

Лекция. Электромагнитные волны.

1. Происхождение ЭМВ.

Существование ЭМВ волн было предсказано Максвеллом на основе его уравнений. Переменные электрические и магнитные поля взаимно порождают друг друга. Т.е. если возбудить с помощью колеблющегося заряда ЭМ поле, то в пространстве, окружающем заряд, возникнет последовательность взаимных превращений Э и М полей, распространяющихся от точки к точке. Это процесс будет периодическим во времени и пространстве, а значит, представляет собой волну. Покажем, что это вытекает из уравнений Максвелла.

Рассмотрим однородную, изотропную, электронейтральную ($\rho = 0$), непроводящую ($\vec{j} = 0$) среду с $\epsilon, \mu = \text{const}$. Учтем связь между векторами \vec{B} и \vec{H} , \vec{E} и \vec{D} . Тогда

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = \mu\mu_0 \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}, \quad \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \epsilon\epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}, \quad \text{div} \vec{B} = \mu\mu_0 \text{div} \vec{H}, \quad \text{div} \vec{D} = \epsilon\epsilon_0 \text{div} \vec{E}.$$

Перепишем уравнения Максвелла:

$$\text{rot} \vec{E} = -\mu\mu_0 \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}, \quad \text{div} \vec{H} = 0, \quad \text{rot} \vec{H} = \epsilon\epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}, \quad \text{div} \vec{E} = 0.$$

Возьмем rot обеих частей 1-го уравнения:

$$\text{rot rot} \vec{E} = -\mu\mu_0 \text{rot} \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} = -\mu\mu_0 \frac{\partial}{\partial t} \text{rot} \vec{H} = -\mu\mu_0 \epsilon\epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}.$$

Рассмотрим $\text{rot rot} \vec{E}$. Его можно представить:

$$\text{rot rot} \vec{E} = [\vec{\nabla} [\vec{\nabla} \vec{E}]] = \vec{b}(\vec{a}\vec{c}) - \vec{c}(\vec{a}\vec{b}) = \vec{\nabla}(\vec{\nabla} \vec{E}) - \vec{E}(\vec{\nabla} \vec{\nabla}).$$

Так как $(\vec{\nabla} \vec{E}) = \text{div} \vec{E}$, $\vec{\nabla}(\vec{\nabla} \vec{E}) = \text{grad}(\text{div} \vec{E}) = 0$, а $(\vec{\nabla} \vec{\nabla}) = \Delta$, то $\text{rot rot} \vec{E} = -\Delta \vec{E}$.

Таким образом $-\Delta \vec{E} = -\mu\mu_0 \epsilon\epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}$. Учтем, что $\mu\mu_0 \epsilon\epsilon_0 = \frac{1}{c^2}$. Тогда, окончательно:

$$\Delta \vec{E} = \frac{\mu\epsilon}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \quad \text{или} \quad \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial z^2} = \frac{\mu\epsilon}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}.$$

Аналогично можно получить

$$\Delta \vec{H} = \frac{\mu\epsilon}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} \quad \text{или} \quad \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial z^2} = \frac{\mu\epsilon}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2}.$$

Эти уравнения неразрывно связаны друг с другом и являются типичными **волновыми уравнениями**. Любая функция, удовлетворяющая такому уравнению, описывает некоторую волну, распространяющуюся с **фазовой скоростью** $v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon\mu}}$.

Таким образом, эти уравнения указывают на то, что ЭМ поля могут существовать в виде ЭМ волн. В вакууме $\epsilon = \mu = 1$, а значит, фазовая скорость распространения ЭМВ совпадает со скоростью распространения света в вакууме c .

2. Плоская ЭМ волна.

