

Лекция 19

4. Магнетизм

4.2. ЭМ индукция

Явление электромагнитной индукции. Опыты Фарадея. Индукционный ток. ЭДС индукции. Закон электромагнитной индукции. Правило Ленца.

Применение электромагнитной индукции. Токи Фуко. Скин-эффект. Явление самоиндукции. Индуктивность.

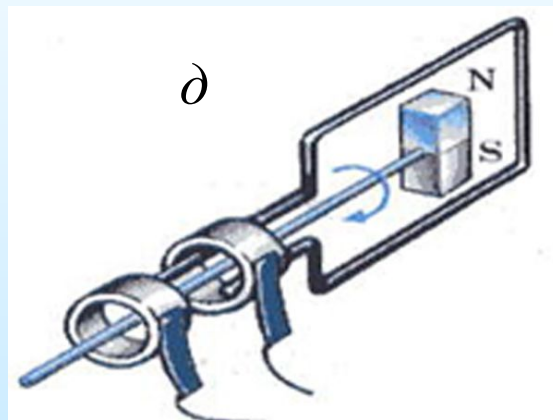
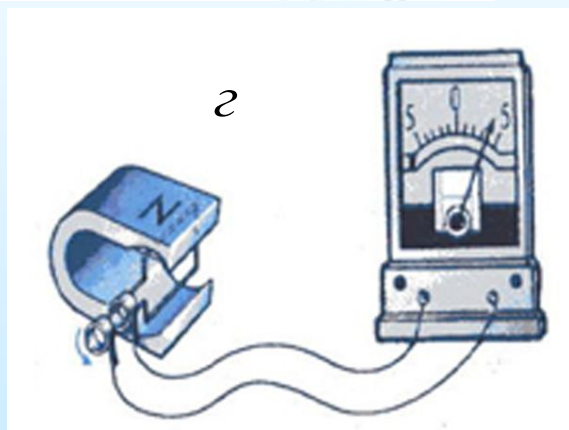
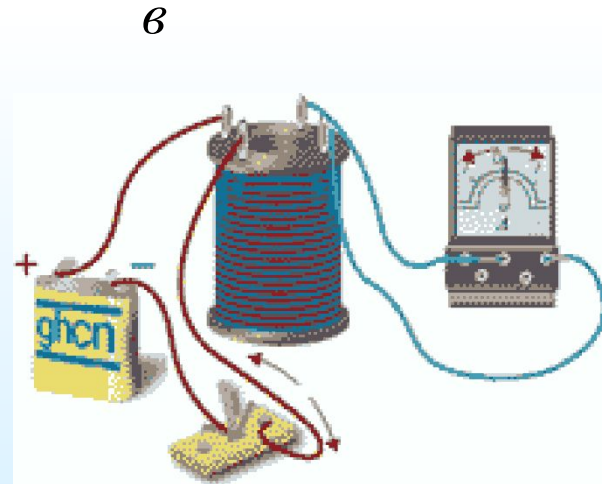
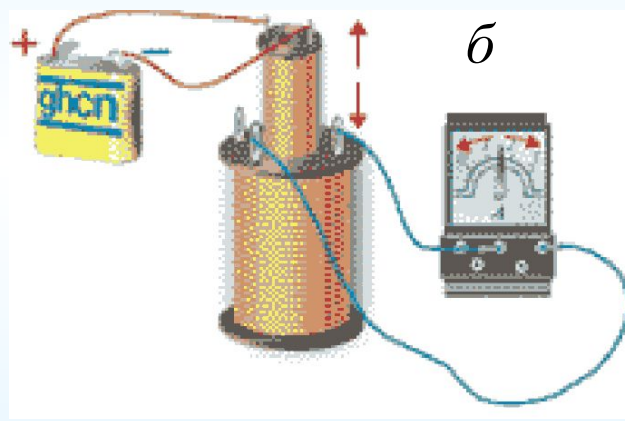
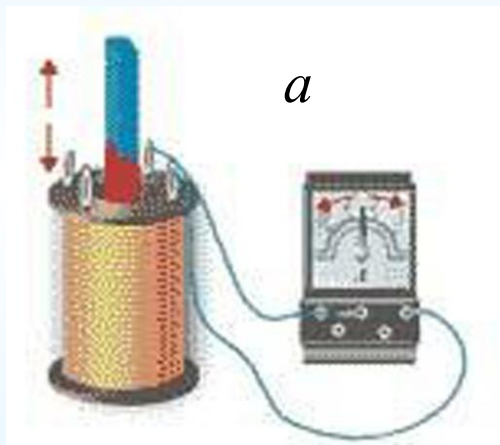
Взаимная индукция. Трансформатор. Энергия магнитного поля. Объемная плотность энергии.

