepsilon E^2 = \sqrt{\varepsilon_0 \varepsilon} \sqrt{\mu_0 \mu} E H$ .

Умножив плотность энергии  $W$  на скорость  $v$  распространения волны в среде, получим модуль плотности потока энергии:

$$S = Wv = EH .$$

Так как векторы  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{H}$  взаимно перпендикулярны и образуют с направлением распространения волны правовинтовую систему, то направление вектора  $[\mathbf{E}\mathbf{H}]$  совпадает с направлением переноса энергии, а модуль этого вектора равен  $EH$ . Следовательно, **вектор плотности потока электромагнитной энергии**, называемой **вектором**

**Умова – Пойнтинга**:  $\mathbf{S} = [\mathbf{E}\mathbf{H}]$ .

Вектор  $\mathbf{S}$  направлен в сторону распространения ЭМВ-ны, а его модуль равен энергии, переносимой ЭМВ-ой за единицу времени через единичную площадку, перпендикулярную направлению распространения волны.

Если ЭМВ-ы поглощаются или отражаются телами (эти явления подтверждены опытами Герца), то из теории Максвелла следует, что ЭМВ-ы должны оказывать на тела давление. Давление ЭМВ объясняется тем, что под действием электрического поля волны заряженные частицы вещества начинают упорядоченно двигаться и подвергаются со стороны магнитного поля действию силы Лоренца. Однако, значение этого давления ничтожно мало. Можно оценить, что при средней мощности солнечного излучения, приходящего на Землю, давление для абсолютно поглощающей поверхности составляет 5мкПа. В исключительно тонких экспериментах, ставших классическими, П. Н. Лебедев в 1900 г. доказал существование светового давления на твердые тела, а в 1910г – и на газы. Опыты Лебедева имели огромное значение для утверждения выводов теории Максвелла о том, что свет представляет собой ЭМВ-ы.

Существование давления ЭМВ приводит к выводу о том, что полю ЭМВ-ы присущ определенный импульс. Из теории следует,

$$p=W/c,$$



где  $W$  – энергия ЭМП-я.

Выражая импульс как  $p = mc$  (поле в вакууме распространяется со скоростью  $c$ ), получим  $p = mc = W/c$ , откуда

$$W = mc^2 \quad (7.4.2)$$

Это соотношение между массой и энергией свободного ЭМП является универсальным законом природы. Согласно специальной теории относительности, выражение (7.4.2) имеет общее значение и справедливо для любых тел независимо от их внутреннего строения.

## 7.5. Излучение диполя

Простейшим излучателем электромагнитных волн является электрический диполь, электрический момент которого изменяется во времени по гармоническому закону  $p = p_0 \cos\omega t$ ,

где  $p_0$  - амплитуда вектора  $p$ . Примером подобного диполя может служить система, состоящая из покоящегося отрицательного заряда  $-Q$  и положительного заряда  $+Q$ , гармонически колеблющегося

вдоль направления  $\mathbf{p}$  с частотой  $\omega$ .

Задача об излучении диполя имеет в теории излучающих систем важное значение, так как всякую реальную излучающую систему (например, антенну) можно рассчитывать, рассматривая излучение диполя. Кроме того, многие вопросы взаимодействия излучения с веществом сравнительно несложно объясняются на основе классической теории исходя из представления об атомах как о системах зарядов, в которых электроны совершают гармонические колебания около их положений равновесия.

Характер электромагнитного поля диполя зависит от выбора рассматриваемой точки. Особый интерес представляет так называемая **волновая зона** диполя — точки пространства, отстоящие от диполя на расстояниях  $r$ , значительно превышающих длину волны ( $r \gg \lambda$ ), — так как в ней картина электромагнитного поля диполя сильно упрощается. Это связано с тем, что в волновой зоне диполя практически остаются только «отпочковавшиеся» от диполя, свободно распространяющиеся поля, в то время как поля, колеблющиеся вместе с диполем и имеющие более сложную

структуру, сосредоточены в области расстояний  $r \leq \lambda$ .

Если волна распространяется в однородной изотропной среде, то время прохождения волны до точек, удаленных от диполя на расстояние  $r$ , одинаково. Поэтому во всех точках сферы, центр которой совпадает с диполем, фаза колебаний одинакова, т. е. в волновой зоне волновой фронт будет сферическим (рис. 7.8) и, следовательно, волна, излучаемая диполем, есть сферическая волна.

