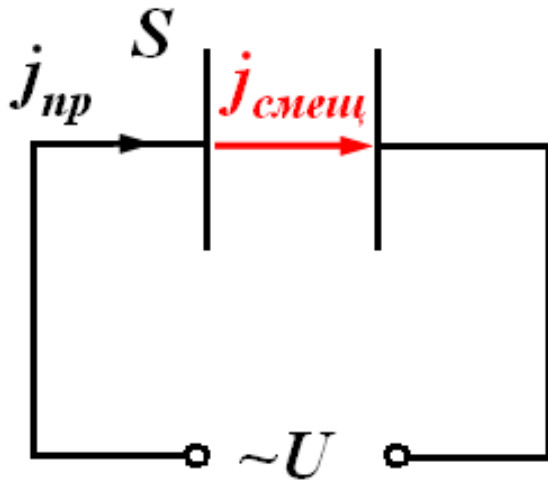


Ток смещения

Максвелл предположил, что **переменное электрическое поле подобно электрическому току порождает магнитное поле**, и ввел понятие ***ток смещения***.



Постулируется: линии тока проводимости на границах обкладок конденсатора переходят в линии тока смещения.

Ток смещения

$$j_{np} = j_{см} \quad (1)$$

$$j_{np} = \frac{I}{S} \quad (2)$$

$$I = \frac{dq}{dt} \quad (3)$$

Уравнение (3) показывает, как увеличивается заряд q на обкладках конденсатора C .

Заряд на обкладках конденсатора

$$q = \sigma S \quad (4)$$

Ток смещения

Ток в цепи

$$I = S \frac{d\sigma}{dt} \quad (5)$$

С учетом уравнений (1), (2) получаем:

$$\left. \begin{aligned} j_{см} &= \frac{I}{S} = \frac{d\sigma}{dt} & (6) \\ E &= \frac{\sigma}{\varepsilon_0} & (7) \\ D &= \varepsilon_0 E = \sigma & (8) \end{aligned} \right\} \begin{aligned} j_{см} &= \frac{dD}{dt} & (9) \\ \vec{j}_{см} &= \frac{d\vec{D}}{dt} & (10) \end{aligned}$$

D - электрическая индукция.

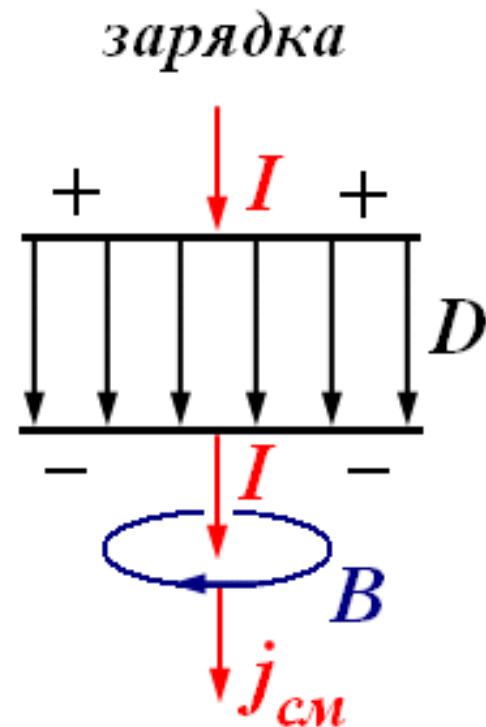
Ток смещения

$$\vec{j}_{см} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad \vec{D} \uparrow \uparrow \vec{E}$$

- Конденсатор заряжается.

Электрическое поле
возрастает,
вектор $\vec{D}$ увеличивается,

$$\vec{j}_{см} \uparrow \uparrow \vec{D}$$



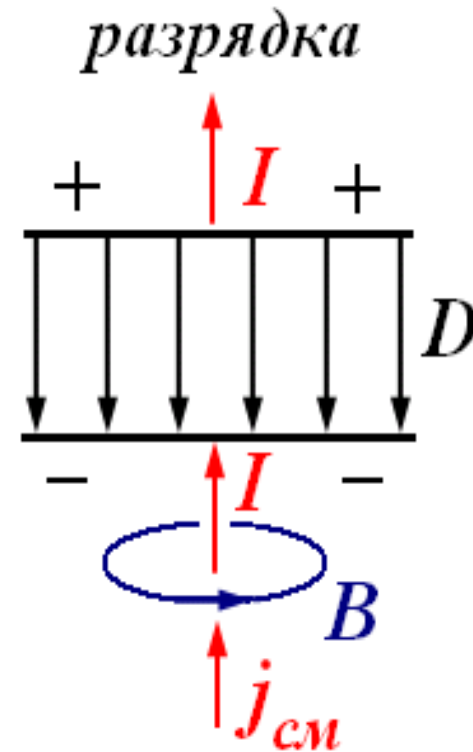
Ток смещения

- Конденсатор разряжается.