Опыты Фарадея (1831)

а) движение магнита относительно катушки (или наоборот); б) движение катушек относительно друг друга; в) изменение силы тока в цепи первой катушки (с помощью реостата или замыканием и размыканием выключателя); г) вращение контура в магнитном поле; д) вращение магнита внутри контура.



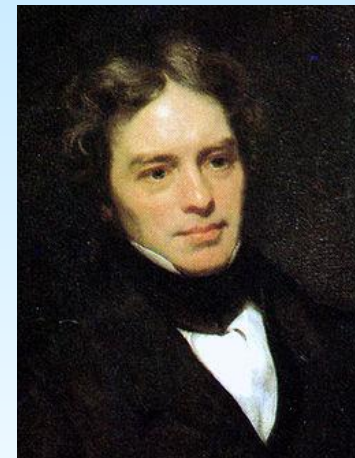
Майкл
Фарадей
1791-1867



Электромагнитная индукция (1831)

Электромагнитной индукцией (от лат. *inductio* – наведение) называется явление возникновения электрического тока в замкнутом проводящем контуре при изменении потока магнитной индукции, пронизывающей площадь этого контура (т.е. сцепленного с этим контуром).

Появление такого тока называют его индукцией, а сам возникающий ток – индукционным.



Майкл
Фарадей
1791-1867

$$\Phi = B_n S = BS \cos(\vec{n}, \vec{B}) = \mu_0 \mu H S \cos(\vec{n}, \vec{B})$$

Величина индукционного тока не зависит от способа изменения магнитного потока, а определяется лишь скоростью его изменения.

$$I_{\text{инд}} \sim \frac{d\Phi}{dt} \quad \longrightarrow \quad I_{\text{инд}} \sim \frac{\mathcal{E}_{\text{инд}}}{R} \quad \longrightarrow \quad \mathcal{E}_{\text{инд}} \sim \frac{d\Phi}{dt}$$

Сила индукционного тока (ЭДС индукции) пропорциональна скорости изменения магнитного потока через поверхность контура.

Видео опыт Фарадея

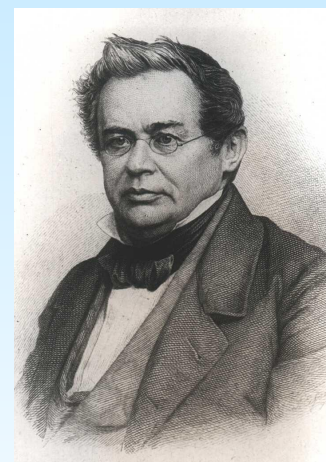
Правило Ленца (1834)

Индукционный ток всегда имеет такое направление, чтобы создаваемое им магнитное поле препятствовало тому изменению магнитного потока, которое вызвало этот индукционный ток.

Закон электромагнитной индукции (Фарадея-Ленца)

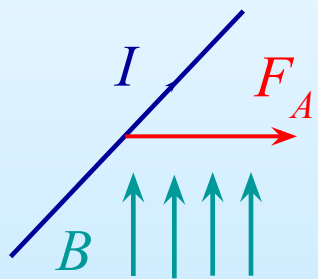
ЭДС электромагнитной индукции в замкнутом контуре численно равна и противоположна по знаку скорости изменения магнитного потока через поверхность, ограниченную этим контуром.

Правило Ленца непосредственно вытекает из закона сохранения энергии. На проводник с током действует сила Ампера. Под ее действием возникает движение. Физическое объяснение: при движении на каждый электрон действует сила Лоренца.

