

Явление электромагнитной индукции

Электрический ток создает вокруг себя магнитное поле. Возможно ли обратное явление? Можно ли получить ток с помощью магнитного поля?



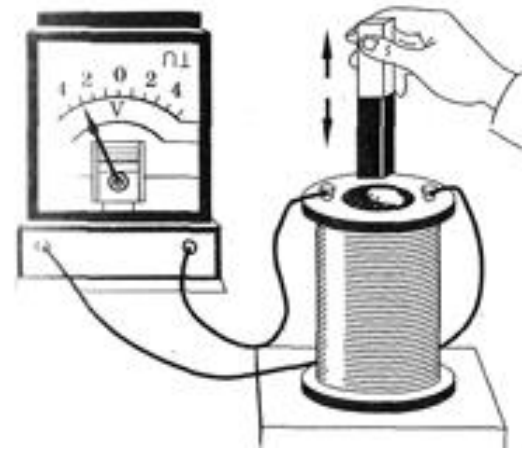
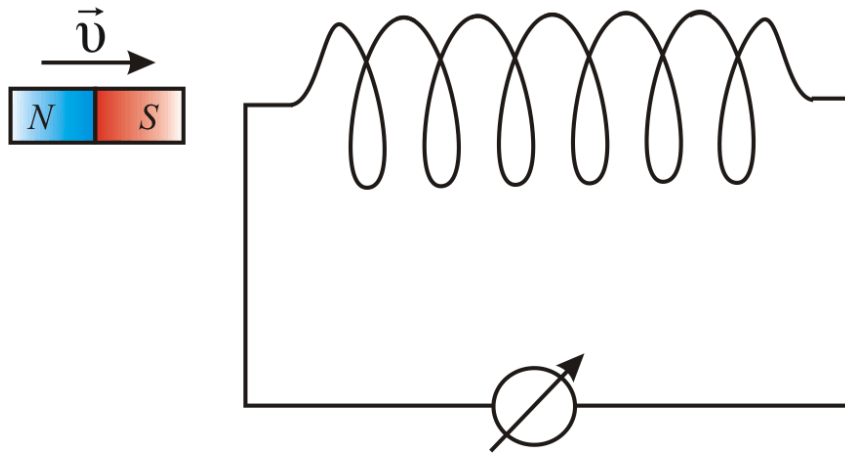
ФАРАДЕЙ Майкл (1791 – 1867) – знаменитый английский физик.

Исследования в области электричества, магнетизма, магнитооптики, электрохимии.

Создал лабораторную модель электродвигателя. Открыл индукцию при замыкании и размыкании цепи и установил их направление. Открыл законы электролиза, первый ввел понятия поля и диэлектрической проницаемости, в 1845 употребил термин «магнитное поле».

Кроме всего прочего М. Фарадей открыл явления диа- и парамагнетизма. Он установил, что все материалы в магнитном поле ведут себя по-разному: ориентируются по полю (пара и ферромагнетики) или поперек поля – диамагнетики.

