

# 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.

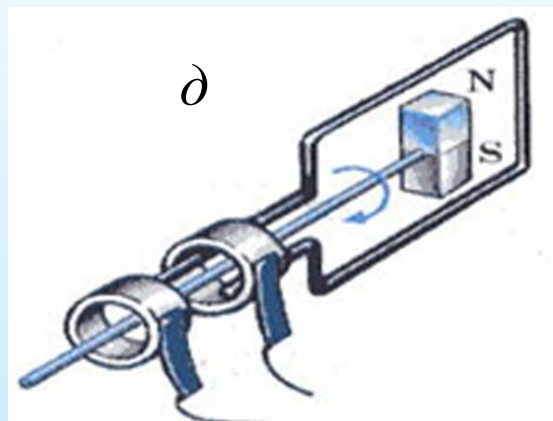
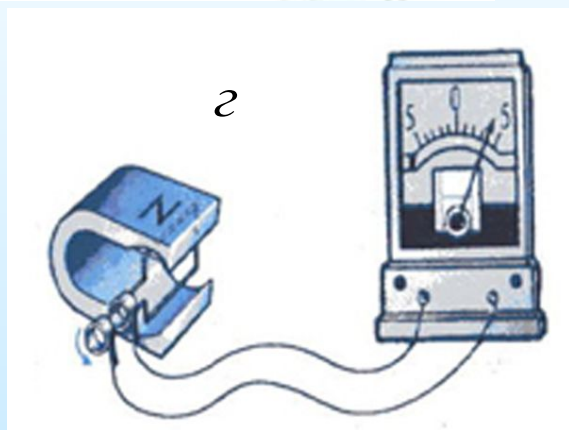
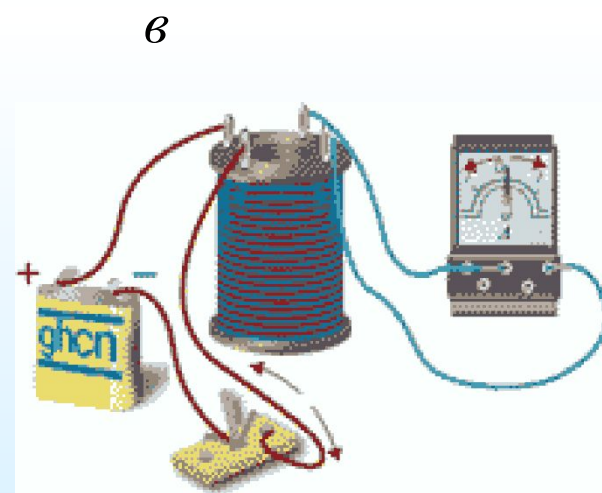
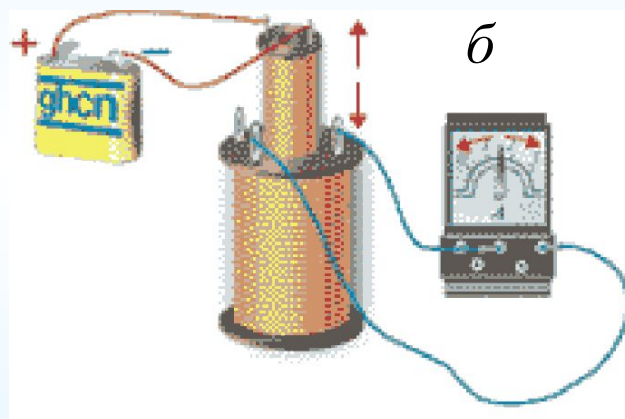
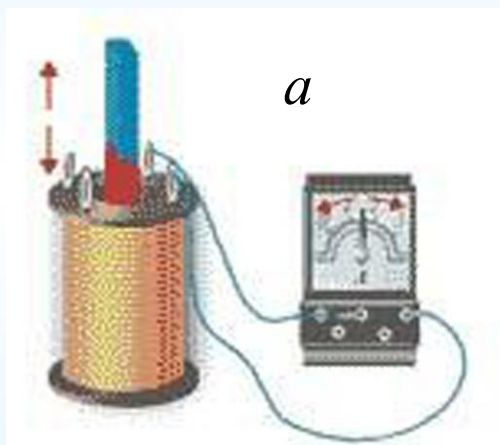
Взаимная индукция. Трансформатор. Энергия магнитного поля. Объемная плотность энергии.