Выберем ось X в направлении, перпендикулярном волновым поверхностям. В этом случае вектора \vec{H} и \vec{E} , а также их компоненты не будут зависеть от y и z. Тогда уравнения Максвелла в скалярном виде (см. лекцию по уравнениям Максвелла) упростятся и примут вид:

$$\frac{\partial B_x}{\partial t} = \mu\mu_0 \frac{\partial H_x}{\partial t} = 0; \quad \frac{\partial E_z}{\partial x} = \mu\mu_0 \frac{\partial H_y}{\partial t}; \quad \frac{\partial E_y}{\partial x} = -\mu\mu_0 \frac{\partial H_z}{\partial t}; \quad \mu\mu_0 \frac{\partial H_x}{\partial x} = 0;$$

$$\varepsilon\varepsilon_0 \frac{\partial E_x}{\partial t} = 0; \quad \frac{\partial H_z}{\partial x} = -\varepsilon\varepsilon_0 \frac{\partial E_y}{\partial t}; \quad \frac{\partial H_y}{\partial x} = \varepsilon\varepsilon_0 \frac{\partial E_z}{\partial t}; \quad \varepsilon\varepsilon_0 \frac{\partial E_x}{\partial x} = 0.$$

Видно, что E_x и H_x не зависят от x и t , это означает, что они могут быть обусловлены только однородными постоянными полями, накладывающимися на поле волны. Поэтому само поле волны не имеет составляющих вдоль оси X : $E_x = H_x = 0$. Таким образом, вектора \vec{H} и \vec{E} перпендикулярны направлению распространения волны, а это значит, что **ЭМВ поперечны!!**

Объединим оставшиеся уравнения в две независимые группы:

$$\begin{aligned} \frac{\partial E_y}{\partial x} = -\mu\mu_0 \frac{\partial H_z}{\partial t} & \quad \frac{\partial H_z}{\partial x} = -\varepsilon\varepsilon_0 \frac{\partial E_y}{\partial t} \quad (\text{связывают } E_y \text{ и } H_z) \\ \frac{\partial E_z}{\partial x} = \mu\mu_0 \frac{\partial H_y}{\partial t} & \quad \frac{\partial H_y}{\partial x} = \varepsilon\varepsilon_0 \frac{\partial E_z}{\partial t} \quad (\text{связывают } E_z \text{ и } H_y). \end{aligned} \quad (1)$$

Предположим, что первоначально было создано переменное ЭП E_y , направленное вдоль оси Y . Это поле порождает МП H_z . Поле H_z создаст E_z и т.д. Поля E_z и H_y при этом не возникнут. Если рассмотреть вторую группу, все будет наоборот. Поэтому для описания плоской ЭМВ можно взять одну из групп, компоненты второй приравняв нулю. Возьмем группу (1). Прделаем то же, что мы делали в случае упругих волн. Продифференцируем первое уравнение по x . Учтем, что

$$-\frac{\partial}{\partial x} \mu\mu_0 \frac{\partial H_z}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial t} \mu\mu_0 \frac{\partial H_z}{\partial x} = \mu\mu_0 \varepsilon\varepsilon_0 \frac{\partial^2 E_y}{\partial t^2} = \frac{\varepsilon\mu}{c^2} \frac{\partial^2 E_y}{\partial t^2}, \text{ получим } \frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} = \frac{\mu\varepsilon}{c^2} \frac{\partial^2 E_y}{\partial t^2}.$$

$$\text{И, аналогично, } \frac{\partial^2 H_z}{\partial x^2} = \frac{\mu\varepsilon}{c^2} \frac{\partial^2 H_z}{\partial t^2}.$$

Решения этих уравнений имеют вид:

$$E_y = E_0 \cos(\omega t - kx + \alpha_1); \quad H_z = H_0 \cos(\omega t - kx + \alpha_2)/$$

Здесь индексы y и z можно опустить, они лишь показывают, что вектора \vec{H} и \vec{E} направлены вдоль осей z и y .

Подставим эти решения в (1):

$$kE_0 \sin(\omega t - kx + \alpha_1) = \mu\mu_0 \omega H_0 \sin(\omega t - kx + \alpha_2)$$

$$kH_0 \sin(\omega t - kx + \alpha_2) = \varepsilon\varepsilon_0 \omega E_0 \sin(\omega t - kx + \alpha_1).$$

Чтобы эти равенства были справедливы при любых x и t , нужно, чтобы $\alpha_1 = \alpha_2$. Тогда $kE_0 = \mu\mu_0 \omega H_0$; $\varepsilon\varepsilon_0 \omega E_0 = kH_0$. Перемножив равенства, получим

$$\varepsilon_0 \varepsilon E_0^2 = \mu_0 \mu H_0^2.$$

Таким образом, колебания электрических и магнитных полей происходят в одинаковой фазе, амплитуды их напряженностей связаны соотношением

$$\varepsilon_0 \varepsilon \sqrt{E_0} = \mu_0 \mu \sqrt{H_0}.$$

\vec{H} и \vec{E} образуют с \vec{k} и \vec{v} правовинтовую систему.