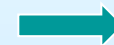


Генрих Фридерик
Эмиль Ленц
1804-1865

$$\mathcal{E}_{\text{инд}} = - \frac{d\Phi}{dt}$$



$$\vec{F}_A = I \vec{l} \times \vec{B}$$
$$d\Phi = B dS \cos(\vec{n}, \vec{B}) = Bl v dt$$

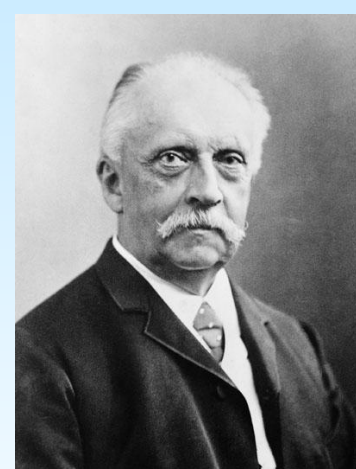


$$\mathcal{E}_{\text{инд}} = - \frac{d\Phi}{dt} = -Blv$$

В противном случае: $I \uparrow \Rightarrow F_A \uparrow \Rightarrow v \uparrow \Rightarrow d\Phi \uparrow \Rightarrow I \uparrow$

Вывод формулы для ЭДС индукции из закона сохранения энергии (метод Гельмгольца)

Работа источника тока (ЭДС сторонних сил) идет на выделение тепла и перемещение проводника с током:



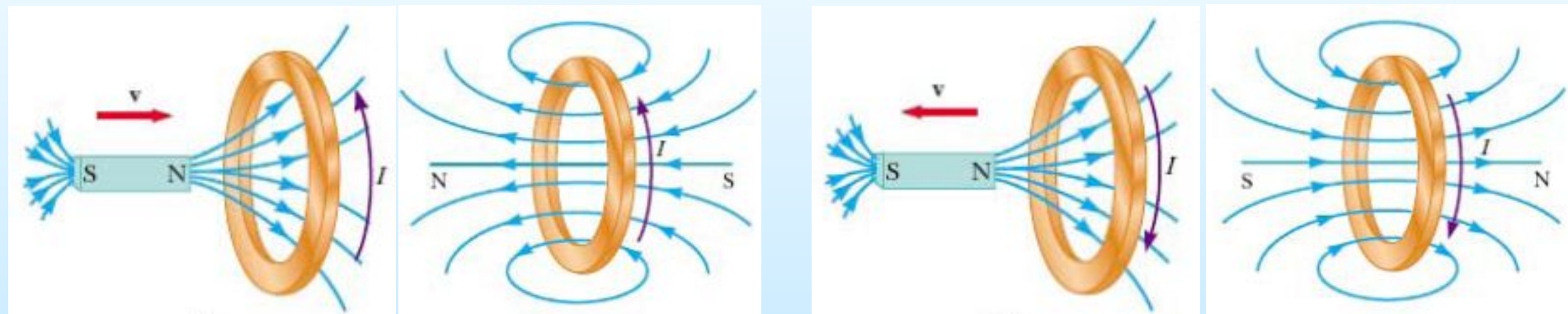
Герман Людвиг
Фердинанд
Гельмгольц
1821-1894

$$dA = I \mathcal{E} dt = I^2 R dt + I d\Phi \quad \longrightarrow \quad \mathcal{E} = IR + \frac{\partial \Phi}{\partial t}$$

$$I = \frac{1}{R} \left(\mathcal{E} - \frac{d\Phi}{dt} \right) = I_{\text{пров}} - I_{\text{инд}} \quad \longrightarrow \quad \mathcal{E}_{\text{инд}} = - \frac{d\Phi}{dt}$$

ЭДС индукции выражается в вольтах:

$$\left[\frac{\text{Вб}}{\text{сек}} \right] = \left[\frac{\text{Тл} \cdot \text{м}^2}{\text{сек}} \right] = \left[\frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{А} \cdot \text{м} \cdot \text{сек}} \right] = \left[\frac{\text{Дж}}{\text{А} \cdot \text{сек}} \right] = \left[\frac{\text{А} \cdot \text{В} \cdot \text{сек}}{\text{А} \cdot \text{сек}} \right] = [\text{В}]$$