# 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.

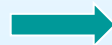


Майкл  
Фарадей  
1791-1867

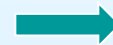
$$\Phi = B_n S = BS \cos(\vec{n}, \vec{B}) = \mu_0 \mu H S \cos(\vec{n}, \vec{B})$$

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

$$I_{\text{инд}} \sim \frac{d\Phi}{dt}$$



$$I_{\text{инд}} \sim \frac{\mathcal{E}^{\text{инд}}}{R}$$



$$\mathcal{E}^{\text{инд}} \sim \frac{d\Phi}{dt}$$

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

# *Видео опыт Фарадея*

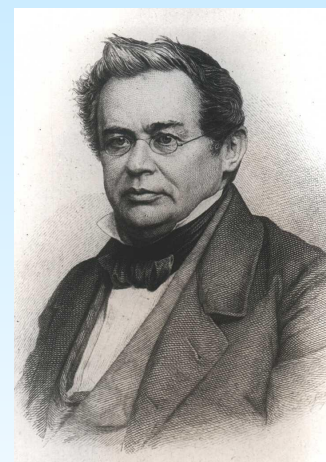
## Правило Ленца (1834)

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)

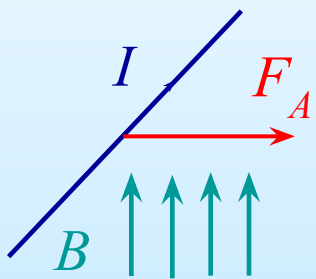
ЭДС электромагнитной индукции в замкнутом контуре численно равна и противоположна по знаку скорости изменения магнитного потока через поверхность, ограниченную этим контуром.

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.

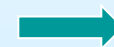


Генрих Фридерик  
Эмиль Ленц  
1804-1865

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



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

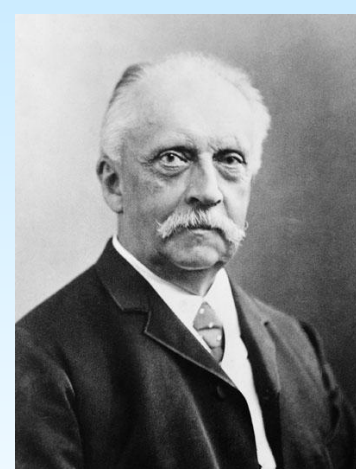


$$\mathcal{E}^{ind} = - \frac{d\Phi}{dt} = -Blv$$

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:



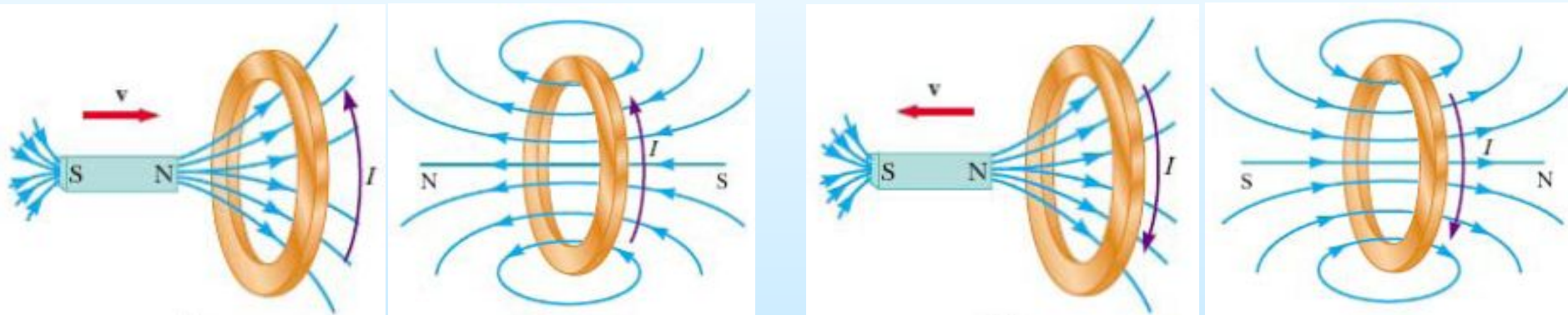
Герман Людвиг Фердинанд Гельмгольц  
1821-1894

