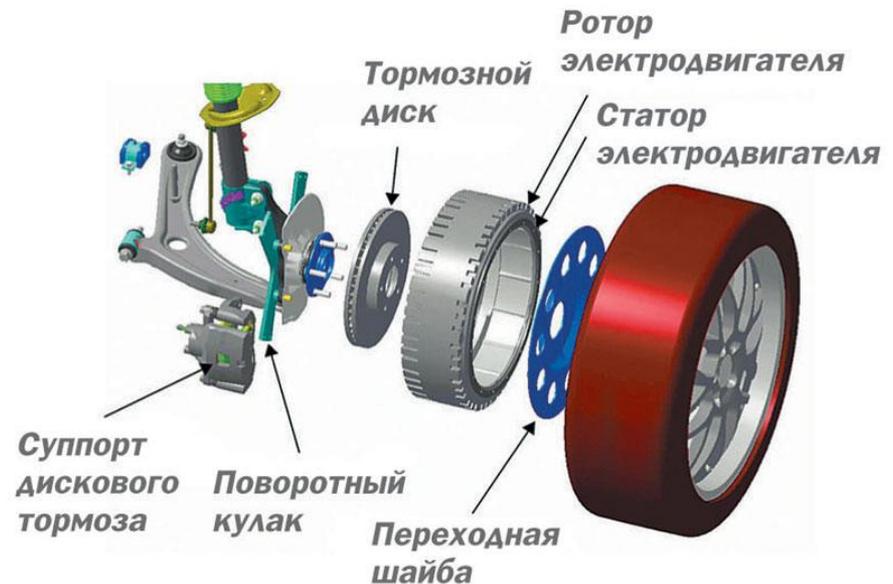
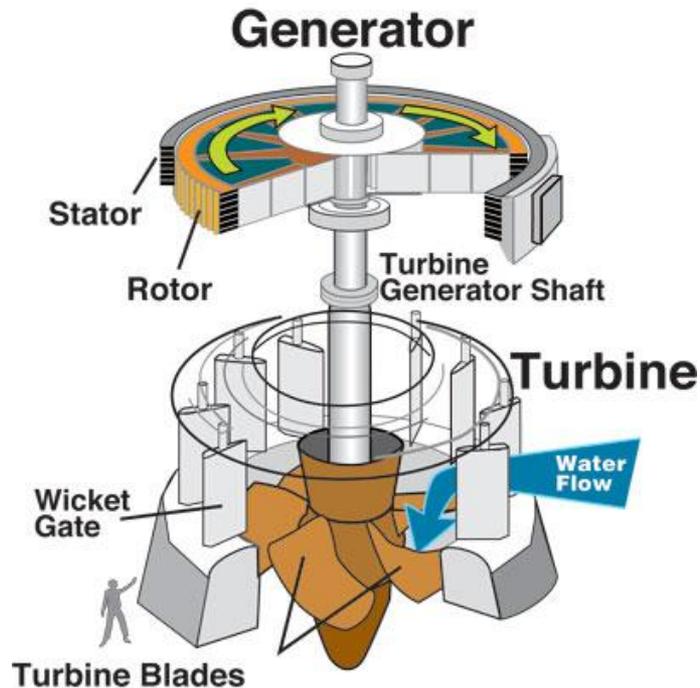


ЛЕКЦИЯ №10 Электромагнитная индукция

Элементы содержания: Опыт Фарадея. Магнитный поток. Явление электромагнитной индукции. Закон Фарадея. Правило Ленца. Магнитный поток, сцепленный с контуром, по которому течет ток. Индуктивность. Самоиндукция. Взамоиндукция. Энергия магнитного поля. Вихревое электрическое поле. Ток смещения. Обобщение закона Ампера. Система уравнений Максвелла.

Литература: Трофимова Т.И. Курс физики: Учеб. пособие для вузов. М.: Академия, 2006. С. 221-234, 246-252.