Опыты Фарадея

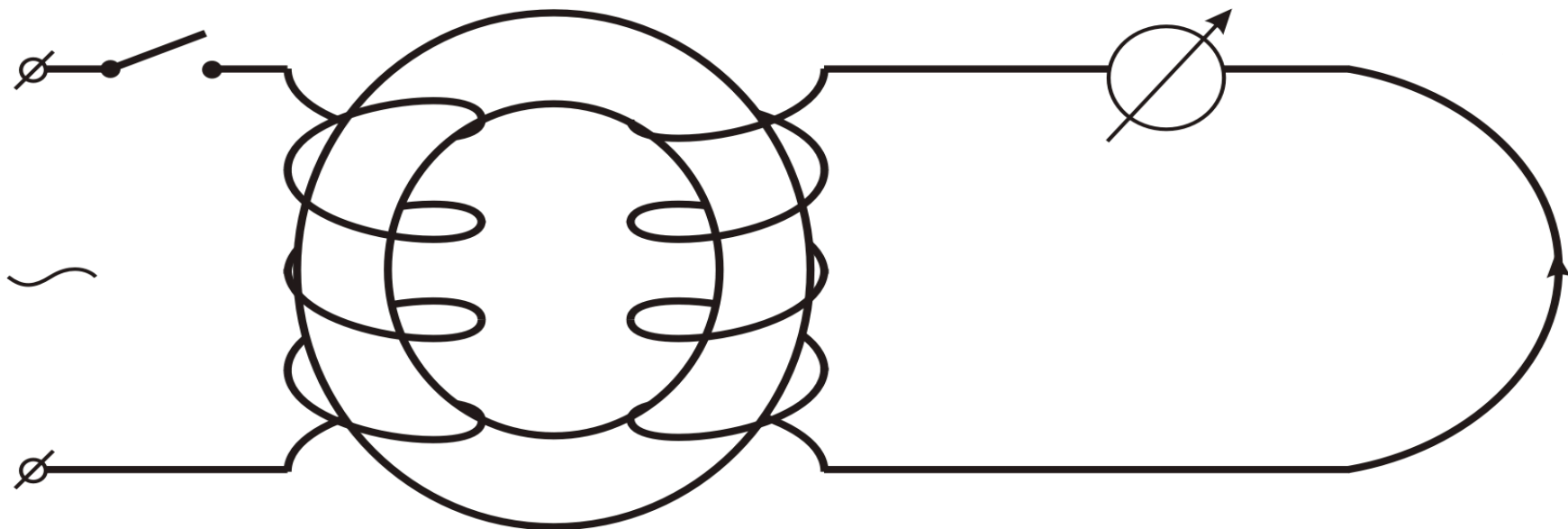


Если подносить магнит к катушке или наоборот, то в катушке возникнет электрический ток.

То же самое с двумя близко расположенными катушками: если к одной из катушек подключить источник переменного тока, то в другой также возникнет переменный ток.

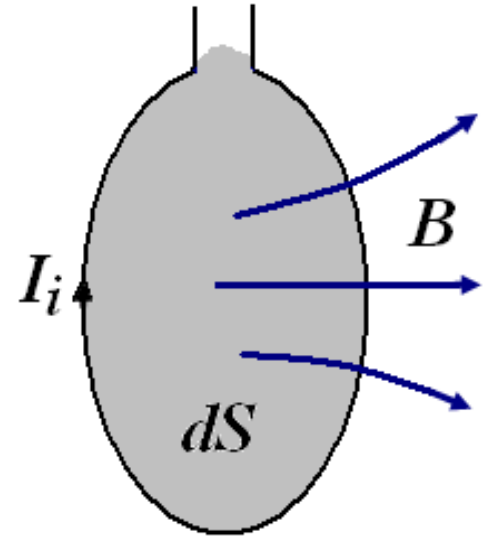
Опыты Фарадея

Этот эффект проявляется намного сильнее, если две катушки соединить сердечником



Опыты Фарадея

По определению Фарадея общим для этих опытов является то, что: **если поток вектора индукции $\Phi_B = \vec{B}\vec{S}$, пронизывающий замкнутый, проводящий контур меняется, то в контуре возникает электрический ток.**



Это явление называют **явлением электромагнитной индукции**, а ток — **индукционным I_i** .

Опыты Фарадея

В 1833 г. Ленц установил общее **правило** нахождения направления тока: **индукционный ток всегда направлен так, что магнитное поле этого тока препятствует изменению магнитного потока, вызывающего индукционный ток.**

Это утверждение носит название **правило Ленца.**

Явление электромагнитной индукции

Для создания тока в цепи необходимо наличие электродвижущей силы. Поэтому явление электромагнитной индукции свидетельствует о том, что при изменении магнитного потока в контуре возникает электродвижущая сила индукции

$$\mathcal{E}_i = - \frac{d\Phi_B}{dt}$$

Закон Фарадея
(закон электромагнитной индукции)