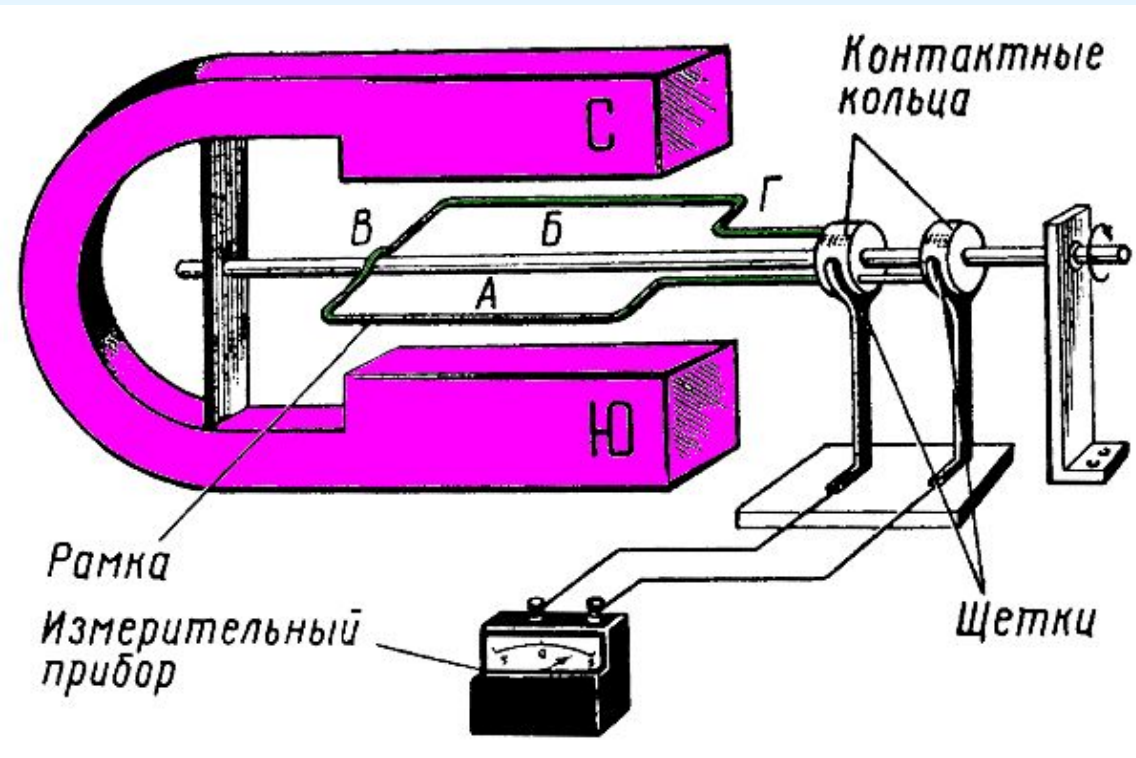


Видео правило Ленца

Применение электромагнитной индукции

Генератор переменного тока

Генератором переменного тока называется электромеханическое устройство, преобразующее механическую энергию в электрическую.

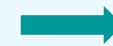


$$\Phi = BS \cos \omega t$$

$$\mathcal{E} = -\frac{d\Phi}{dt} = BS\omega \sin \omega t$$

$$\mathcal{E}^{\max} = BS\omega$$

$$\nu = \frac{\omega}{2\pi} = 50 \text{ Гц}$$



$$\mathcal{E}^{\max} = NBS\omega$$

Электродвигатель

Наоборот – электродвигатель (первый двигатель – Б.С.Якоби, 1836, приведение в движение лодки на Неве от батареи в 320 гальванических элементов).

Применение электромагнитной индукции

Вихревые токи – Токи Фуко (1855)

В массивных проводниках получают токи, замкнутые в толще самого проводника – вихревые.

$$R = \rho \frac{l}{S}$$

Полезно:

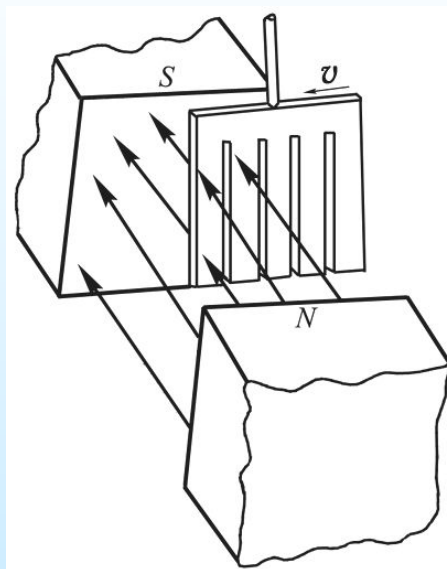
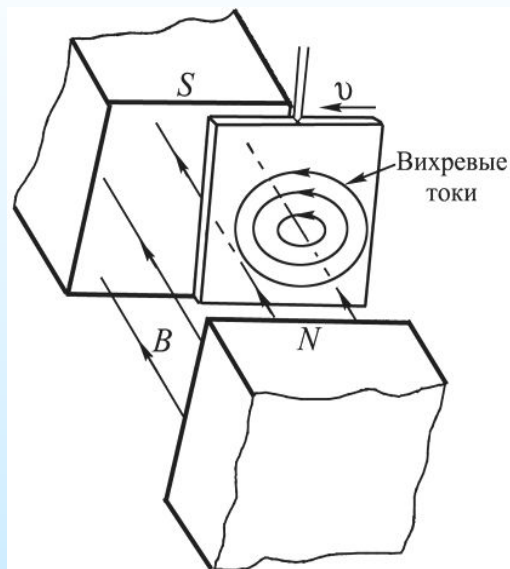
Индукционные печи для плавки сверхчистых металлов переменным током высокой частоты.