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

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

ЭДС индукции выражается в вольтах:

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

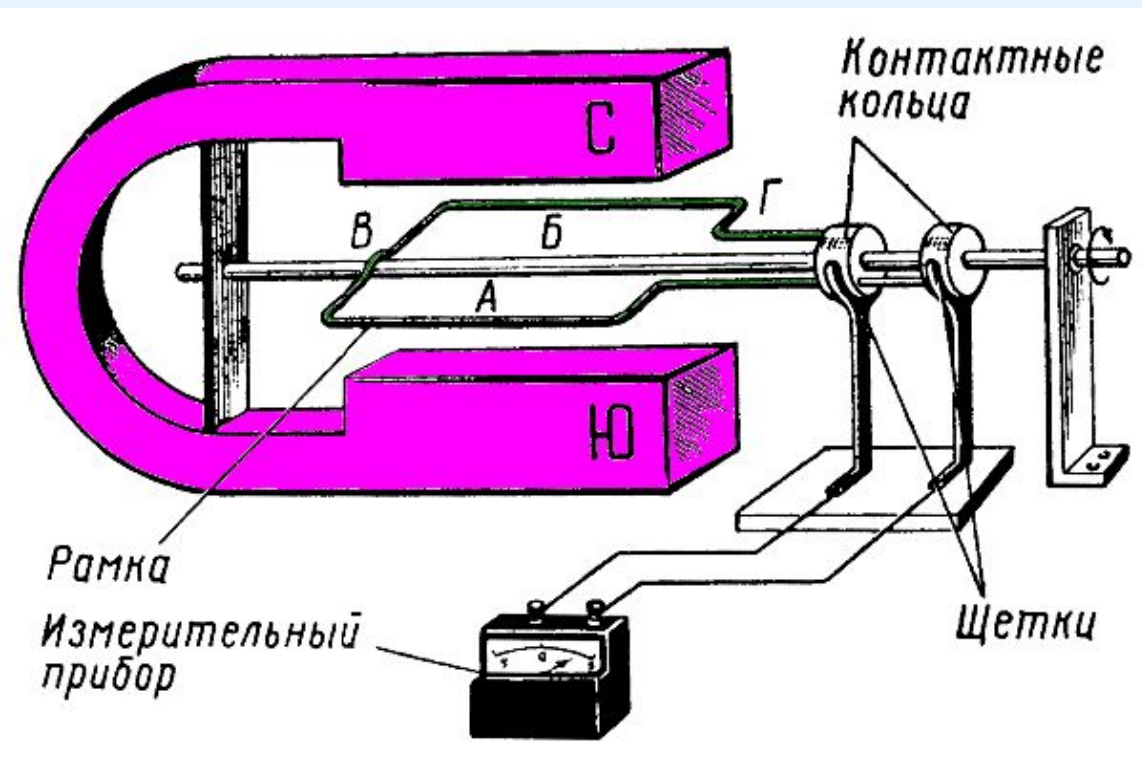


# *Видео правило Ленца*

# Применение электромагнитной индукции

## Генератор переменного тока

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

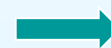


$$\Phi = BS \cos \omega t$$

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

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

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



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

## 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 получаются токи, замкнутые в толще самого проводника – вихревые.