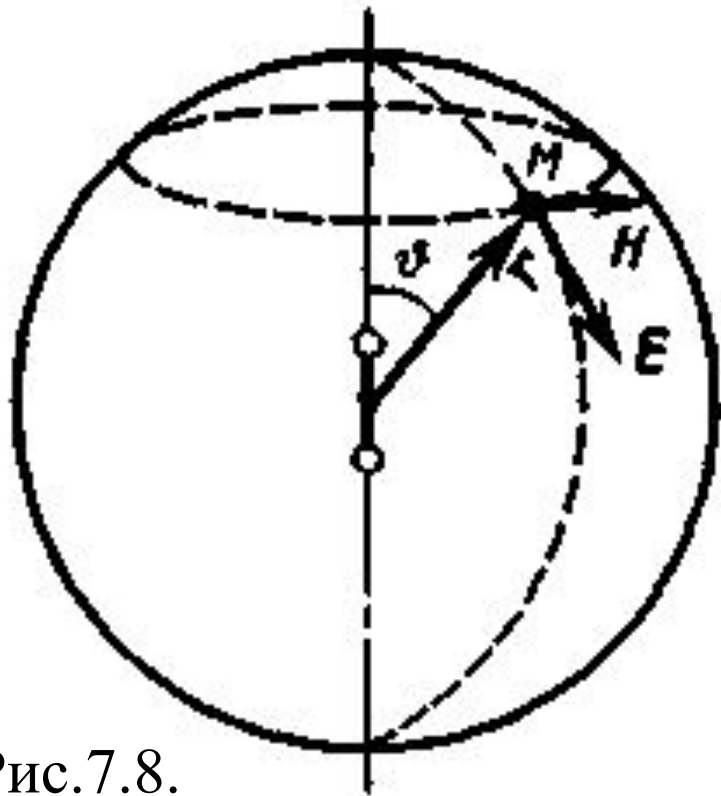
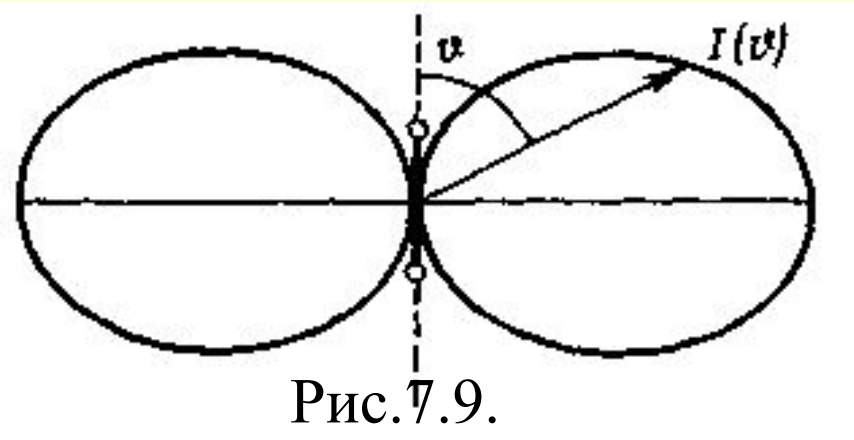


Рис.7.8.

Векторы **E** и **H** в каждой точке взаимно перпендикулярны и лежат в плоскости, перпендикулярной ради-усу-вектору  $r$ . Вектор **E** направлен по касательной к меридиану, а вектор **H** — по касательной к параллели, проведенным через точку  $M$  на сфере радиус  $r$  с центром в центре диполя (рис. 7.8). В каждой точке векторы **E** и **H** колеблются по закону  $\cos(\omega t - kr)$ , амплитуда этих векторов

пропорциональна  $\frac{1}{r} \sin^2 \vartheta$  (для вакуума), т. е. зависит от расстояния  $r$  до излучателя и угла  $\vartheta$  между направлением радиуса-вектора и осью диполя. Отсюда следует, что интенсивность излучения диполя в волновой зоне  $I \sim \frac{\sin^2 \vartheta}{r^2}$  (7.5.1)



Зависимость (7.5.1)  $I$  от  $\vartheta$  при заданном значении  $r$ , приводимая в полярных координатах (рис. 7.9), называется

диаграммой направленности излучения диполя. Как видно из выражения (7.5.1) и приведенной диаграммы, диполь сильнее всего излучает в направлениях, перпендикулярных его оси ( $\vartheta = \pi/2$ ). Вдоль своей оси ( $\vartheta = 0$  и  $\vartheta = \pi$ ) диполь не излучает вообще. Диаграмма направленности излучения диполя позволяет формировать излучение с определенными характеристиками и

используется при конструировании антенн.

Впервые электромагнитные волны были использованы через семь лет после опытов Герца. 7 мая 1895 г. преподаватель физики офицерских минных классов А. С. Попов (1859-1906) на заседании Русского физико-химического общества продемонстрировал первый в мире радиоприемник, открывший возможность практического использования электромагнитных волн для беспроводной связи, преобразившей жизнь человечества. Первая переданная в мире радиограмма содержала лишь два слова — «Генрих Герц». Изобретение радио Поповым сыграло огромную роль в деле распространения и развития теории Максвелла.

Электромагнитные волны сантиметрового и миллиметрового диапазонов, встречая на своем пути преграды, отражаются от них. Это явление лежит в основе радиолокации — обнаружения предметов (например, самолетов, кораблей и т. д.) на больших расстояниях и точного определения их положения. Помимо этого, методы радиолокации используются для наблюдения прохождения и образования облаков, движения метеоритов в

верхних слоях атмосферы и т. д. Для электромагнитных волн характерно явление дифракции — огибания волнами различных препятствий. Именно благодаря дифракции радиоволн возможна устойчивая радиосвязь между удаленными пунктами, разделенными между собой выпуклостью Земли. Однако явление дифракции сильно выражено только для длинных волн (сотни и тысячи метров), поэтому они применяются в фототелеграфии. Так как короткие волны (несколько метров и меньше) Землю практически не огибают и распространяются по прямой, то они применяются в телевидении для передачи изображений на небольшие расстояния (немногим больше пределов прямой видимости). Электромагнитные волны используются также в радиогеодезии - для очень точного определения расстояний с помощью радиосигналов, в радиоастрономии - для исследования радиоизлучения небесных тел и т. д. Полного описания применения электромагнитных волн дать в настоящее время практически невозможно, так как нет областей науки и техники, где бы они не использовались.

**Сегодня: \***

Лекция окончена.

**До свидания!**