Вредно:

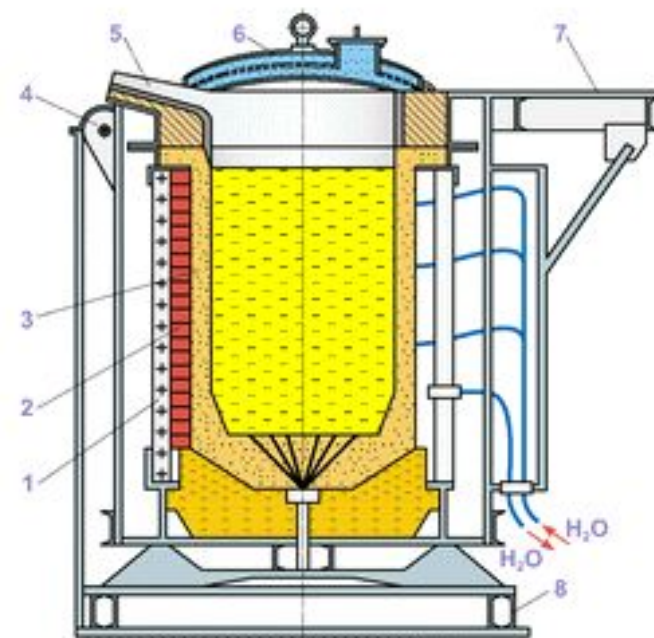
Сердечники трансформаторов набирают из отдельных тонких изолированных лаком пластин железа так, чтобы вихревые токи были перпендикулярны плоскости пластин.



Жан Бернар
Леон Фуко
1819-1868



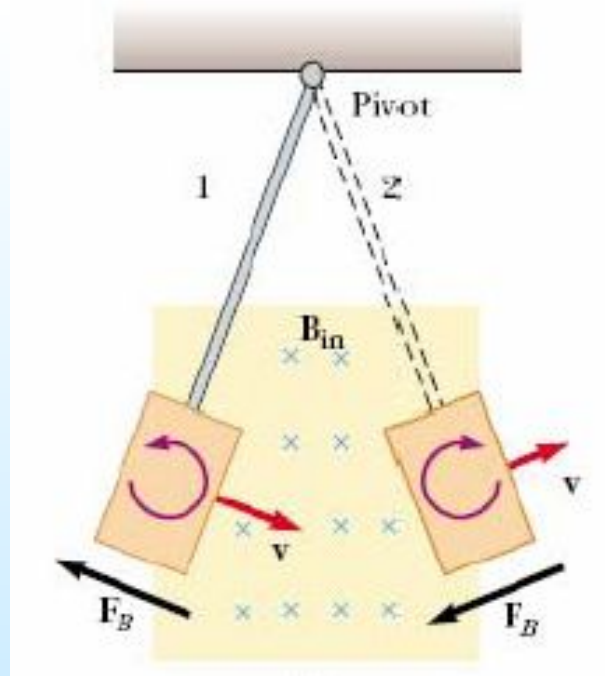
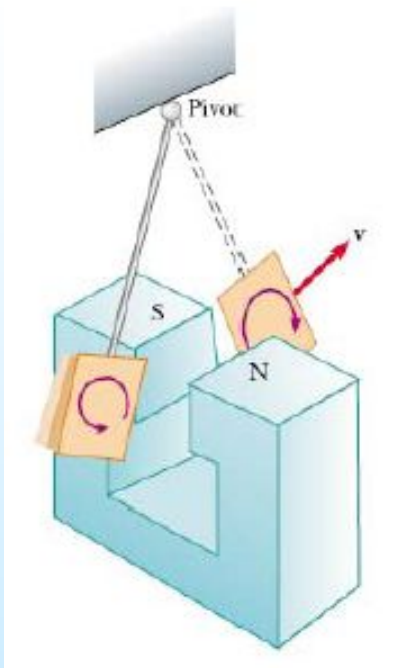
ИНДУКЦИОННАЯ ТИГЕЛЬНАЯ ПЕЧЬ