Опыт Фарадея

Г.Эрстед (1820 г.):

электрический ток

порождает магнитное поле



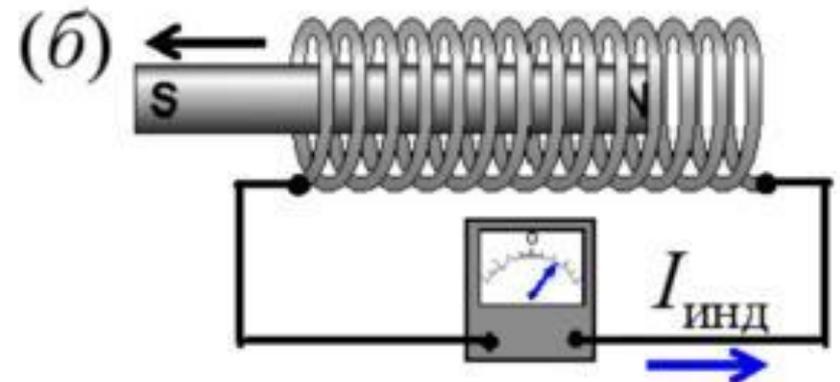
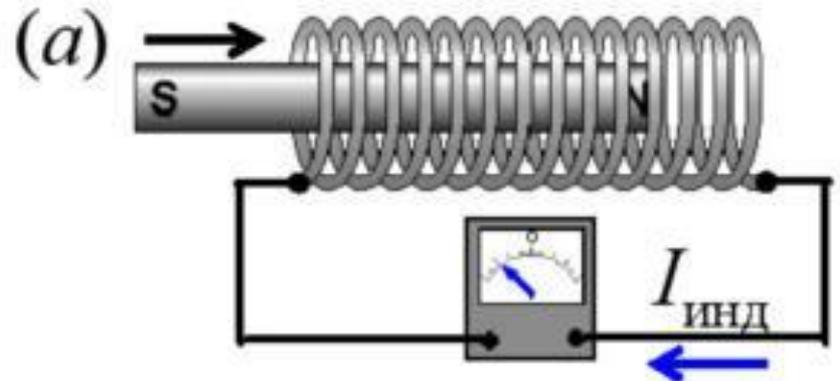
Майкл Фарадей (1831 г.),

Джозеф Генри (1832 г.):

изменяющееся во

времени магнитное поле

порождает электрический ток.



Магнитный поток Φ , Φ_B - скалярная величина, определяющая число линий магнитной индукции, проходящих через данную поверхность; $[\Phi_B]=\text{Вб}$.

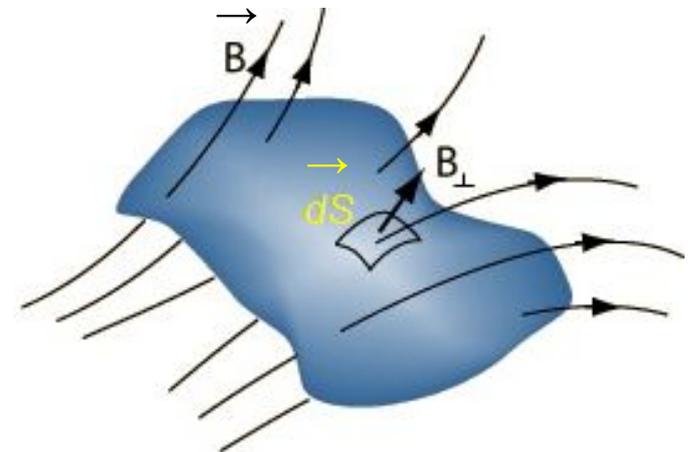
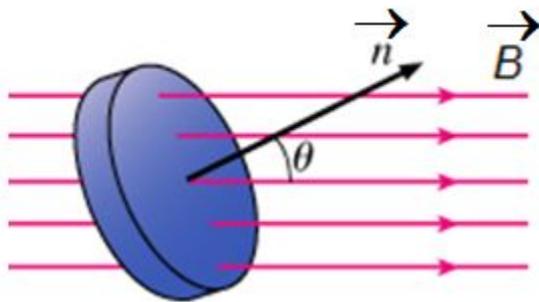
Вычисление магнитного потока

а) однородное поле, плоская поверхность:

$$\Phi_B = BS \cos \theta = \vec{B} \cdot \vec{S} \quad , \quad (10.1)$$

где $\vec{S} = S \cdot \vec{n}$ - вектор, численно равный площади поверхности, через которую рассчитывается поток, и направленный вдоль нормали к этой поверхности