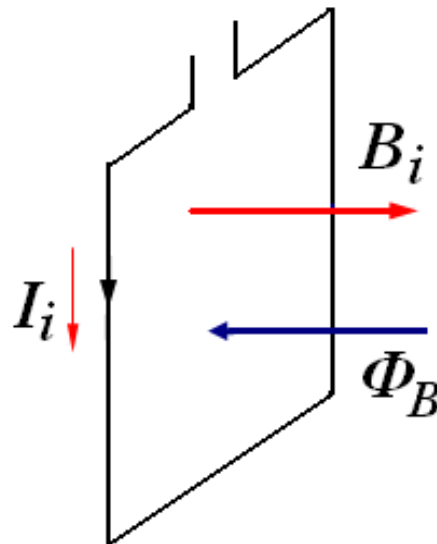
*Закон электромагнитной индукции Фарадея:
электродвижущая сила электромагнитной индукции в замкнутом контуре численно равна и противоположна по знаку скорости изменения магнитного потока через поверхность, натянутую на контур.*

Явление электромагнитной индукции

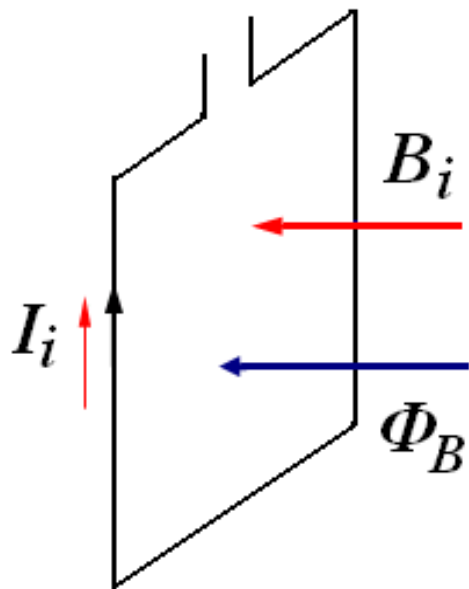
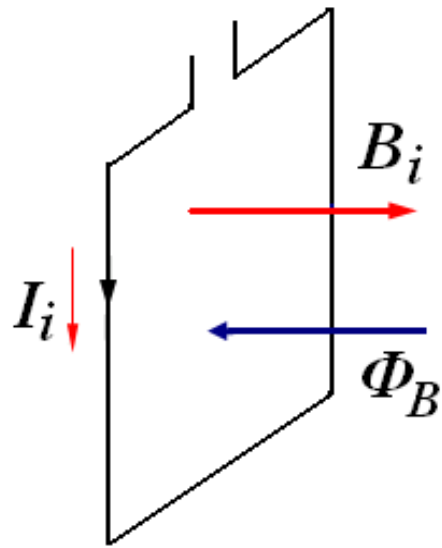
Знак минус в уравнении
отражает **правило Ленца** :

$$\mathcal{E}_i = - \frac{d\Phi_B}{dt}$$

индукционный ток в контуре имеет такое
направление, что создаваемое им магнитное поле
препятствует изменению магнитного потока.



Явление электромагнитной индукции



$$\mathcal{E}_i = - \frac{d\Phi_B}{dt}$$

- **Увеличение потока**

$$\frac{d\Phi_B}{dt} > 0$$

вызывает $\mathcal{E}_i < 0$, т.е.

индукционное поле $\mathbf{B}_i$ направлено навстречу внешнему полю, поток которого Φ_B .

- **Уменьшение потока**

$$\frac{d\Phi_B}{dt} < 0$$

вызывает , $\mathcal{E}_i > 0$ т.е. индукционное поле $\mathbf{B}_i$ совпадает с направлением внешнего поля, поток которого Φ_B .

Явление электромагнитной индукции

ВАЖНО: Закон Фарадея универсален, так как не зависит от способа изменения магнитного поля.

$$\mathcal{E}_i = -\frac{d\Phi_B}{dt} = -\frac{d(\vec{B}\vec{S})}{dt} = -\frac{d(BS \cos \alpha)}{dt}$$

В системе СИ размерность э.д.с. индукции:

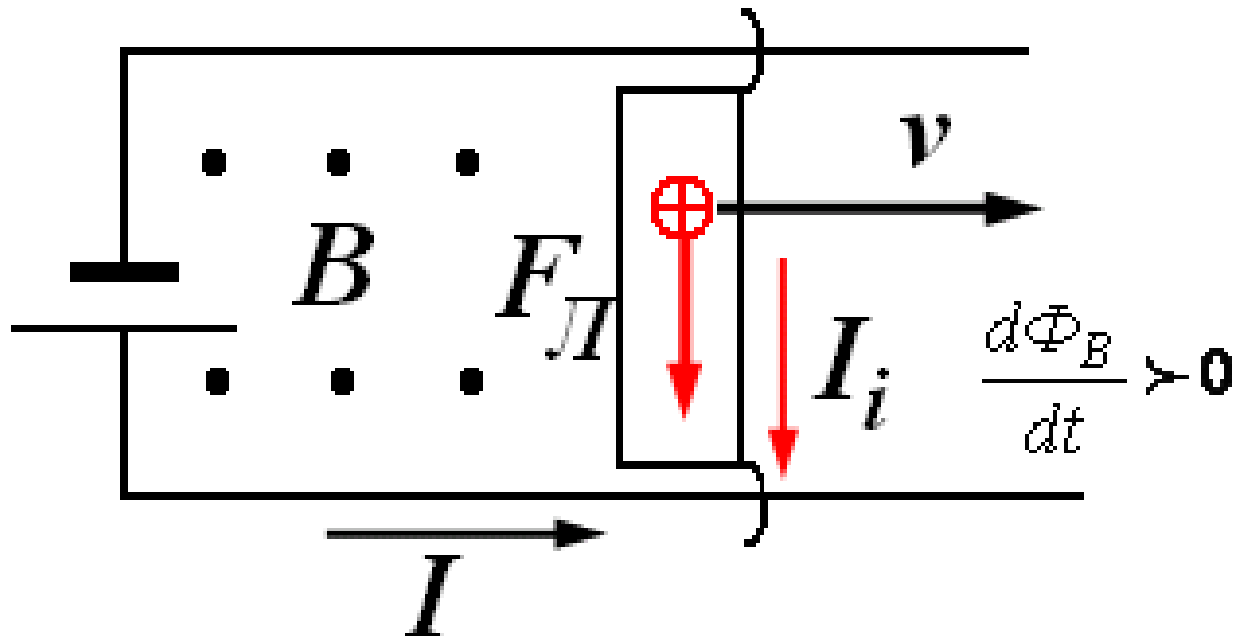
$$[\mathcal{E}_i] = [\text{Вб/с}] = \text{В}$$

Поток магнитной индукции можно менять следующими способами:

1. Изменять площадь рамки S .

(На электрические заряды в проводнике действует сила Лоренца)

$$\mathcal{E}_i = -\frac{d(BS \cos \alpha)}{dt} = -B \frac{d(S)}{dt}$$



Поток магнитной индукции можно менять
следующими способами:

2. Вращать рамку.

(На электрические заряды
в проводнике действует
сила Лоренца)

$$\mathcal{E}_i = -\frac{d(BS \cos \alpha)}{dt} = BS \frac{d \cos \omega t}{dt}$$