Применение электромагнитной индукции

Демпфирование колебаний

Токи Фуко широко используются для гашения (демпфирования) колебаний в подвижных системах электроизмерительных приборов. Для этого на оси приборов укрепляется проводящая пластинка (например, алюминиевая) которая вводится в зазор постоянного магнита. Поскольку токи Фуко выбирают всегда такое направление, чтобы своим действием максимально противодействовать причине, вызывающей породившее их движение, эта пластинка под воздействием магнитного поля испытывает сильное торможение.

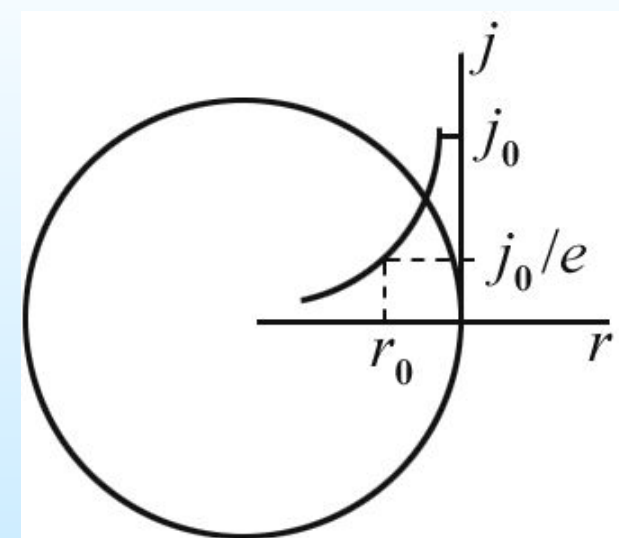


Скин-эффект

Скин эффект (от англ. *skin* – оболочка) – переменный ток высокой частоты при протекании по проводнику распределяется не равномерно по всему сечению, а преимущественно в тонком поверхностном слое.

Проводники в ВЧ- схемах нет смысла делать сплошными, а в виде волноводов - полых трубок.

Для борьбы со скин-эффектом наносят на поверхность проводника (меди) слой металла с более низким удельным сопротивлением (серебро). Также провода для переменных токов сплетают из большого числа тонких проводящих нитей, изолированных друг от друга эмалевым покрытием – литцендратом.



$$\nu = 50 \text{ Гц}$$

$$r_0 = 10 \text{ мм}$$

$$\nu = 100 \text{ МГц} = 10^8 \text{ Гц}$$

$$r_0 = 7 \cdot 10^{-3} \text{ мм}$$

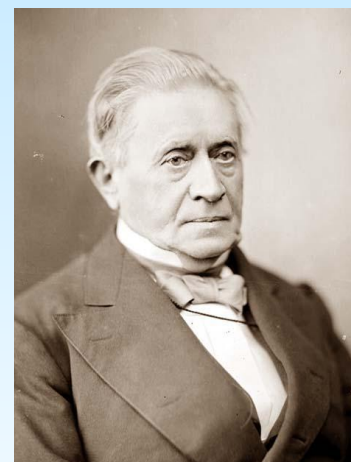
ВЧ-токи используются для закалки поверхностей деталей: поверхностный слой разогревается быстро в ВЧ-поле, закаливается и становится прочным, но не хрупким, так как внутренняя часть детали не разогревалась и не закаливалась.

Самоиндукция

Самоиндукцией называется возникновение ЭДС индукции в контуре при изменении в нем силы тока. При увеличении силы тока в цепи самоиндукция препятствует его возрастанию, при уменьшении – убыванию, т.е. подобна явлению инерции в механике.

$$I \sim B \longrightarrow \Phi \sim B \longrightarrow \Phi \sim I$$

$$\Phi = LI$$



Джозеф
Генри
1797-1878

Коэффициент пропорциональности L между силой тока и магнитным потоком называется индуктивностью контура.

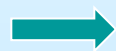
Зависит от геометрии контура (формы и размеров) и магнитных свойств среды.

Единица индуктивности

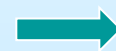
Единицей индуктивности в СИ – генри (1 Гн) называется индуктивность такого контура, магнитный поток самоиндукции которого при токе один ампер (1 А) равен одному веберу (1 Вб).