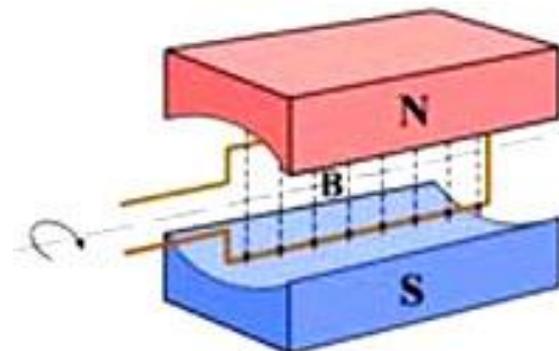
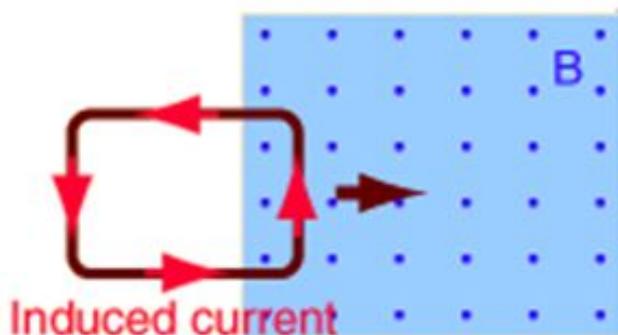
б) общий случай: $\Phi_B = \int \vec{B} \cdot d\vec{S} \quad . \quad (10.2)$



Электромагнитная индукция (в широком смысле) – явление, при котором изменяющееся во времени магнитное поле порождает электрическое поле, а изменяющееся электрическое поле – магнитное поле.

Электромагнитная индукция (в узком смысле) – явление, при котором в электропроводящем контуре возникает индукционный ток при изменении магнитного потока, пронизывающего поверхность, ограниченную этим контуром.

Явление электромагнитной индукции лежит в основе работы генератора электрического тока. Первый генератор переменного тока, работающий на принципе электромагнитной индукции, сконструировал французский изобретатель **Ипполит Пикси в 1832 г.**



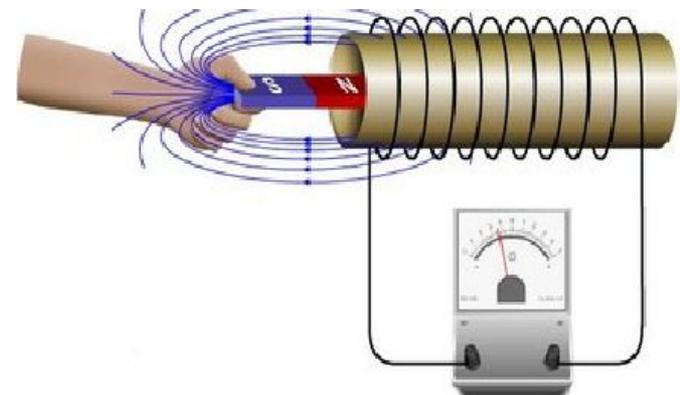
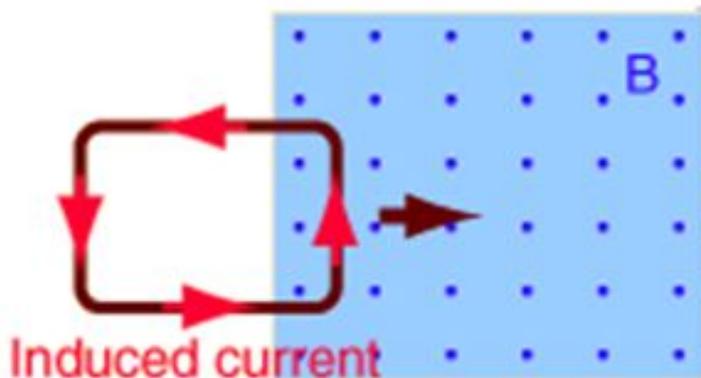
Закон Фарадея для контура: ЭДС индукции, возникающей в проводящем контуре, пропорциональна скорости изменения во времени магнитного потока, пронизывающего поверхность, ограниченную этим контуром:

$$\mathcal{E}_i = -\frac{d\Phi_B}{dt} \quad (10.3)$$

Закон Фарадея для катушки:

$$\mathcal{E}_i = -N \frac{d\Phi_B}{dt} \quad (10.4)$$

где N - число витков катушки.