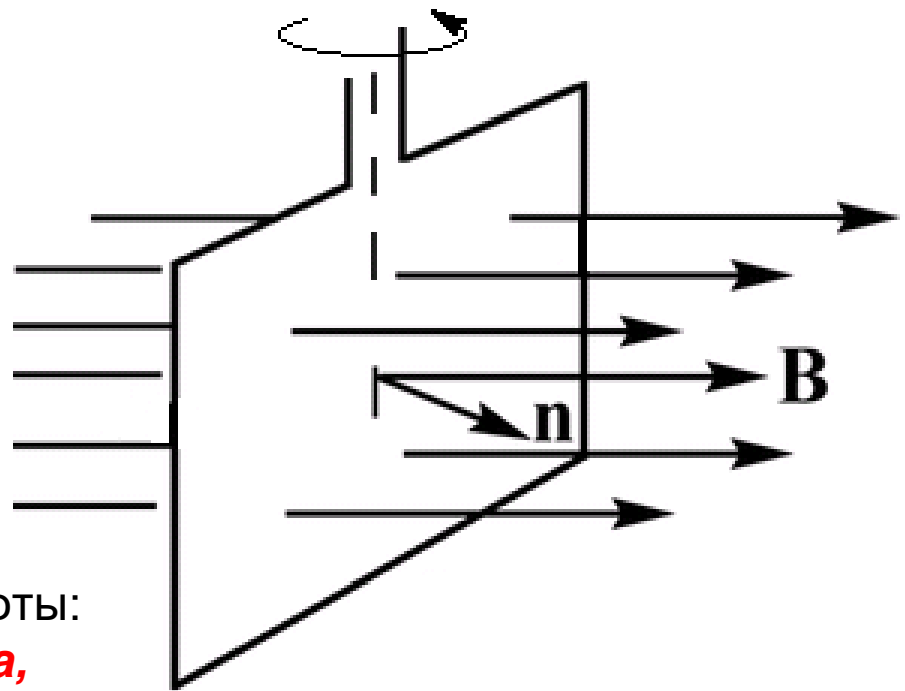
$$\omega = 2\pi\nu,$$

$$\mathcal{E}_i = -BS\omega \sin \omega t$$

$$\mathcal{E}_{\max} = NBS2\pi\nu$$

Это явление положено в основу работы:

**генераторов переменного тока,
электродвигателей**



Поток магнитной индукции можно менять следующими способами:

3. Переменное магнитное поле.

Переменное магнитное поле возбуждает в пространстве переменное электрическое поле, которое и является причиной индукционного тока в неподвижном проводнике (гипотеза Максвелла).

$$\mathcal{E}_i = - \frac{d\Phi_B}{dt}$$

$$\mathcal{E}_i = \oint_L \vec{E}_{\text{стор}} d\vec{l}$$

Вихревое электрическое поле

Неподвижный контур в переменном магнитном поле.

Силы Лоренца нет $\rightarrow$ необходимо считать, что

Переменное магнитное поле возбуждает в пространстве переменное электрическое поле, которое и является причиной индукционного тока в неподвижном проводнике (гипотеза Максвелла).

$$\mathcal{E}_i = - \frac{d\Phi_B}{dt}$$

$$\mathcal{E}_i = \oint_L \vec{E}_{\text{тор}} d\vec{l}$$

Вихревое электрическое поле

$$\mathcal{E}_i = \oint_L \vec{E}_{стор} d\vec{l}$$

Результирующее поле:

$E_{кул}$ — напряженность электростатического поля,
 $E_{стор}$ — напряженность поля сторонних сил.

$$E = E_{кул} + E_{стор}$$

$$E_{стор} = E - E_{кул}$$

$$\mathcal{E}_i = \oint_L (\vec{E} - \vec{E}_{кул}) d\vec{l} = \oint_L \vec{E} d\vec{l} - \underbrace{\oint_L \vec{E}_{кул} d\vec{l}}_0$$

$$\mathcal{E}_i = \oint_L \vec{E} d\vec{l} = -\frac{\partial \Phi_B}{\partial t} \neq 0$$

Вихревое электрическое поле

$$\mathcal{E}_i = \oint_L \vec{E} d\vec{l} = - \frac{\partial \Phi_B}{\partial t} \neq 0$$

следовательно, электрическое поле, возбуждаемое переменным магнитным полем – **вихревое**.

Вихревое электрическое поле

Отличия вихревого электрического поля от электростатического:

1. Силовые линии вихревого электрического поля – **замкнутые**.
2. **Работа** по перемещению единичного положительного точечного заряда в вихревом электрическом поле (циркуляция вектора $\mathbf{E}$) не равна нулю, а **равна э.д.с. индукции** ε_i .

