

## Электромагнитные волны

Существование электромагнитных волн было теоретически предсказано великим английским физиком Дж. Максвеллом в 1864 году. Максвелл проанализировал все известные к тому времени законы электродинамики и сделал попытку применить их к изменяющимся во времени электрическому и магнитному полям. Он обратил внимание на асимметрию взаимосвязи между электрическими и магнитными явлениями. Максвелл ввел в физику понятие вихревого электрического поля и предложил новую трактовку закона электромагнитной индукции, открытой Фарадеем в 1831 г.: **Всякое изменение магнитного поля порождает в окружающем пространстве вихревое электрическое поле, силовые линии которого замкнуты.**

Максвелл высказал гипотезу о существовании и обратного процесса: **Изменяющееся во времени электрическое поле порождает в окружающем пространстве магнитное поле.**

Рис. 2.6.1 и 2.6.2 иллюстрируют взаимное превращение электрического и магнитного полей.

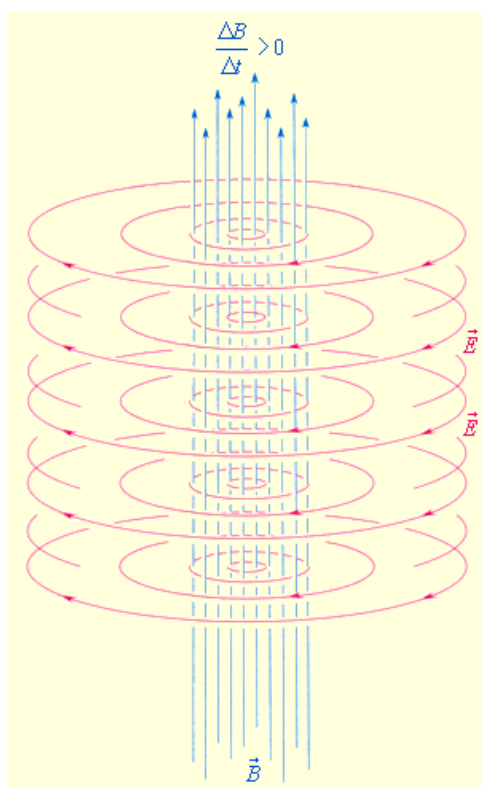


Рисунок 2.6.1.  
Закон электромагнитной  
индукции в трактовке  
Максвелла

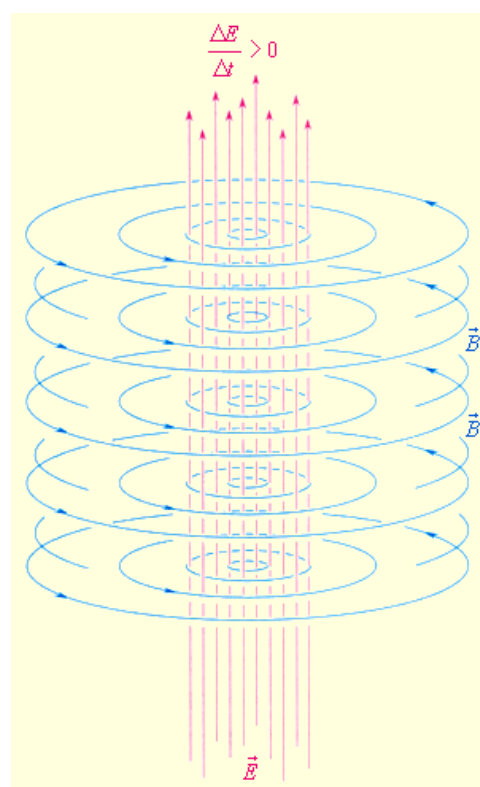


Рисунок 2.6.2.  
Гипотеза Максвелла.  
Изменяющееся электрическое  
поле порождает магнитное поле

Эта гипотеза была лишь теоретическим предположением, не имеющим экспериментального подтверждения, однако на ее основе Максвеллу

удалось записать непротиворечивую систему уравнений, описывающих взаимные превращения электрического и магнитного полей, т. е. систему уравнений электромагнитного поля (уравнений Максвелла). Из теории Максвелла вытекает ряд важных выводов:

**1.** Существуют электромагнитные волны, то есть распространяющееся в пространстве и во времени электромагнитное поле. Электромагнитные волны поперечны – векторы  $\vec{E}$  и  $\vec{B}$  перпендикулярны друг другу и лежат в плоскости, перпендикулярной направлению распространения волны (рис. 2.6.3).

