

ЛЕКЦИЯ № 10

Гл. 5. Уравнения Максвелла для электромагнитного поля

1. Стационарные электрическое и магнитное поля

$$\begin{aligned}\oint_S \vec{D} d\vec{S} &= \sum q_{\text{св}}; & \oint_{\ell} \vec{E} d\vec{\ell} &= 0; \\ \oint_S \vec{B} d\vec{S} &= 0; & \oint_{\ell} \vec{H} d\vec{\ell} &= \sum I_{\text{пр } i}; \\ \vec{D} &= \varepsilon \varepsilon_0 \vec{E}, & \vec{B} &= \mu \mu_0 \vec{H}, \\ \vec{j}_{\text{пр}} &= \sigma \vec{E} = \frac{1}{\rho_e} \vec{E}.\end{aligned}\tag{10-1}$$

Из первого и второго уравнений электромагнетизма следует, что источником электростатического поля являются электрические заряды, а само электростатическое поле потенциальное (безвихревое).

Из третьего и четвертого уравнений электромагнетизма следует, что магнитных зарядов в природе нет, магнитное поле создается движущимися электрическими зарядами (проводниками с током) и магнитное поле – непотенциальное (вихревое) поле.

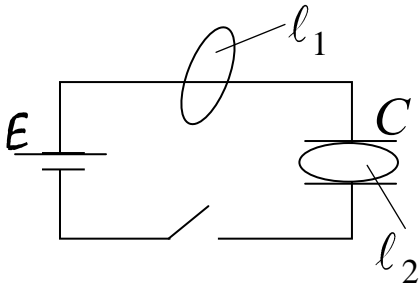
2. Вихревое электрическое поле

Согласно явлению электромагнитной индукции для протекания электрического тока в неподвижном недеформируемом замкнутом контуре необходимо наличие изменяющегося магнитного поля через поверхность контура, однако причиной движения электрических зарядов может быть электрическое поле. Поэтому английский физик Максвелл высказал предположение, что независимо от наличия замкнутого контура в пространстве, где имеется изменяющееся магнитное поле, появляется особое электрическое поле, линии вектора \vec{E} (силовые линии) которого являются замкнутыми, – это **вихревое электрическое поле**. Тогда циркуляция вектора напряженности электрического поля вдоль произвольного замкнутого контура ℓ равна взятой с противоположным знаком скорости изменения магнитного потока сквозь поверхность этого контура:

$$\oint_{\ell} \vec{E} \cdot d\vec{\ell} = -\frac{d\Phi_m}{dt} = -\int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{S}.\tag{10-2}$$

3. Ток смещения

– зарядка конденсатора



$$\oint_{\ell_1} \vec{H} d\vec{\ell} \neq 0$$

$$\oint_{\ell_2} \vec{H} d\vec{\ell} = 0 \quad ?$$

$$\oint_S \vec{D} d\vec{S} = \sum q_{\text{св}}$$

$$\frac{dq_{\text{св}}}{dt} = I \rightarrow \frac{\partial}{\partial t} \int_S \vec{D} d\vec{S} = I_{\text{см}} \quad (10-3)$$

$$I_{\text{см}} = \int_S \vec{j}_{\text{см}} d\vec{S} \rightarrow \vec{j}_{\text{см}} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (10-3a)$$

Источником магнитного поля служат движущиеся заряды, электрические токи, однако если в пространстве имеется изменяющееся электрическое поле, то это тоже приводит к появлению магнитного поля.