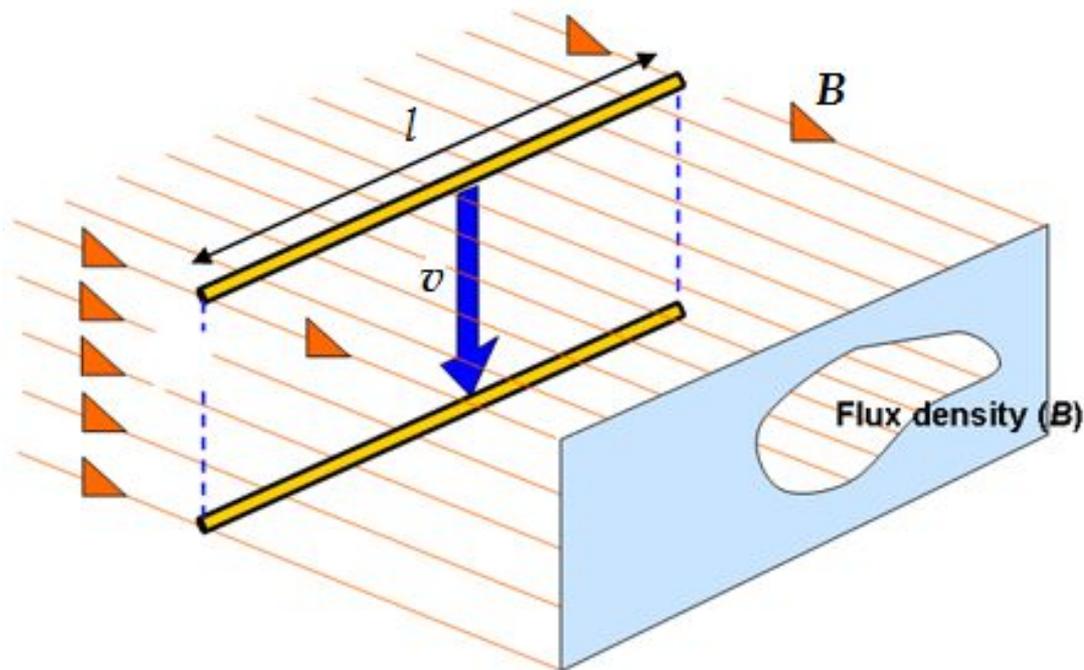
Закон Фарадея для движущегося проводника: при движении проводника в магнитном поле на его концах индуцируется разность потенциалов, пропорциональная скорости движения проводника:

$$\Delta\varphi_i = Blv \sin \alpha \quad , \quad (10.5)$$

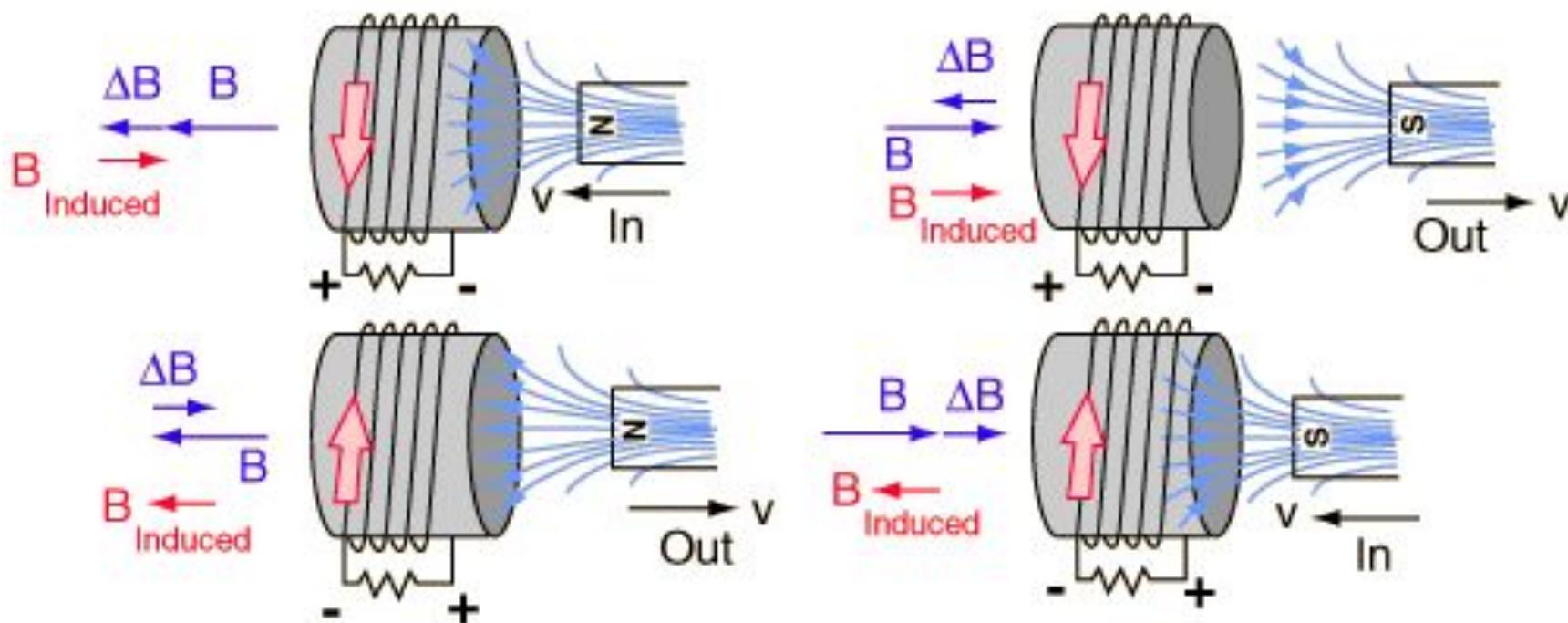
где B - магнитная индукция поля, в котором движется проводник;