Максвелл теоретически предсказал существование ЭМВ в 1865 году. Первые опыты с несветовыми ЭМВ были осуществлены Герцем в 1888. Он обнаружил отражение и преломление волн, установил, что эти явления подчиняются законам, установленным в оптике, доказал поперечность ЭМВ. Соответствующие демонстрации, я надеюсь, мы посмотрим.

3. Энергия и импульс ЭМВ.

Распространение волны связано с переносом энергии. Вектор плотности потока энергии, переносимой ЭМВ, называется вектором Пойтинга и обозначается \vec{S} . Модуль вектора, как и для упругой волны, определяется выражением $S = wv$. w – объемная

плотность энергии ЭМ поля, равная сумме объемных плотностей энергии отдельно электрического и магнитного полей:

$$w = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon E^2}{2} + \frac{\mu_0 \mu H^2}{2}.$$

В вакууме и непроводящей среде \vec{H} и \vec{E} изменяются в одинаковой фазе, поэтому соотношение между амплитудами векторов справедливо и для их мгновенных значений: $\varepsilon_0 \varepsilon \sqrt{E} = \mu_0 \mu \sqrt{H}$. Тогда

$$\frac{\varepsilon_0 \varepsilon E^2}{2} = \frac{\mu_0 \mu H^2}{2} = \frac{EH}{2} \sqrt{\varepsilon_0 \varepsilon \mu_0 \mu} = \frac{EH}{2} \sqrt{\frac{\varepsilon \mu}{c}} = \frac{EH}{2v}. \text{ Значит } w = \frac{EH}{v} \text{ и } S = EH.$$

Так как \vec{H} и \vec{E} образуют с направлением распространения волны правовинтовую систему, то можно записать векторно $\vec{S} = [\vec{E}\vec{H}]$.

Поглощаясь в каком-либо теле, ЭМ волна сообщает ему импульс, следовательно, оказывает давление. Рассмотрим это. Пусть плоская волна падает перпендикулярно на плоскую поверхность слабо проводящего тела с $\varepsilon = \mu = 1$. ЭП поле волны возбудит в теле ток, плотность которого, согласно закону Ома $\vec{j} = \sigma \vec{E}$. МП волны будет действовать на каждый носитель тока, движущийся со скоростью \vec{u} с силой Лоренца $\vec{F} = q[\vec{u}\vec{B}]$. Тогда на n носителей тока, содержащихся в единице объема тела, будет действовать сила

$$\vec{F}_{IV} = nq[\vec{u}\vec{B}] = [nq\vec{u}\vec{B}] = [\vec{j}\vec{B}] = \mu_0 [\vec{j}\vec{H}]$$

Направление силы совпадает с направлением распространения волны. Поверхностному слою с площадью $S = 1$ и толщиной dl в единицу времени сообщается импульс dK :

$$dK = F_{IV} dl = \mu_0 j H dl.$$

В этом же слое в единицу времени поглощается энергия $dW = jEdl$, выделяющаяся в виде теплоты. dK и dW сообщаются слою той «частью» волны, которая поглощается в этом слое.

Найдем отношение K/W , опустив знак дифференциала:

$$\frac{K}{W} = \mu \frac{E}{H} = \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0} = \frac{1}{c} \text{ (здесь учтено, что } \varepsilon_0 E_0^2 = \mu_0 H_0^2 \text{). Для}$$

Таким образом, ЭМВ, несущая энергию W , обладает импульсом $K = \frac{1}{c} W$. Тогда

плотность импульса, т.е. импульс единицы объема, $K_{IV} = \frac{w}{c}$. Для вакуума $S = wc$,

следовательно, $w = \frac{S}{c}$ и $\vec{K}_{IV} = \frac{\vec{S}}{c^2} = \frac{[\vec{E}\vec{H}]}{c^2}$.

Если перпендикулярно падающая на тело волна полностью им поглощается, то единице площади тела в единицу времени сообщается импульс волны, заключенный в цилиндре с площадью основания, равной 1 и высотой, равной c :

$$K = K_{IV} V = \frac{w}{c} c = w.$$

Импульс, сообщаемый единице поверхности в единицу времени, есть ни что иное как давление на поверхность. Таким образом, в случае поглощающей поверхности $P = w$.