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

### Полезно:

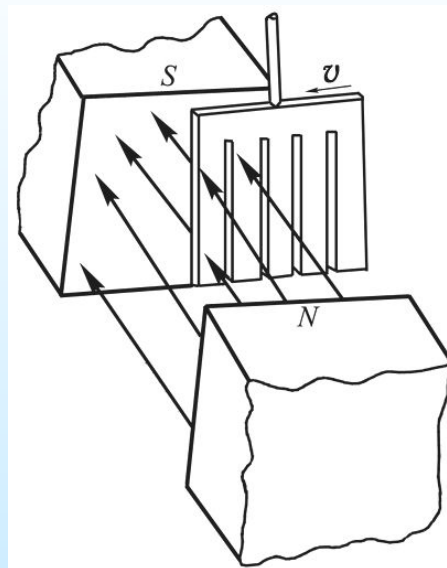
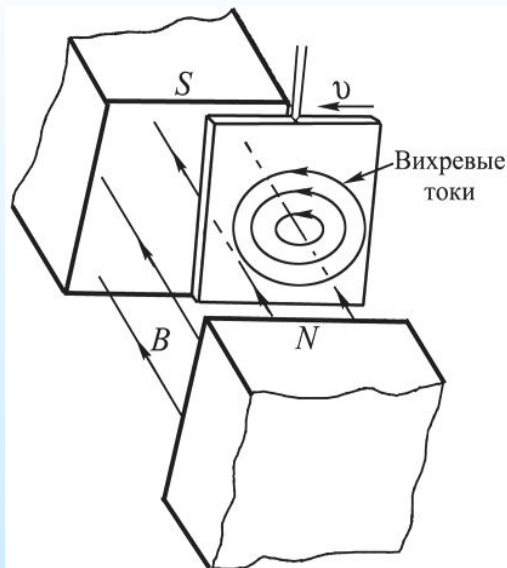
Индукционные печи для плавки сверхчистых металлов переменным током высокой частоты.

### Вредно:

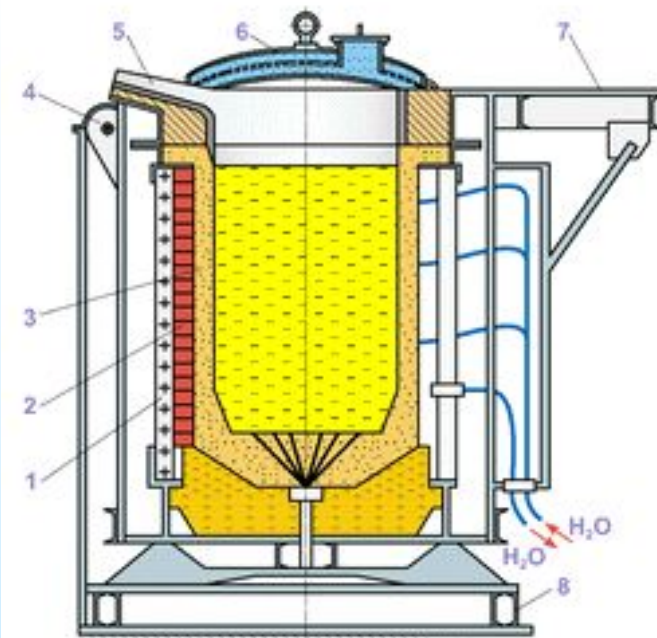
Сердечники трансформаторов набирают из отдельных тонких изолированных лаком пластин железа так, чтобы вихревые токи были перпендикулярны плоскости пластин.



Жан Бернар  
Леон Фуко  
1819-1868



ИНДУКЦИОННАЯ ТИГЕЛЬНАЯ ПЕЧЬ

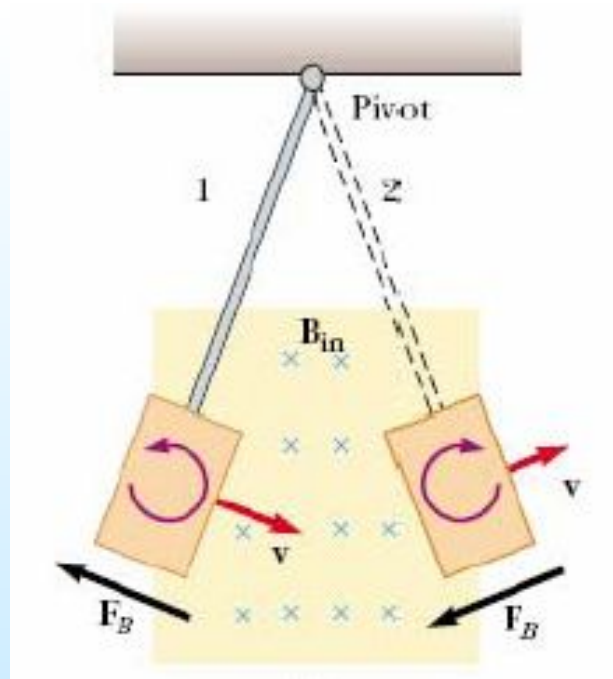
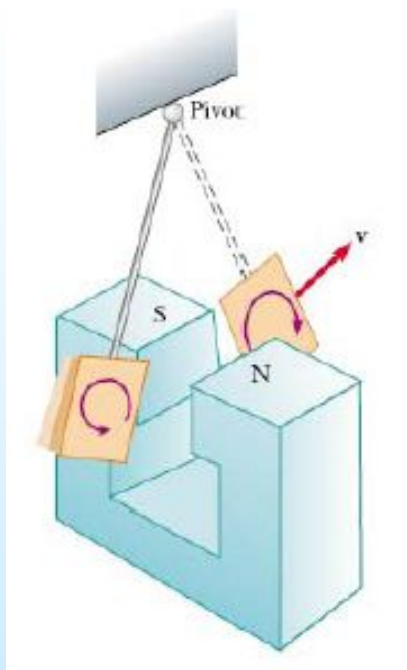