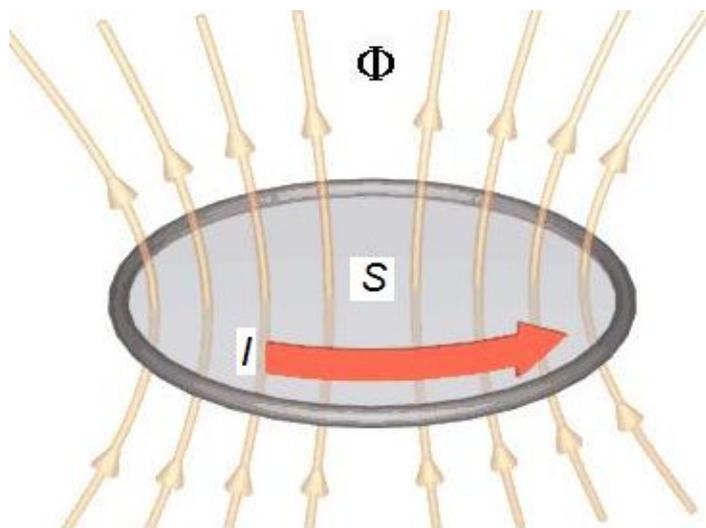
v и l - скорость и длина проводника, соответственно;

α - угол между направлением вектора скорости проводника и направлением вектора магнитного поля.



Правило Ленца: индукционный ток имеет такое направление, при котором его собственное магнитное поле противодействует изменению магнитного потока, вызвавшему этот индукционный ток.





Магнитный поток, сцепленный с контуром, по которому течет ток :

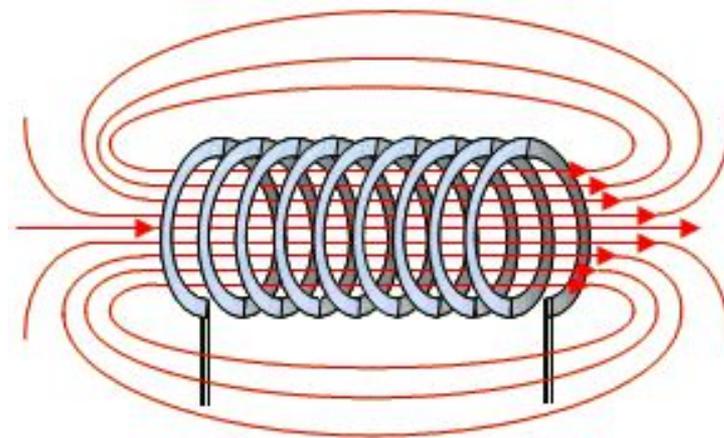
$$\Phi = LI \quad . \quad (10.6)$$

где L - **индуктивность** – скалярная величина, характеризующая магнитные свойства электрического контура и зависящая от размеров и формы контура, а также от магнитных свойств окружающей среды; $[L] = \text{Гн}$.

Индуктивность катушки:

$$L = \mu\mu_0 N^2 S / l \quad . \quad (10.7)$$

где μ - магнитная проницаемость среды внутри катушки; N - число витков катушки; S - площадь поверхности, ограниченной одним витком катушки; l - длина катушки.