Закон электромагнитной индукции в дифференциальной форме

Формула Стокса: $\oint_L \vec{A} d\vec{l} = \int_S \text{rot} \vec{A} d\vec{S}$

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

Контур не изменяет форму, следовательно, операции дифференцирования и интегрирования можно поменять местами и перейти к частной производной:

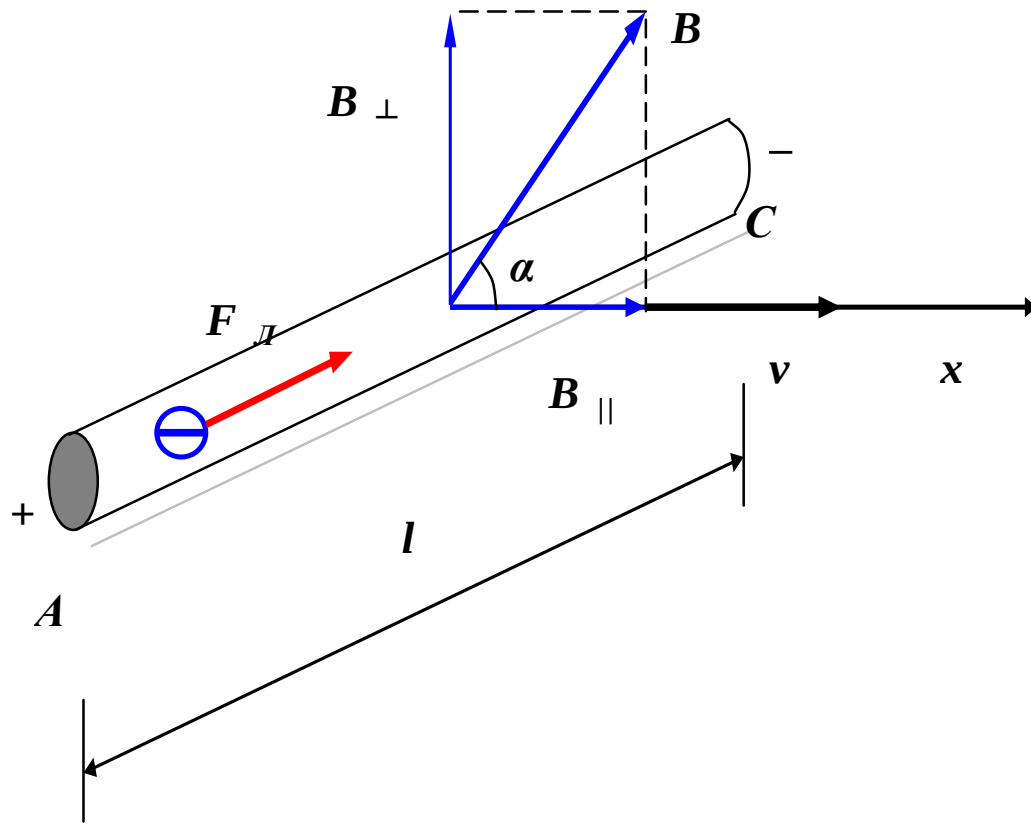
$$\oint_L \vec{E} d\vec{l} = - \int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{S}. \quad \Rightarrow \quad \oint_L \vec{E} d\vec{l} = \int_S \text{rot} \vec{E} d\vec{S} = - \int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{S}.$$

Закон электромагнитной индукции в дифференциальной форме

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

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

Электронный механизм возникновения э.д.с. индукции

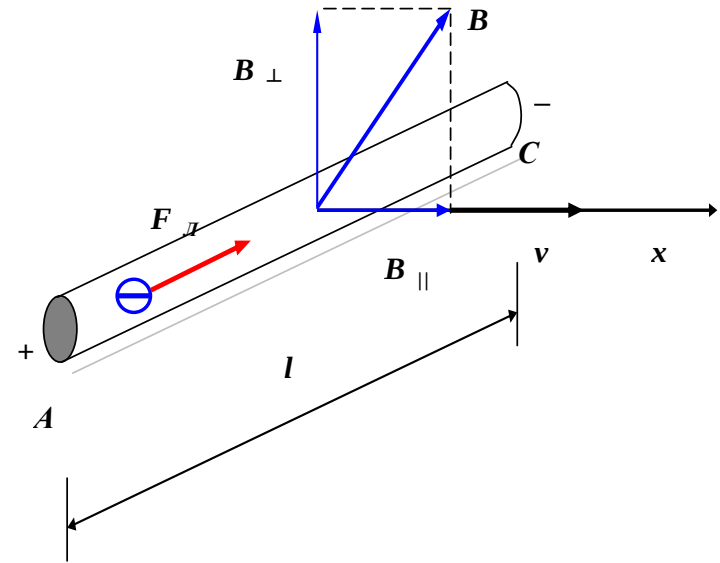


Отрезок проводника движется в постоянном магнитном поле индукцией $B = \textit{const.}$