Индуктивность соленоида

$$B = \mu_0 \mu n I = \mu_0 \mu \frac{N}{l} I$$



$$\Phi = B S N = \mu_0 \mu \frac{N^2}{l} S I$$



$$L = \mu_0 \mu \frac{N^2}{l} S$$

Индуктивность соленоида

$$L = \mu_0 \mu \frac{N^2}{l} S = \mu_0 \mu \frac{(nl)^2}{l} S = \mu_0 \mu n^2 l S = \mu_0 \mu n^2 V$$

Индуктивность соленоида пропорциональна квадрату числа витков на единицу его длины, объему соленоида и магнитной проницаемости вещества сердечника соленоида.

ЭДС самоиндукции

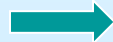
ЭДС самоиндукции пропорциональна индуктивности контура и скорости изменения тока в нем.

$$\mathcal{E}_{\text{инд}} = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d}{dt}(LI) = -L \frac{dI}{dt}$$

Потокосцепление (полный магнитный поток)

Потокосцеплением контура, состоящим из нескольких витков, называется произведение магнитного потока, сцепленного с каждым витком, на число витков.

$$\Psi = \sum_N \Phi = N\Phi$$



$$\Psi = LI$$

$$\mathcal{E}_{\text{инд}} = -\frac{d\Psi}{dt}$$

Взаимоиндукция

Взаимоиндукцией называется явление, в котором обнаруживается явление возникновения ЭДС в одном из контуров при изменении силы тока в другом контуре, если их пронизывает общий магнитный поток. Такие контура называются связанными.

Текущий в контуре 1 ток I_1 создаст в контуре 2 магнитный поток:

$$\Phi_2 = L_{21} I_1 \quad \longrightarrow \quad \mathcal{E}^2 = -L_{21} \frac{dI_1}{dt}$$

Аналогично текущий в контуре 2 ток I_2 создаст в контуре 1 магнитный поток:

$$\Phi_1 = L_{12} I_2 \quad \longrightarrow \quad \mathcal{E}^1 = -L_{12} \frac{dI_2}{dt}$$

Коэффициенты L_1 и L_2 называются взаимной индуктивностью контуров. Точные расчеты показывают, что они равны друг другу.

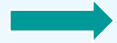
$$L_{21} = L_{12} = L$$

Трансформатор

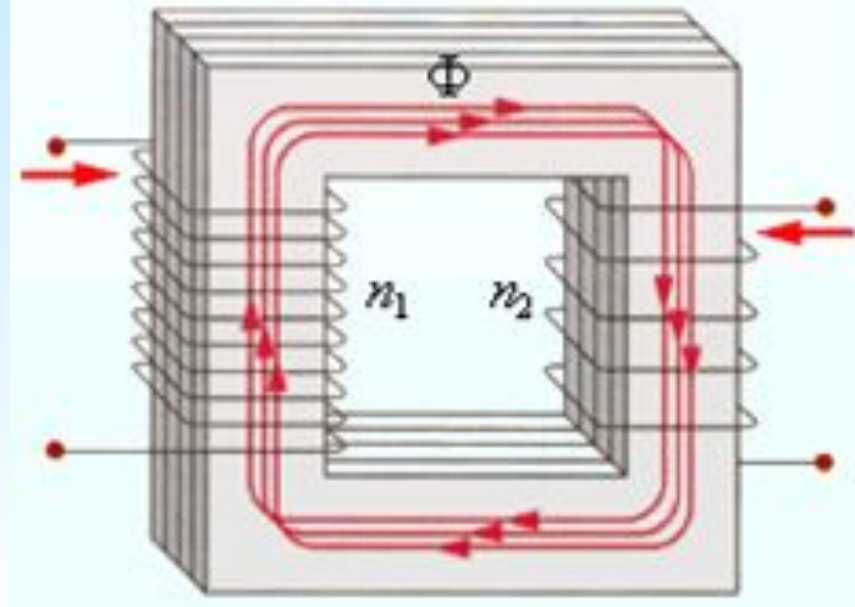
Трансформатором называется устройство для повышения или понижения напряжения переменного тока (П.Н.Яблочков, И.Ф.Усагин, 1876).