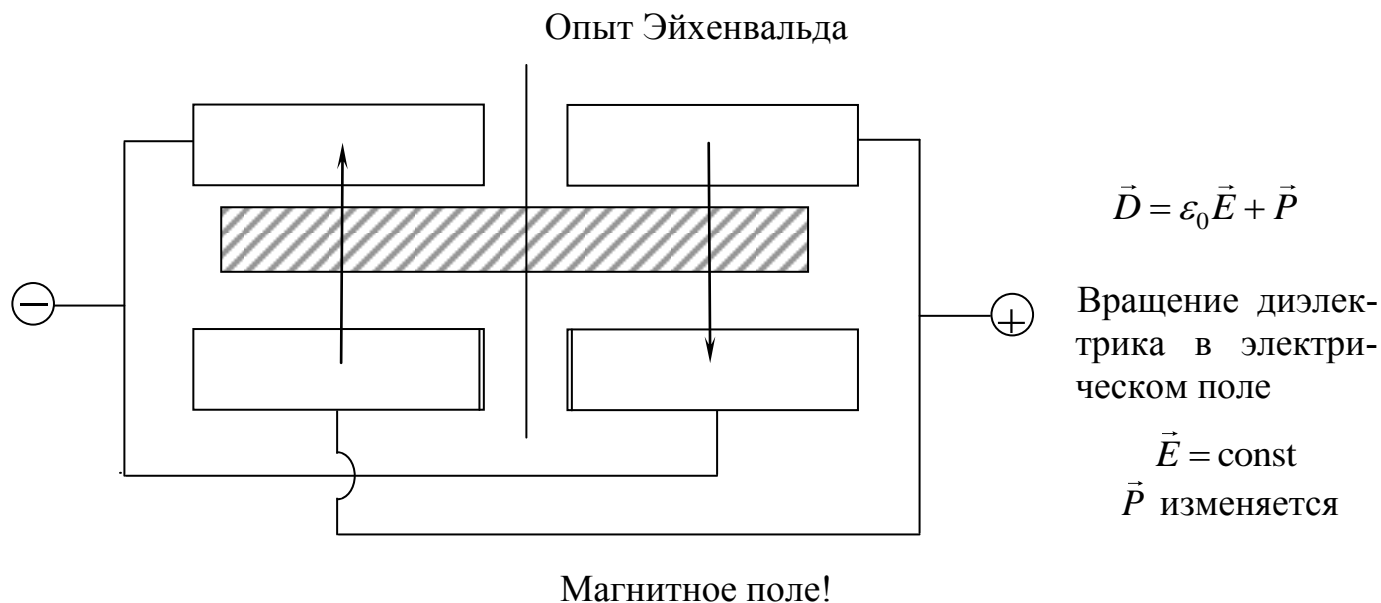
В связи с этим Максвелл предложил изменяющееся во времени электрическое поле отождествлять с электрическим током, назвав его **током смещения** (в отличие от обычных токов проводимости в проводах). Тогда циркуляция вектора напряженности магнитного поля вдоль произвольного замкнутого контура ℓ равна алгебраической сумме сил токов проводимости и силы тока смещения, охватываемых замкнутым контуром:

$$\oint_{\ell} \vec{H} \cdot d\vec{\ell} = \sum_{i=1}^N I_{\text{пр}} + I_{\text{см}} = \int_S \left(\vec{j}_{\text{пр}} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) \cdot d\vec{S}, \quad (10-4)$$

где $\vec{j}_{\text{пр}}$ и $\vec{j}_{\text{см}}$ – плотность тока проводимости и тока смещения соответственно,

$$\vec{j}_{\text{см}} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t};$$

\vec{D} – электрическая индукция (смещение) электрического поля.



4. Полная система уравнений Максвелла для электромагнитного поля

Применив теорему Гаусса для электрического и магнитного полей на случай изменяющихся полей и добавив к ним закон Ома для участка цепи и уравнения, связывающие основные (\vec{E}, \vec{B}) и вспомогательные (\vec{D}, \vec{H}) характеристики полей, Максвелл получил систему из семи уравнений электромагнетизма (уравнения Максвелла):

$$\begin{aligned}
 \oint_{\ell} \vec{E} d\vec{\ell} &= - \int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{S}; \\
 \oint_{\ell} \vec{H} d\vec{\ell} &= + \int_S \left(\vec{j}_{\text{пр}} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) d\vec{S}; \\
 \oint_S \vec{D} d\vec{S} &= \sum q_{\text{св}}; \quad \oint_S \vec{B} d\vec{S} = 0; \\
 \vec{D} &= \varepsilon \varepsilon_0 \vec{E}, \quad \vec{B} = \mu \mu_0 \vec{H}, \quad \vec{j}_{\text{пр}} = \sigma \vec{E}.
 \end{aligned} \tag{10-5}$$

В случае отсутствия в среде свободных электрических зарядов и токов проводимости имеем:

$$\begin{aligned}
 \oint_{\ell} \vec{E} d\vec{\ell} &= - \mu \mu_0 \int_S \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} d\vec{S} \\
 \oint_{\ell} \vec{H} d\vec{\ell} &= + \varepsilon \varepsilon_0 \int_S \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} d\vec{S}
 \end{aligned} \tag{10-6}$$

Из анализа этих уравнений следует, что если в вакууме ($\varepsilon = 1, \mu = 1$), где отсутствуют электрические заряды и токи проводимости, создать переменное электрическое (или магнитное) поле, то в этих же точках пространства создается магнитное (или электрическое) поле. Эти поля будут порождать и поддерживать друг друга, захватывая все новые и новые области пространства и образуя электромагнитную волну.

Скорость распространения электромагнитных волн:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon\varepsilon_0\mu\mu_0}} = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon\mu}} \quad (10-7)$$

где $c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}} = 3 \cdot 10^8$ м/с – скорость света в вакууме.

Т. о. Максвелл сделал предположение, что свет – это электромагнитная волна!!!