

Тема: Уравнения Максвелла

В 60-х годах 19 века Максвелл обобщив известные к тому времени законы электростатики и магнетизма разработал законченную теорию *единого электромагнитного поля*.

Она решает основную задачу электродинамики:
зная распределение токов и электрических зарядов в пространстве, можно определить характеристики создаваемого ими электромагнитного поля.

Прежде чем записать свои уравнения Максвелл ввёл понятие **тока смещения** и рассмотрел его свойства. Рассмотрим, что такое ток смещения?

Ток смещения

Рассмотрим конденсатор в цепи постоянного и переменного тока. Наблюдения показывают, что:

1. - постоянный ток конденсатор не пропускает (то есть ток в цепи отсутствует),
- переменный ток конденсатор пропускает (то есть ток в цепи существует).
2. Во время перезарядки конденсатора одинаковое по величине магнитное поле существует не только вокруг подводящих ток проводов, но и вокруг конденсатора, где тока проводимости нет.

Что является источником этого поля? Максвелл предложил следующее объяснение: *если между обкладками конденсатора находится диэлектрик, то при перезарядке конденсатора под действием электрического поля происходит смещение связанных с атомом электрических зарядов (электронов), которое можно рассматривать как своеобразный электрический ток, который Максвелл назвал **током смещения**.*

Математические вычисления показывают, что плотность тока смещения можно

определить по формуле

$$\vec{j}_{\text{смещ}} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t},$$

где $\vec{D} = \epsilon \epsilon_0 \vec{E} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P}$ - вектор электрического смещения, $\frac{A}{M^2}$;

а \vec{P} - вектор поляризованности диэлектрика, $\frac{A}{M^2}$.

Таким образом,

плотность тока смещения – это частная производная вектора электрического смещения \vec{D} по времени t .

(то есть, в любой точке пространства, где изменяется электрическое поле, существует ток смещения, который создаёт вокруг себя магнитное поле).

Рассмотрим подробнее ток смещения, для чего найдём производную \vec{D} по времени:

$$\vec{j}_{\text{смещ}} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \frac{\partial (\epsilon_0 \vec{E} + \vec{P})}{\partial t} = \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \frac{\partial \vec{P}}{\partial t} \quad (1)$$

Из (1) следует, что ток смещения, текущий через конденсатор, состоит из двух слагаемых:

1. $\frac{\partial \vec{P}}{\partial t}$ - называется **плотностью тока поляризации** (связано со смещением зарядов в атомах диэлектрика)

2. $\epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$ - называется **плотностью тока смещения в вакууме** (не связано со смещением зарядов в атомах диэлектрика, а обусловлено изменением электрического поля внутри диэлектрика).

Из анализа уравнения (1) следует важнейший вывод о том, что **ток смещения могут создавать не только движущиеся связанные заряды в диэлектрике, но и изменяющееся со временем электрическое поле.**

(то есть, если взять конденсатор без диэлектрика (тогда $\vec{P} = 0$ и, следовательно, $\frac{\partial \vec{P}}{\partial t} = 0$), то через конденсатор всё равно будет протекать ток смещения и в цепи, как

и прежде, будет существовать ток и магнитное поле вокруг конденсатора.)

Наблюдения подтверждают этот вывод.

Током смещения называют величину, равную потоку вектора плотности тока смещения через произвольную поверхность S , то есть

$$I_{\text{смещ}} = \int_S \vec{j}_{\text{смещ}} d\vec{S} = \int_S \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} d\vec{S}.$$

Ток смещения в вакууме

По своей физической природе **ток смещения в вакууме** – это изменяющееся со временем переменное электрическое поле. Током его назвали потому, что:

1. как и ток проводимости изменяющееся во времени электрическое поле создаёт вокруг себя магнитное поле,
2. имеет размерность тока.

Уравнения Максвелла

Уравнения Максвелла играют в электродинамике покоящихся сред такую же роль, как и три закона Ньютона в механике или три начала в термодинамике.

Уравнения Максвелла в интегральной форме (или полевые уравнения Максвелла)

1. Циркуляция вектора \vec{E} вдоль произвольного замкнутого контура L равна потоку вектора $\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$ через поверхность S , охватывающую этот контур, взятому с противоположным знаком, то есть

$$\oint_L \vec{E} d\vec{l} = - \int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{S}$$

физический смысл: переменное магнитное поле порождает вокруг себя вихревое электрическое поле.

2. Циркуляция вектора \vec{H} вдоль произвольного замкнутого контура L равна потоку вектора $\vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$ через поверхность S , охватывающую этот контур, то

есть

$$\oint_L \vec{H} d\vec{l} = \int_S \left(\vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) d\vec{S}$$

физический смысл: магнитное поле создаётся не только токами проводимости, но и изменяющимся во времени электрическим полем.

3. Поток вектора \vec{D} через произвольную замкнутую поверхность S , равен алгебраической сумме свободных электрических зарядов, находящихся внутри этой поверхности, то есть

$$\oint_S \vec{D} d\vec{S} = \int_V \rho dV$$

физический смысл: оно показывает, что источником электростатического поля являются свободные электрические заряды.

4. Поток вектора \vec{B} через произвольную замкнутую поверхность S , равен нулю, то есть

$$\oint_S \vec{B} d\vec{S} = 0$$

физический смысл: оно показывает, что в природе не существует магнитных зарядов.

Это фундаментальные уравнения теории электромагнитного поля.

Из анализа 1-го и 2-го законов Максвелла следует, что переменное магнитное поле порождает вихревое электрическое, а переменное электрическое поле порождает магнитное, то есть переменные электрическое и магнитное поля неразрывно связаны друг с другом и являются просто проявлениями единого электромагнитного поля.