Трансформатор

$$\mathcal{E}^2 = -N_2 \frac{d\Phi}{dt} \quad \mathcal{E}^1 = -N_1 \frac{d\Phi}{dt}$$



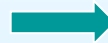
$$\frac{\mathcal{E}^2}{\mathcal{E}^1} = \frac{U_2}{U_1} = \frac{N_2}{N_1} = k$$



Коэффициент трансформации

Коэффициент трансформации показывает, во сколько раз напряжение в первичной обмотке больше/меньше чем во вторичной. При $k > 1$ трансформатор повышающий, при $k < 1$ – понижающий.

$$\mathcal{E}^2 I_2 = \mathcal{E}^1 I_1$$

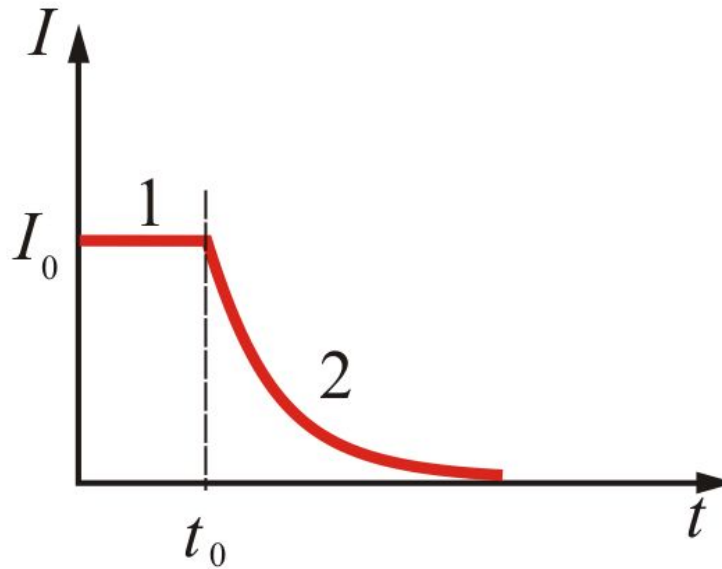
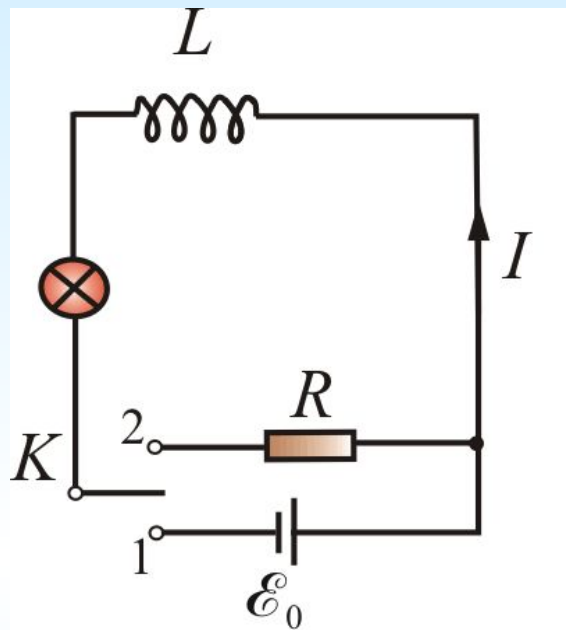


$$\frac{\mathcal{E}^2}{\mathcal{E}^1} = \frac{U_2}{U_1} = \frac{N_2}{N_1} = k = \frac{I_1}{I_2}$$

Применяются в основном в линиях электропередач, поскольку потери на разогрев проводов (Джоулево тепло) пропорциональны квадрату текущего тока.

Энергия магнитного поля

Найдем энергию магнитного поля, создаваемого током:



$$\mathcal{E}_L = -L \frac{dI}{dt} I dt = -LI dI$$

$$A = -L \int_{I_0}^0 I dI = \frac{LI^2}{2}$$

$$W = A = \frac{LI^2}{2}$$

Плотность энергии

В соленоиде:

$$W = \frac{LI^2}{2} = \mu_0 \mu n^2 V \frac{H^2}{2n^2} = \frac{\mu_0 \mu H^2}{2} V = \frac{BH}{2} V$$

$$L = \mu_0 \mu n^2 V$$

$$H = nI$$

$$B = \mu_0 \mu H$$

$$w = \frac{BH}{2} = \frac{\mu_0 \mu H^2}{2} = \frac{B^2}{2\mu_0 \mu}$$

$$w_{\text{эл. магн.}} = \frac{\epsilon_0 \epsilon E^2}{2} + \frac{\mu_0 \mu H^2}{2}$$