# Применение электромагнитной индукции

## 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.

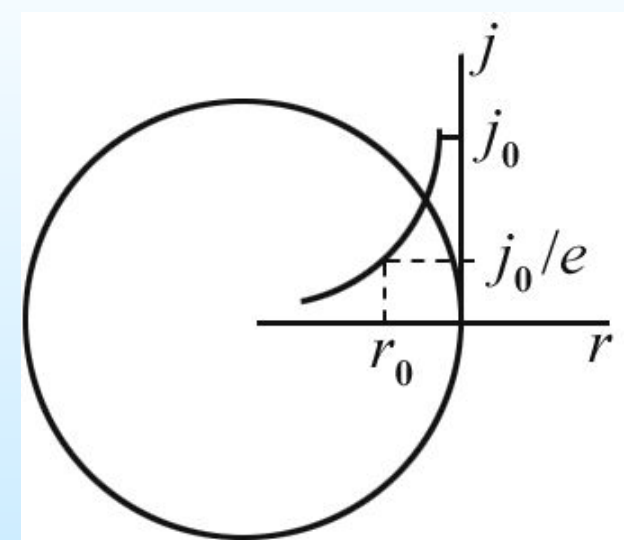


# Скин-эффект

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.



$$\nu = 50 \text{ Гц}$$

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

$$r_0 = 10 \text{ мм}$$

$$r_0 = 7 \cdot 10^{-3} \text{ мм}$$

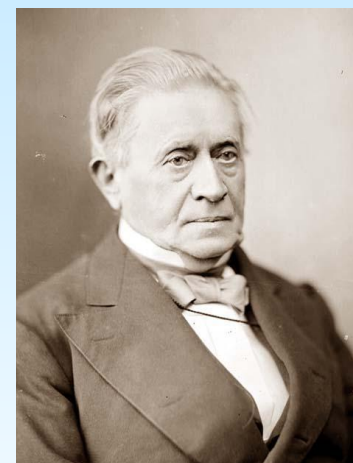
ВЧ-токи используются для закалки поверхностей деталей: поверхностный слой разогревается быстро в ВЧ-поле, закаливается и становится прочным, но не хрупким, так как внутренняя часть детали не разогревалась и не закаливалась.

## 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.

$$I \sim V \longrightarrow \Phi \sim V \longrightarrow \Phi \sim I \quad \boxed{\Phi = LI}$$



Джозеф  
Генри  
1797-1878

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

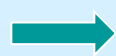
Зависит от геометрии контура (формы и размеров) и магнитных свойств среды.

## 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

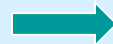
ЭДС самоиндукции пропорциональна индуктивности контура и скорости изменения тока в нем.