На электроны проводимости металла действует

$$F_L = qvB \sin \alpha$$

Электронный механизм возникновения э.д.с. индукции



$$F_L = F_{\text{эл.стат.}}$$

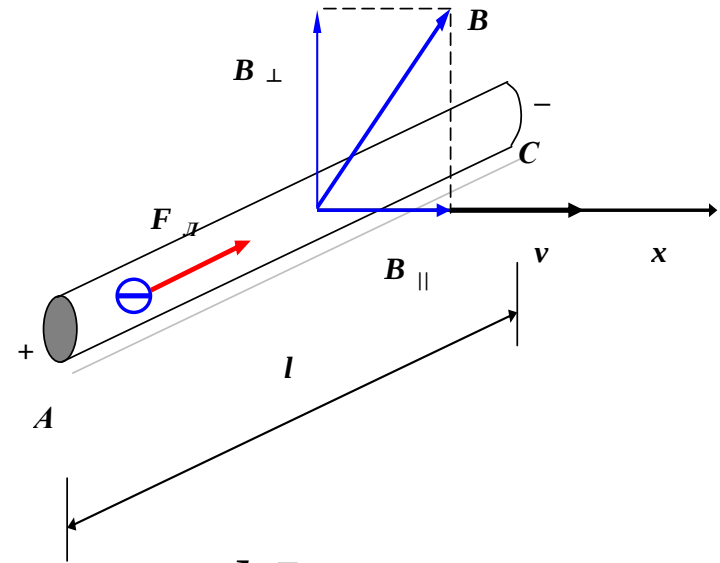
$$qvB \sin \alpha = qE$$

$$E = vB \sin \alpha$$

$$\Delta\varphi = El = vBl \sin \alpha = vB_{\perp} l$$

$$\varphi_A - \varphi_C = \Delta\varphi = -\mathcal{E}_i \quad v = \frac{dx}{dt} \quad l dx = dS$$

Электронный механизм возникновения э.д.с. индукции



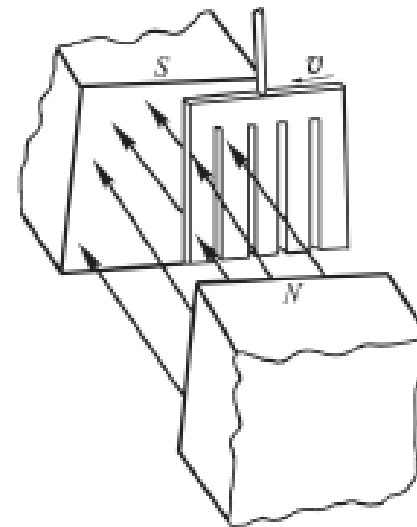
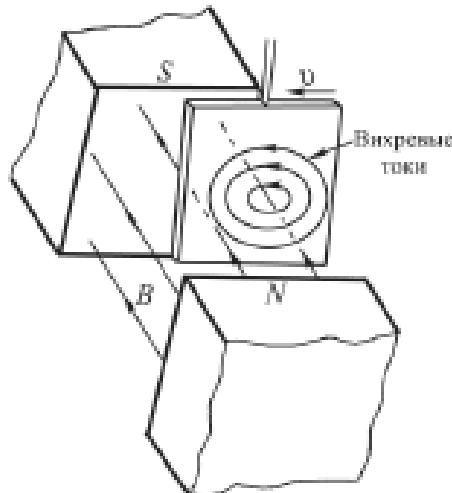
$$\begin{aligned}\mathcal{E}_i &= -B_{\perp} \frac{ldx}{dt} = -\frac{dB_{\perp} S}{dt} \\ &= -\frac{d(BS)}{dt} = -\frac{d\Phi_B}{dt}\end{aligned}$$

$d\Phi_B$ – поток через поверхность,
прочерчиваемую проводником при движении.