Эта величина пульсирует с очень большой частотой, поэтому практически можно измерить лишь ее среднее по времени значение, т.е. $P = \langle w \rangle$. Для идеально отражающей поверхности давление оказывается больше в два раза.

Световое давление на твердые тела впервые было измерено Лебедевым в 1900 г.

4. Излучение ЭМВ

Неподвижный электрический заряд не излучает ЭМВ, а лишь создает электростатическое поле. Не излучает ЭМВ волн и равномерно движущийся заряд. Для того, чтобы заряд излучал, он должен двигаться с ускорением. Простейшей системой, излучающей ЭМВ, является колеблющийся диполь, состоящий, например, из неподвижного $+q$ и колеблющегося относительно него $-q$. Дипольный момент диполя изменяется по закону $\vec{p} = -q\vec{r} = p_m \cos \omega t$ (\vec{r} - радиус-вектор заряда $-q$, p_m - максимальный дипольный момент диполя). Э и М поля, создаваемые диполем, дипольный момент которого изменяется по гармоническому закону, будут меняться с той же частотой. Следовательно, колеблющийся диполь будет излучать ЭМВ с длиной волны $\lambda = \frac{2\pi c}{\omega}$.

Такая система представляет особый интерес, так как многие вопросы взаимодействия ЭМВ с веществом могут быть объяснены классически, исходя из представлений об атомах как о системах зарядов, в которых содержатся электроны, способные совершать гармонические колебания около положений равновесия.

Расчет дает, что мощность излучения диполя (энергия, излучаемая по всем направлениям в единицу времени) пропорциональна квадрату второй производной дипольного момента по времени, т.е.

$$P \sim \left(\frac{d^2 p}{dt^2} \right)^2 = p_m^2 \omega^4 \cos^2 \omega t. \text{ Усреднив выражение по времени, получим } \langle P \rangle = p_m^2 \omega^4.$$

Таким образом, средняя мощность излучения пропорциональна четвертой степени частоты. Поэтому при малой частоте излучение электрических систем (например, линии передачи переменного тока промышленной частоты) оказывается незначительным.

Диполь излучает неодинаково по всем направлениям. Найдем интенсивность излучения диполя на расстоянии от диполя много большем, чем длина волны (волновая зона). В однородной изотропной среде волновые поверхности представляют собой сферы. Вектора \vec{H} и \vec{E} в любой точке волновой поверхности перпендикулярны лучу и колеблются по закону $\cos(\omega t - kr)$. Амплитуды колебаний E_0 и H_0 для вакуума зависят от расстояния от центра диполя до точки волновой поверхности r и от угла θ между осью диполя и направлением излучения: $E_0 \sim H_0 \sim \frac{\sin \theta}{r}$. Тогда $\langle S \rangle = E_0 H_0 = \frac{\sin^2 \theta}{r^2}$. Именно так и ведет себя интенсивность излучения. Сильнее всего диполь излучает в направлении, перпендикулярном оси ($\theta = \pi/2$); в направлениях, совпадающих с осью, диполь не излучает.

5. Шкала ЭМВ

Распространение ЭМВ волн в пространстве представляет собой процесс взаимного индуктирования Э и М полей. Переменные Э и М поля могут быть созданы огромным количеством разных способов, но во всех случаях они создаются движущимися с ускорением или колеблющимися зарядами, например, электронами. Так как электроны входят в состав атомов и молекул, движутся по проводникам, когда по ним протекает ток, то ясно, что ЭМВ могут создаваться самыми различными объектами, начиная от отдельных электронов, атомов и молекул и заканчивая космическими телами, внутри которых циркулируют гигантские токи. Разумеется, что частоты, а значит и длины волн в разных случаях в огромное число раз, что, однако, не мешает одинаковой природе всех этих видов ЭМВ.

В зависимости от частоты или длины волны в вакууме, а также от механизмов образования, различают: радиоволны, оптическое излучение, рентгеновское и γ -

излучение. Некоторые диапазоны перекрываются, так как волны одной и той же частоты могут образовываться в разных процессах.

Радиоволны - обусловлены переменными токами и электронными потоками.