Электрическое поле убывает,
вектор $\vec{D}$ уменьшается,

$$\vec{j}_{см} \uparrow \downarrow \vec{D}.$$

$$\begin{aligned} I_{смещ} &= \int_S \vec{j}_{смещ} d\vec{S} = \\ &= \int_S \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} d\vec{S} = \frac{\partial}{\partial t} \int_S \vec{D} d\vec{S} = \frac{\partial \Phi_D}{\partial t} \end{aligned}$$



Ток смещения

Закон полного тока:

$$\oint_L \vec{H} d\vec{l} = \int_S (j_{полн}) d\vec{S}.$$

В нашем случае:

$$j_{полн} = j_{пр} + j_{см} = j + \frac{\partial D}{\partial t}$$

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

Циркуляция вектора H напряженности магнитного поля по произвольному замкнутому контуру L равна алгебраической сумме макротоков и тока смещения сквозь поверхность, натянутую на этот контур.

Ток смещения

$$D = \varepsilon_0 E + P$$

$$j_{см} = \varepsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial t}$$

$\frac{\partial P}{\partial t}$ - токи поляризации (из-за смещения связанных зарядов);

$\varepsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t}$ - «истинная» часть тока смещения, которая не связана с движением зарядов, а обусловлена лишь изменением электрического поля.

Ток смещения

Максвелл приписал току смещения только одно общее свойство с током проводимости – *способность создавать в окружающем пространстве магнитное поле.*

Следствия:

- 1) ток смещения не является направленным движением заряженных частиц, поэтому может существовать в вакууме,
- 2) протекание тока смещения не приводит к выделению тепла, поэтому проводник не нагревается.

Система уравнений Максвелла в интегральной форме

1.
$$\oint_L \vec{E} d\vec{l} = - \int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{S}.$$

2.
$$\oint_S \vec{B} d\vec{S} = 0.$$

3.
$$\oint_L \vec{H} d\vec{l} = \int_S \left(\vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) d\vec{S}.$$

4.
$$\oint_S \vec{D} d\vec{S} = \int_V \rho dV.$$

Уравнение Максвелла

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

1. Циркуляция вектора напряженности E вихревого электрического поля по замкнутому контуру равна скорости изменения магнитного потока через площадь контура, взятую с обратным знаком.
 - закон электромагнитной индукции,
 - первое положение теории Максвелла.
 - Физический смысл: Всякое изменение магнитного поля во времени вызывает появление вихревого электрического поля.

Уравнение Максвелла

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

2. Поток вектора индукции B магнитного поля через любую замкнутую поверхность равен нулю.
- силовые линии магнитного поля замкнуты.
 - Физический смысл: Источники магнитного поля в виде магнитных зарядов в природе отсутствуют.

Уравнение Максвелла

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

3. Циркуляция вектора напряженности H магнитного поля по замкнутому контуру равна алгебраической сумме токов, пронизывающих этот контур.

Закон полного тока.

Физический смысл: магнитное поле порождается не только током проводимости, но и переменным электрическим полем.

Уравнение Максвелла

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

4. Поток вектора электрической индукции D через любую замкнутую поверхность равен сумме свободных зарядов, охватываемых этой поверхностью.

Теорема Гаусса для вектора D .

- Физический смысл: Источником электрического поля является электрический заряд.

Система уравнений Максвелла в дифференциальной форме

Переход к уравнениям Максвелла в
дифференциальной форме осуществляется на
основании

теоремы Остроградского-Гаусса:

$$\oint_S \vec{A} d\vec{S} = \int_V \operatorname{div} \vec{A} dV,$$

теоремы Стокса:

$$\oint_L \vec{A} d\vec{l} = \int_S \operatorname{rot} \vec{A} d\vec{S}.$$

Система уравнений Максвелла в дифференциальной форме

Ротор вектора A определяется в декартовой системе координат следующим выражением:

$$\operatorname{rot} \vec{A} = \vec{i} \left(\frac{\partial A_z}{\partial y} - \frac{\partial A_y}{\partial z} \right) + \vec{j} \left(\frac{\partial A_x}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \vec{k} \left(\frac{\partial A_y}{\partial x} - \frac{\partial A_x}{\partial y} \right)$$

$$\left. \begin{aligned} \oint_L \vec{E} d\vec{l} &= \int_S \operatorname{rot} \vec{E} d\vec{S} \\ \oint_L \vec{E} d\vec{l} &= - \int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{S} \end{aligned} \right\} \quad \int_S \operatorname{rot} \vec{E} d\vec{S} = - \int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{S}$$

Система уравнений Максвелла в дифференциальной форме

1. $\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$

2. $\operatorname{div} \vec{B} = 0$

3. $\operatorname{rot} \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$

4. $\operatorname{div} \vec{D} = \rho$

Из уравнений Максвелла следует

- 1) Электрическое и магнитное поля взаимосвязаны, т.е. в общем случае электрическое и магнитное поля не могут существовать независимо друг от друга. Следовательно, существует единое *электромагнитное поле*.
- 2) Уравнения Максвелла являются инвариантными относительно преобразований Лоренца, т.е. их вид не меняется при переходе от одной ИСО к другой.