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

## 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.

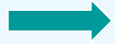
$$L_{21} = L_{12} = L$$

## Трансформатор

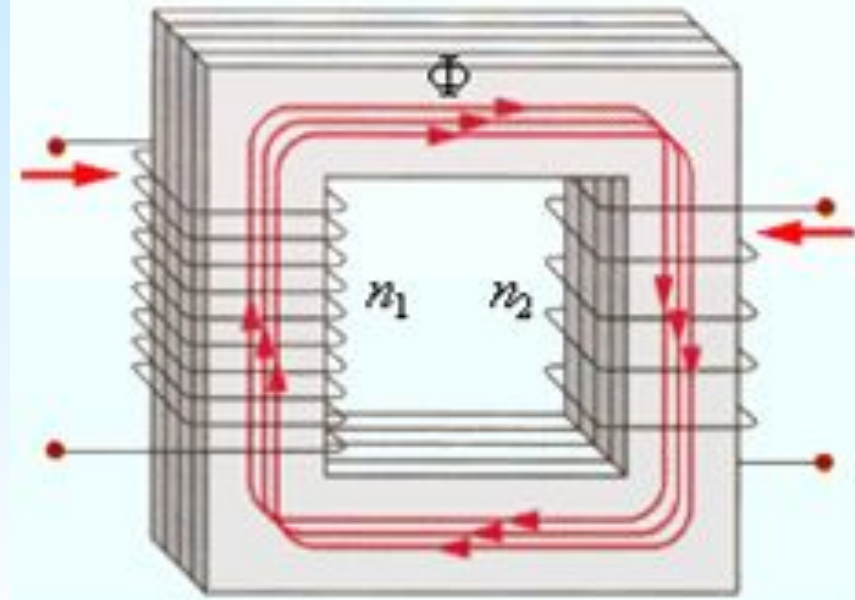
Трансформатором называется устройство для повышения или понижения напряжения переменного тока (П.Н.Яблочков, И.Ф.Усагин, 1876).

# Трансформатор

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



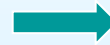
$$\frac{\mathcal{E}^2}{\mathcal{E}^1} = \frac{U_2}{U_1} = \frac{N_2}{N_1} = k$$



## 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.

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

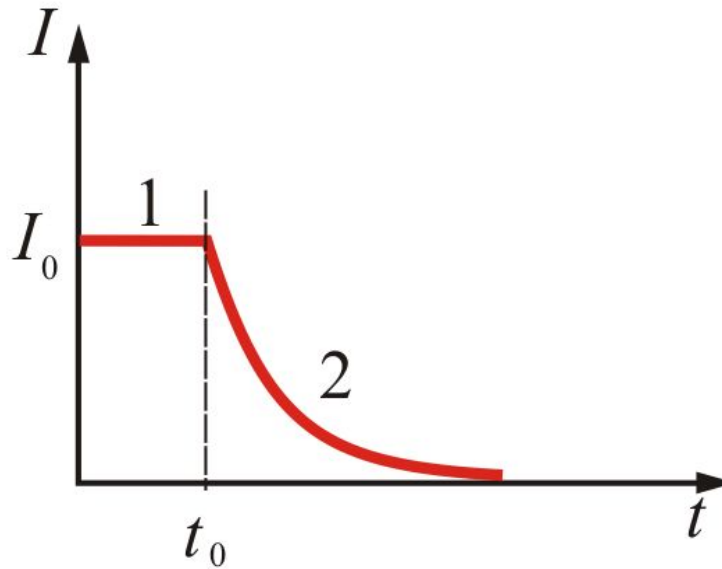
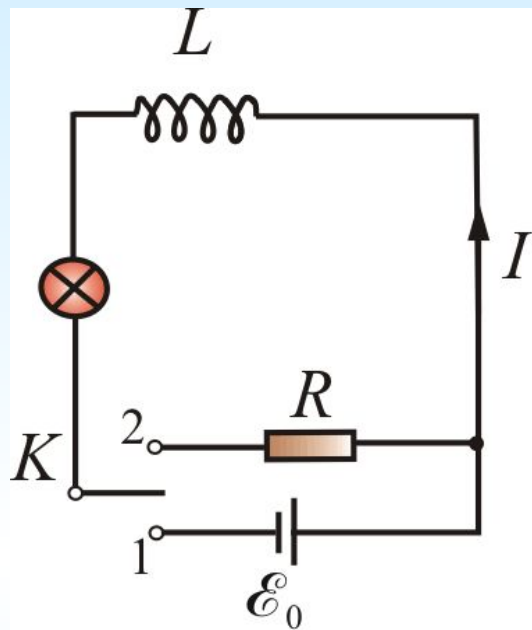


$$\frac{\mathcal{E}^2}{\mathcal{E}^1} = \frac{U_2}{U_1} = \frac{N_2}{N_1} = k = \frac{I_1}{I_2}$$

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:



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

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

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

## Плотность энергии

В соленоиде:

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

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

$$H = nI$$

$$B = \mu_0 \mu H$$

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

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