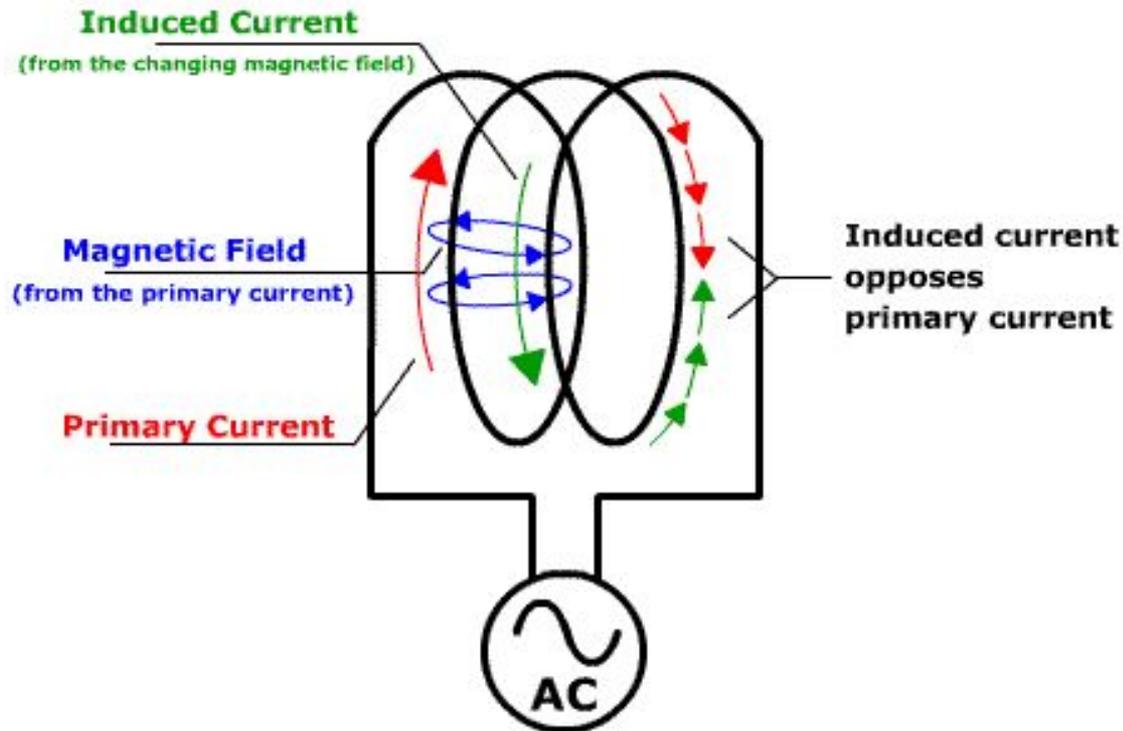


Самоиндукция (Дж.Генри, 1831 г.) - явление, при котором в проводящем контуре возникает индукционный ток при изменении силы тока в этом контуре.