Оптическое излучение – инфракрасное

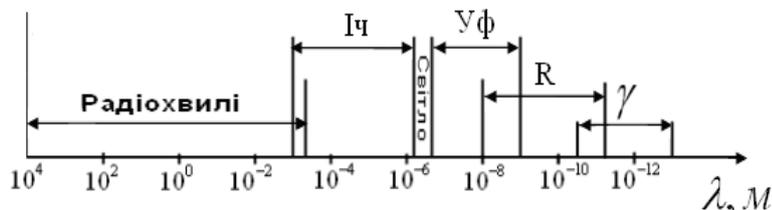
видимое

ультрафиолетовое

- исходит из атомов, молекул, быстрых заряженных частиц.

Рентгеновское излучение - возникает при внутриатомных процессах.

γ - излучение – имеет ядерное происхождение.



Межі за довжиною хвилі (або частотою) між різними видами електромагнітного випромінювання дозволяють побудувати так звану шкалу електромагнітних хвиль, де показано, що електромагнітні хвилі простягаються від довжин 10^4 м (радіохвилі) до найкоротших (γ -випромінювання), що мають довжину хвилі менше 10^{-10} м. Сучасна класифікація електромагнітних хвиль досить умовна і допускає перекривання діапазонів. Властивості різних діапазонів електромагнітних хвиль відрізняються за їх дією та за проникною здатністю.

Незважаючи на єдину електромагнітну природу, кожний із діапазонів електромагнітних хвиль відрізняється своєю технікою генерації і реєстрації.

Радіохвилі мають довжину від 10 км до часток міліметра. Генерують їх за допомогою вібраторів різних конструкцій, а реєструються вони за допомогою коливального контуру. У категорію радіохвиль потрапляють радіомовлення, телебачення, мобільний зв'язок.

Інфрачервоні промені (ІЧ-промені) мають довжину від 10^{-3} м до $7,60 \cdot 10^{-7}$ м. Інфрачервоні промені, як і видиме світло та ультрафіолетові промені, випромінюють тіла, нагріті до різних температур. ІЧ-промені називають тепловим випромінюванням. Значна частина ІЧ-променів у випромінюванні батарей водяного опалення (нагрівають приміщення), полум'я вогнищ тощо.

Потужним природним джерелом ІЧ-променів є Сонце. Близько 50 % його випромінювання лежить в ІЧ-області. Реєструються ІЧ-промені за допомогою болометрів, фотоопорів тощо.

Видиме світло – електромагнітне випромінювання, сприймається оком. Довжини хвиль видимого світла розташовані в інтервалі $(4,00 \div 7,60) \cdot 10^{-7}$ м. Випромінювання у вузькому інтервалі довжин хвиль $\Delta\lambda$ око сприймає як одноколірне, а утримує всі довжини хвиль інтервалу – як біле світло. Світлові хвилі випромінюються атомами, молекулами. Щоб атом випромінював світло, йому потрібно надати енергії ззовні.

Ультрафіолетові промені (УФ-промені) мають інтервал довжин хвиль від $3,80 \cdot 10^{-7}$ м до $1 \cdot 10^{-9}$ м. Вони містяться і у складі випромінювання Сонця. Крізь звичайне скло УФ-промені не проходять, а скло, виготовлене з кварцового піску, пропускає їх практично без змін. УФ випромінювання відзначається підвищеною хімічною активністю. УФ, ІЧ та видимі хвилі входять до оптичного діапазону.

Рентгенівські промені (R-промені) мають інтервал довжин хвиль від 10^{-8} м до 10^{-11} м. У лабораторних умовах їх одержують за допомогою рентгенівських трубок, і вони

представляють граничні частоти, які можна генерувати на атомному рівні. Це проміння слабо поглинається речовиною.

Гамма-випромінювання (γ -промені) має довжини хвиль менше 10^{-10} м і відповідно найвищі частоти $\nu \approx 10^{22}$ Гц. Вони випромінюються радіоактивними ядрами і надходять з космосу. Це найбільш короткохвильове електромагнітне випромінювання (рис. 15.4). Виявляються вони за викликаного ними іонізацією атомів речовини, крізь яку вони проходять.

Более подробно про различные виды ЭМВ почитайте, пожалуйста, самостоятельно.