Электромагнитная индукция в технике.

Токи Фуко (вихревые токи)

- **Токи Фуко (вихревые токи)** – индукционные токи, возникающие в массивных сплошных проводниках, помещенных в переменное магнитное поле.
- Массивные проводники – поперечные размеры, которых соизмеримы с длиной проводника.



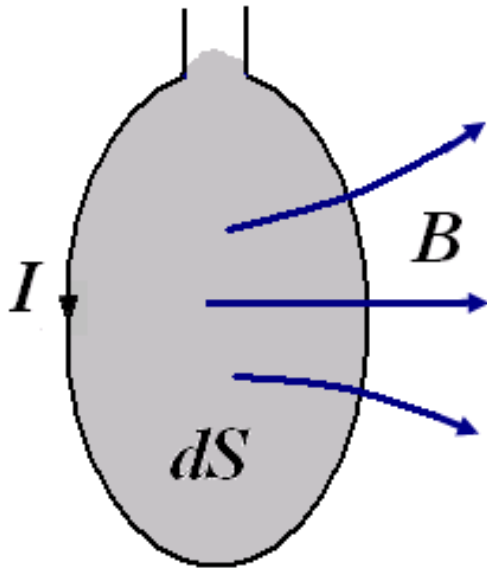
Явление самоиндукции

Индуктивность

Явление самоиндукции

ИНДУКТИВНОСТЬ

Ток I , текущий в замкнутом контуре, вокруг себя создает магнитное поле $\mathbf{B}$.



$$\left. \begin{aligned} dB &= \frac{\mu\mu_0 I dl \sin \alpha}{4\pi r^2} \\ \Phi_B &= \oint_S \vec{B} d\vec{S} \end{aligned} \right\} \begin{aligned} \Phi &\sim I \\ \Phi &= L \cdot I, \end{aligned}$$

где коэффициент пропорциональности L называется

индуктивностью контура.

Явление самоиндукции

При изменении тока I в контуре изменяется создаваемое им магнитное поле. Следовательно, в контуре индуцируется э.д.с.

$$\mathcal{E}_s = - \frac{d\Phi}{dt}$$

Этот процесс называется **самоиндукцией**.

В системе СИ индуктивность измеряется в генри: $[L] = \Gamma_{\text{H}} = \text{Вб}/\text{А} = \text{В} \cdot \text{с}/\text{А}$.

Закон Фарадея для самоиндукции

$$\mathcal{E}_S = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d(LI)}{dt} = -\left(L \frac{dI}{dt} + I \underbrace{\frac{dL}{dt}}_{\substack{0, \text{если} \\ L = \text{const}}} \right) = -L \frac{dI}{dt}.$$

$L = \text{const}$, если магнитная проницаемость μ среды и геометрические размеры контура постоянны.

Закон Фарадея для самоиндукции

$$\mathcal{E}_s = -L \frac{dI}{dt}$$

Знак минус в законе Фарадея в соответствии с **правилом Ленца** означает, что наличие индуктивности L приводит к замедлению изменения тока I в контуре.

Закон Фарадея для самоиндукции

$$\mathcal{E}_S = -L \frac{dI}{dt}$$

- Если ток I **возрастает**, то $dI / dt > 0$ и, соответственно, $\mathcal{E}_S < 0$, т.е. ток самоиндукции I_S направлен навстречу току I внешнего источника и замедляет его нарастание.
- Если ток I **убывает**, то $dI / dt < 0$ и, соответственно, $\mathcal{E}_S > 0$, т.е. ток самоиндукции I_S имеет то же направление, что и убывающий ток I внешнего источника и замедляет его убывание.

Закон Фарадея для самоиндукции

- Если контур обладает определенной индуктивностью L , то любое изменение тока I тормозится тем сильнее, чем больше L контура, т.е. контур обладает *электрической инертностью*.

**Индуктивность соленоида
ПОЛУЧИТЬ САМОСТОЯТЕЛЬНО!**