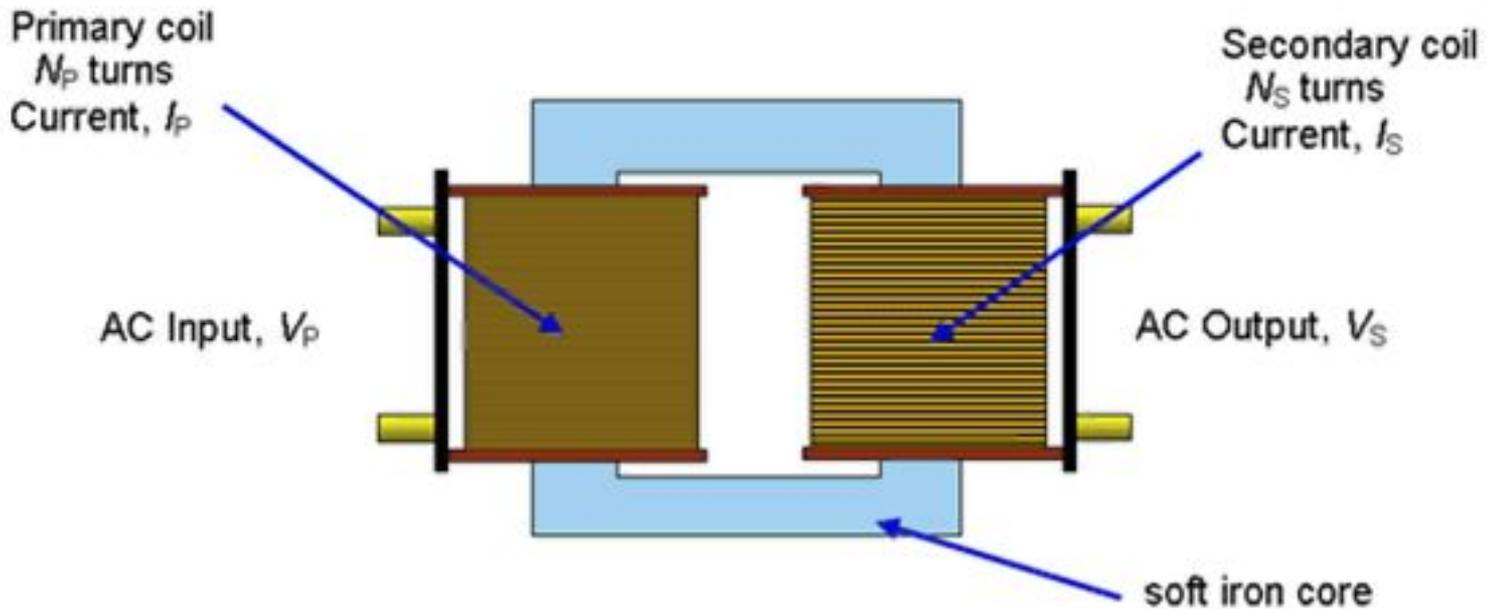
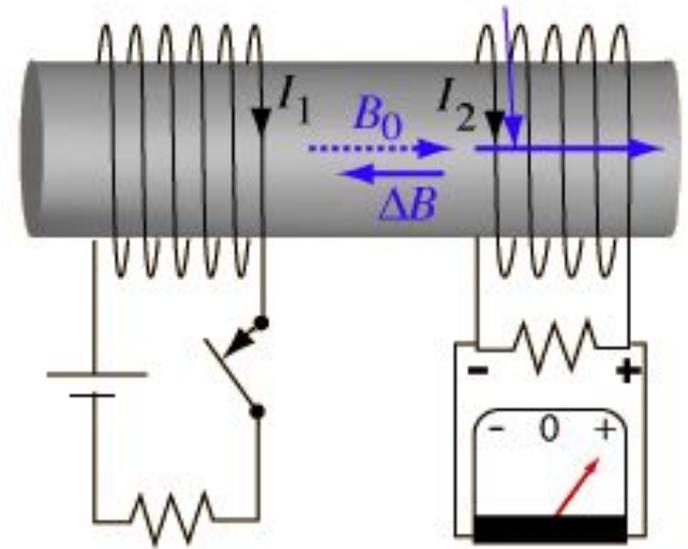
Закон самоиндукции: ЭДС самоиндукции, возникающей в проводящем контуре, пропорциональна скорости изменения во времени силы тока в этом контуре:

$$\mathcal{E}_i = -L \frac{dI}{dt} \quad . \quad (10.8)$$

Индуктивность есть мера электрической инертности контура: чем больше индуктивность, тем труднее изменить силу тока в контуре.



Взаимоиндукция - явление, при котором в проводящем контуре возникает индукционный ток при изменении силы тока в соседнем контуре.



Уравнения Максвелла (Джеймс Максвелл, 1860-65 г.г.)

Уравнения Максвелла – фундаментальные уравнения классической макроскопической электродинамики, описывающие электромагнитные явления.

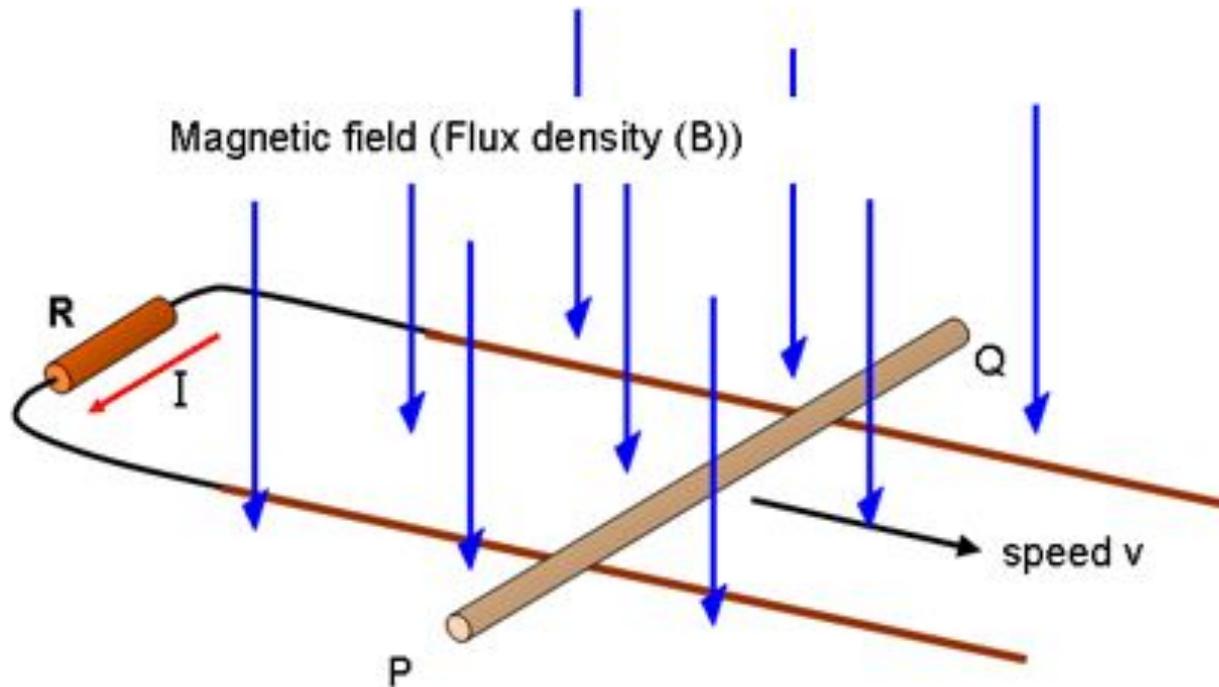
Сформулированы на основе обобщения эмпирических (т.е. полученных опытным путем) законов электрических и магнитных явлений (Кулона, 1785 г.; Гаусса, 1839 г.; Эрстеда, 1820 г.; Ампера, 1820 г.; Фарадея, 1831 г.)