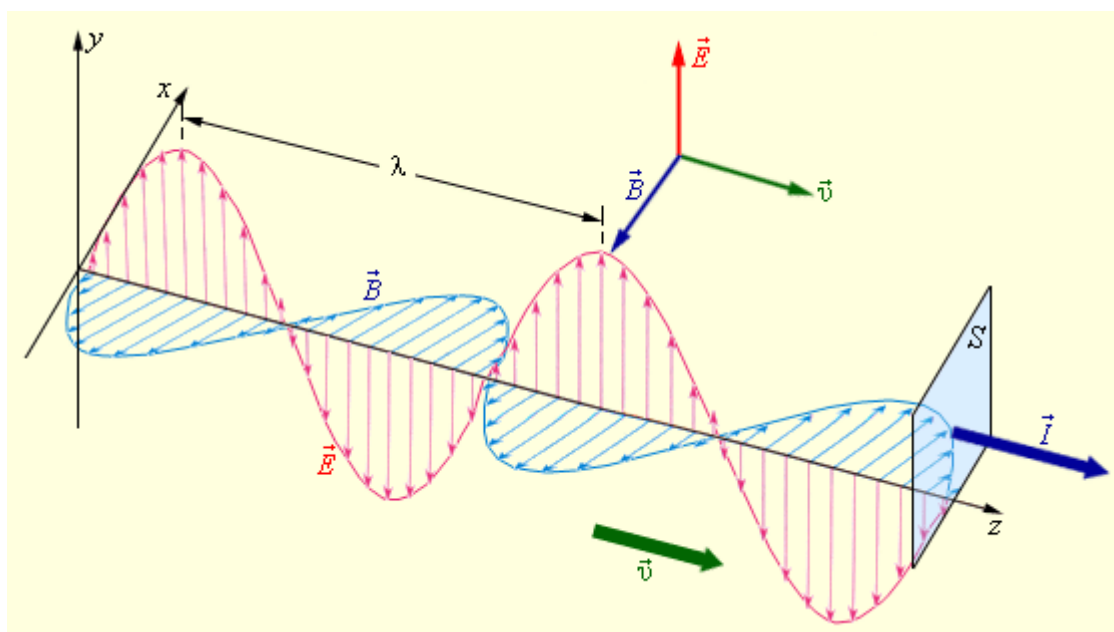


Рисунок 2.6.3.  
Синусоидальная (гармоническая) электромагнитная волна.

**2.** Электромагнитные волны распространяются в веществе с конечной скоростью

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\epsilon_0\mu\mu_0}}.$$

Здесь  $\epsilon$  и  $\mu$  – диэлектрическая и магнитная проницаемости вещества,  $\epsilon_0$  и  $\mu_0$  – электрическая и магнитная постоянные:  $\epsilon_0 = 8,85419 \cdot 10^{-12}$  Ф/м,  $\mu_0 = 1,25664 \cdot 10^{-6}$  Гн/м.

Длина волны  $\lambda$  в синусоидальной волне связана со скоростью  $u$  распространения волны соотношением  $\lambda = uT = u / f$ , где  $f$  – частота колебаний электромагнитного поля,  $T = 1 / f$ .

Скорость электромагнитных волн в вакууме ( $\epsilon = \mu = 1$ ):

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = 2,99792458 \cdot 10^8 \text{ м/с} \approx 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}.$$

Скорость  $c$  распространения электромагнитных волн в вакууме является одной из фундаментальных физических постоянных.

**3.** В электромагнитной волне происходят взаимные превращения электрического и магнитного полей. Эти процессы идут одновременно, и электрическое и магнитное поля выступают как равноправные «партнеры». Поэтому объемные плотности электрической и магнитной энергии равны друг другу:  $w_{\text{э}} = w_{\text{м}}$

$$\frac{\epsilon \epsilon_0 E^2}{2} = \frac{B^2}{2 \mu \mu_0}.$$

Отсюда следует, что в электромагнитной волне модули индукции магнитного поля и напряженности электрического поля в каждой точке пространства связаны соотношением

$$B = \frac{\sqrt{\epsilon \mu}}{c} E.$$

(Дополнение: энергия  $W_{\text{м}}$  магнитного поля катушки с индуктивностью  $L$ , создаваемого током  $I$ , равна

$$W_{\text{м}} = \frac{\Phi I}{2} = \frac{L I^2}{2} = \frac{\Phi^2}{2L}, \quad W_{\text{м}} = \frac{\mu_0 \mu n^2 I^2}{2} V = \frac{B^2}{2 \mu_0 \mu} V,$$

где  $V$  – объем соленоида. Это выражение показывает, что магнитная энергия локализована не в витках катушки, по которым протекает ток, а рассредоточена по всему объему, в котором создано магнитное поле.