Из уравнений Максвелла следует

3) В общем случае уравнения Максвелла не симметричны.

$$\operatorname{rot} \vec{E} = \underbrace{-\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}}_{\substack{\text{одно} \\ \text{слагаемое}}} ; \quad \operatorname{rot} \vec{H} = \underbrace{\vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}}_{\substack{\text{два} \\ \text{слагаемых}}}.$$

$$\operatorname{div} \vec{D} = \rho; \quad \operatorname{div} \vec{B} = 0.$$

Из уравнений Максвелла следует

Если среда не содержит свободных зарядов ($\rho = 0$) и в ней нет токов проводимости ($j = 0$), то уравнения становятся более симметричными

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}; & \operatorname{rot} \vec{H} &= \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}. \\ \operatorname{div} \vec{B} &= 0; & \operatorname{div} \vec{D} &= 0. \end{aligned}$$

и отличаются только знаками первых двух уравнений

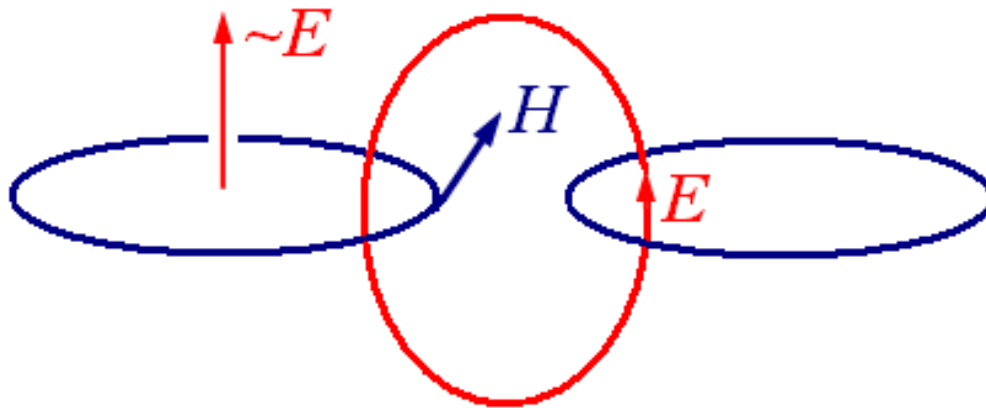
Из уравнений Максвелла следует

Различие в знаках правых частей уравнений Максвелла является необходимым условием существования устойчивого электромагнитного поля.

Если бы знаки при $\partial B/\partial t$ и $\partial D/\partial t$ были одинаковы, то бесконечно малое увеличение одного из полей привело бы к неограниченному возрастанию обоих полей, и наоборот.

Из уравнений Максвелла следует

4) Возникновение электромагнитной волны.



Материальные уравнения Максвелла

Для расчета полей в среде система уравнений Максвелла дополняется уравнениями, которые характеризуют электрические и магнитные свойства среды – *материальные уравнения Максвелла*:

$$\vec{D} = \varepsilon \varepsilon_0 \vec{E},$$

$$\vec{B} = \mu \mu_0 \vec{H},$$

$$\vec{j} = \sigma (\vec{E}_{\text{кул}} + \vec{E}_i).$$

Система статических уравнений Максвелла

В случае, когда вектора D и B не зависят от времени, т.е. D и $B = const$, система уравнений Максвелла принимает вид:

$$\oint_L \vec{E} d\vec{l} = 0, \quad \text{rot} \vec{E} = 0.$$

$$\oint_S \vec{B} d\vec{S} = 0, \quad \text{div} \vec{B} = 0.$$

$$\oint_L \vec{H} d\vec{l} = \int_S \vec{j} d\vec{S}, \quad \text{rot} \vec{H} = \vec{j}.$$

$$\oint_S \vec{D} d\vec{S} = \int_V \rho dV, \quad \text{div} \vec{D} = \rho.$$

Значение теории Максвелла

1. Показывает, что электромагнитное поле – это совокупность взаимосвязанных электрических и магнитных полей.
2. Предсказывает существование электромагнитных волн, распространяющихся от точки к точке с конечной скоростью.
3. Показывает, что световые волны являются электромагнитными волнами.
4. Связывает воедино электричество, магнетизм и оптику.