Обобщение закона Фарадея

Электромагнитная индукция – явление возникновения ЭДС в проводящем контуре:

- 1) движущемся в постоянном магнитном поле;
- 2) находящемся в переменном магнитном поле.

(1) При движении проводника в магнитном поле свободные электроны проводника под действием силы Лоренца приводятся в движение относительно проводника; в результате в проводнике возникает электрический ток.



(2) **Гипотеза Максвелла № 1:** Всякое изменяющееся во времени магнитное поле возбуждает в окружающем пространстве электрическое поле, которое и является причиной возникновения индукционного тока в контуре.



Используя гипотезу № 1 и закон Фарадея (10.3), Дж.Максвелл получил уравнение

$$\oint_{(\Gamma)} (\vec{E} \cdot d\vec{r}) = - \int_{(S)} \left(\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{S} \right) \quad (10.9)$$

- закон электромагнитной индукции Фарадея в формулировке Максвелла

Обобщение закона Ампера (закона полного тока)

Закон Ампера: циркуляция напряженности магнитного поля вдоль произвольного контура равна результирующей силе тока, пересекающего охваченную контуром поверхность:

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{r} = I_{\Sigma}$$

Гипотеза Максвелла № 2: Если всякое изменяющееся во времени магнитное поле возбуждает в окружающем пространстве электрическое поле, то должно существовать и обратное явление: всякое изменение во времени электрического поля вызывает появление в окружающем пространстве магнитного поля.

Источники магнитного поля

**ТОК
проводимости**

**переменное
электрич. поле**

Используя гипотезу № 2 и закон Ампера, Дж.Максвелл получил уравнение

$$\oint_{(\Gamma)} (\vec{H} \cdot d\vec{r}) = \int_{(S)} (\vec{j} \cdot d\vec{S}) + \int_{(S)} \left(\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \cdot d\vec{S} \right) \quad (10.10)$$

- закон полного тока в формулировке Максвелла

Уравнения (10.9) и (10.10) совместно с двумя уравнениями, являющимися математическими формулировками закона Гаусса, для электрического и магнитного полей образуют **систему уравнений Максвелла**:

$$\left. \begin{aligned} \oint_{(\Gamma)} (\vec{H} \cdot d\vec{r}) &= \int_{(S)} (\vec{j} \cdot d\vec{S}) + \int_{(S)} \left(\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \cdot d\vec{S} \right) \\ \oint_{(\Gamma)} (\vec{E} \cdot d\vec{r}) &= - \int_{(S)} \left(\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{S} \right) \\ \oint_{(S)} (\vec{D} \cdot d\vec{S}) &= q \\ \oint_{(S)} (\vec{B} \cdot d\vec{S}) &= 0 \end{aligned} \right\} \cdot \quad (10.11)$$

Величины \vec{B} и \vec{H} , \vec{E} и \vec{D} , \vec{j} и \vec{E} не независимы: они связаны **материальными уравнениями** :

$$\left. \begin{aligned} \vec{B} &= \mu\mu_0 \vec{H} \\ \vec{D} &= \varepsilon\varepsilon_0 \vec{E} \\ \vec{j} &= \vec{E} / \rho \end{aligned} \right\} \cdot \quad (10.12)$$