Физическая величина

$$w_{\text{м}} = \frac{B^2}{2 \mu_0 \mu},$$

равная энергии магнитного поля в единице объема, называется объемной плотностью магнитной энергии. Выражение для плотности электрической энергии было выведено на уроке.)

**4.** Электромагнитные волны переносят энергию. При распространении волн возникает поток электромагнитной энергии. Если выделить площадку  $S$  (рис. 2.6.3), ориентированную перпендикулярно

направлению распространения волны, то за малое время  $\Delta t$  через площадку протечет энергия  $\Delta W_{\text{эм}}$ , равная  $\Delta W_{\text{эм}} = (w_{\text{э}} + w_{\text{м}})uS\Delta t$ .

Плотностью потока или интенсивностью  $I$  называют электромагнитную энергию, переносимую волной за единицу времени через поверхность

единичной площади:

$$I = \frac{1}{S} \frac{\Delta W_{\text{эм}}}{\Delta t} = (w_{\text{э}} + w_{\text{м}})u.$$

Подставляя сюда выражения для  $w_{\text{э}}$ ,  $w_{\text{м}}$  и  $u$ , можно получить:

$$I = \sqrt{\frac{\varepsilon\varepsilon_0}{\mu\mu_0}} \cdot E^2 = \frac{EB}{\mu\mu_0}.$$

Поток энергии в электромагнитной волне можно задавать с помощью вектора направление которого совпадает с направлением распространения волны, а модуль равен  $EB / \mu\mu_0$ . Этот вектор называют **вектором Пойнтинга**.

В синусоидальной (гармонической) волне в вакууме среднее значение  $I_{\text{ср}}$  плотности потока электромагнитной энергии равно

$$I_{\text{ср}} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}} E_0^2$$

где  $E_0$  – амплитуда колебаний напряженности электрического поля.

Плотность потока энергии в СИ измеряется в ваттах на квадратный метр ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ ).

**5.** Из теории Максвелла следует, что электромагнитные волны должны оказывать давление на поглощающее или отражающее тело. Давление электромагнитного излучения объясняется тем, что под действием электрического поля волны в веществе возникают слабые токи, то есть упорядоченное движение заряженных частиц. На эти токи действует сила Ампера со стороны магнитного поля волны, направленная в толщу вещества. Эта сила и создает результирующее давление. Обычно давление электромагнитного излучения ничтожно мало. Так, например, давление солнечного излучения, приходящего на Землю, на абсолютно поглощающую поверхность составляет примерно 5 мкПа. Первые эксперименты по определению давления излучения на отражающие и поглощающие тела, подтвердившие вывод теории Максвелла, были выполнены П. Н. Лебедевым в 1900 г. Опыты Лебедева имели огромное значение для утверждения электромагнитной теории Максвелла.

Существование давления электромагнитных волн позволяет сделать вывод о том, что электромагнитному полю присущ механический импульс. Импульс электромагнитного поля в единичном объеме выражается соотношением

$$g = \frac{w_{\text{эм}}}{c},$$

где  $w_{\text{эм}}$  – объемная плотность электромагнитной энергии,  $c$  – скорость распространения волн в вакууме. Наличие электромагнитного импульса позволяет ввести понятие электромагнитной массы.

Для поля в единичном объеме

$$\rho_{\text{эм}} = \frac{g}{c} = \frac{w_{\text{эм}}}{c^2}.$$

Отсюда следует:

$$w_{\text{эм}} = \rho_{\text{эм}} c^2.$$

Это соотношение между массой и энергией электромагнитного поля в единичном объеме является универсальным законом природы. Согласно специальной теории относительности, оно справедливо для любых тел независимо от их природы и внутреннего строения.

Таким образом, электромагнитное поле обладает всеми признаками материальных тел – энергией, конечной скоростью распространения, импульсом, массой. Это говорит о том, что электромагнитное поле является одной из форм существования материи.

**6.** Первое экспериментальное подтверждение электромагнитной теории Максвелла было дано примерно через 15 лет после создания теории в опытах Г. Герца (1888 г.). Герц не только экспериментально доказал существование электромагнитных волн, но впервые начал изучать их свойства – поглощение и преломление в разных средах, отражение от металлических поверхностей и т. п. Ему удалось измерить на опыте длину волны и скорость распространения электромагнитных волн, которая оказалась равной скорости света.

Опыты Герца сыграли решающую роль для доказательства и признания электромагнитной теории Максвелла. Через семь лет после этих опытов электромагнитные волны нашли применение в беспроводной связи (А. С. Попов, 1895 г.).

**7.** Электромагнитные волны могут возбуждаться только ускоренно движущимися зарядами. Цепи постоянного тока, в которых носители заряда движутся с неизменной скоростью, не являются источником электромагнитных волн. В современной радиотехнике излучение

электромагнитных волн производится с помощью антенн различных конструкций, в которых возбуждаются быстропеременные токи.

Простейшей системой, излучающей электромагнитные волны, является небольшой по размерам электрический диполь, дипольный момент  $p(t)$  которого быстро изменяется во времени.

Такой элементарный диполь называют диполем Герца. В радиотехнике диполь Герца эквивалентен небольшой антенне, размер которой много меньше длины волны  $\lambda$  (рис. 2.6.4).

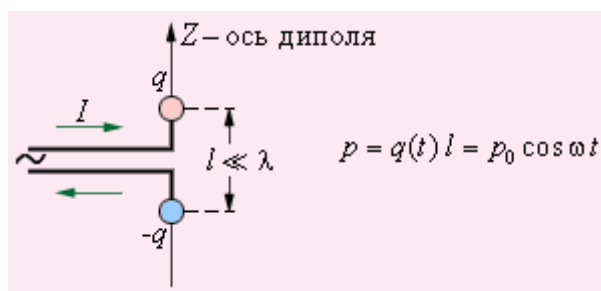


Рисунок 2.6.4.  
Элементарный диполь, совершающий гармонические колебания

Рис. 2.6.5 дает представление о структуре электромагнитной волны, излучаемой таким диполем.

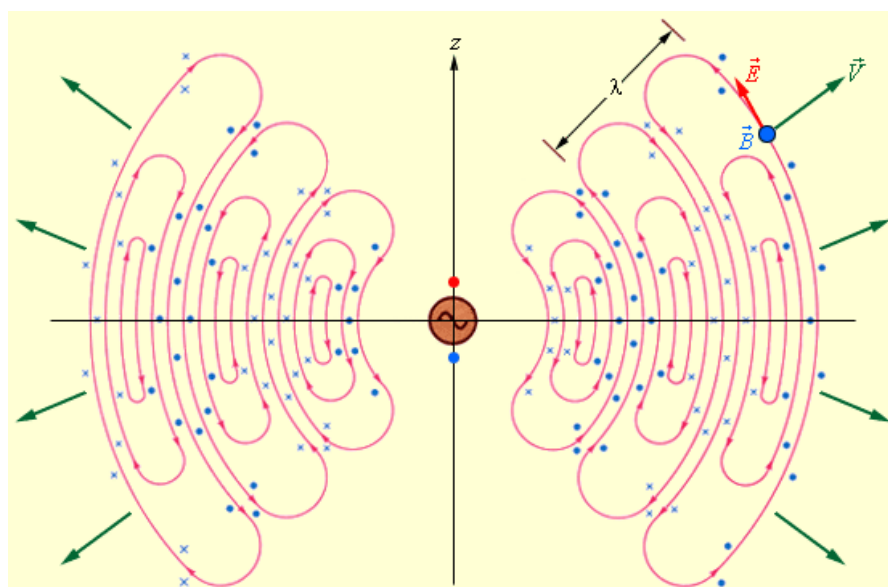


Рисунок 2.6.5.  
Излучение элементарного диполя

Следует обратить внимание на то, что максимальный поток электромагнитной энергии излучается в плоскости, перпендикулярной оси диполя. Вдоль своей оси диполь не излучает энергии. Герц использовал элементарный диполь в качестве излучающей и приемной

антенн при экспериментальном доказательстве существования электромагнитных волн.