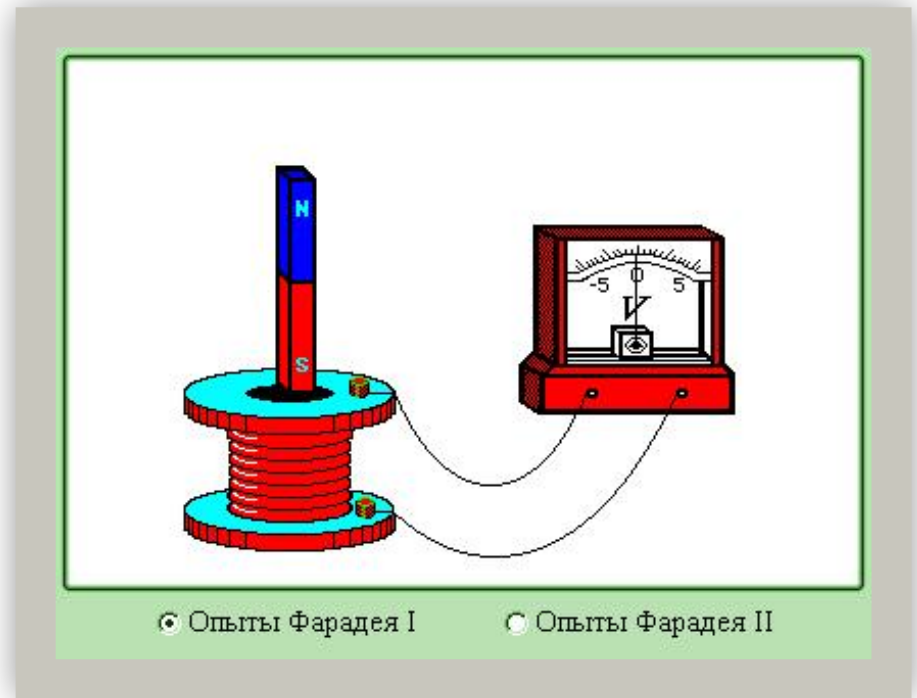
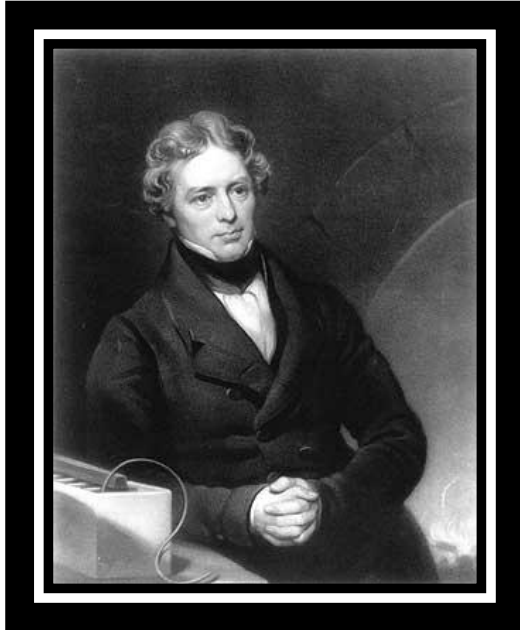


# Явление электромагнитной индукции..



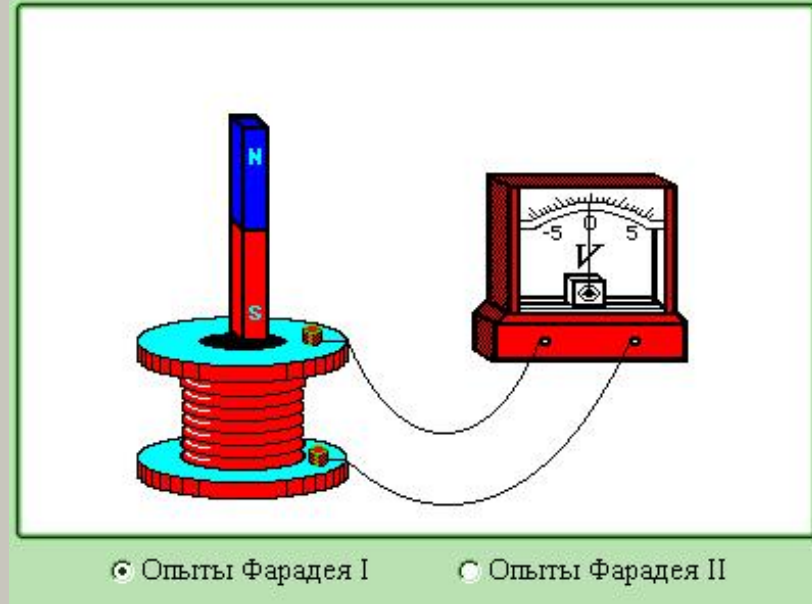
1831 г.

# Электромагнитная индукция (ЭМИ)

## Опыты Фарадея

ЭДС в контуре можно создавать тремя способами:

1. Двигая контур в магнитном поле.
2. Двигая магнит вблизи провода.
3. Меняя ток в соседнем проводе.



# Закон Фарадея (1831)

Независимо от способа изменения потока вектора магнитной индукции  $\Phi$ , явление ЭМИ можно описать единым законом.

*Во всяком замкнутом проводящем контуре при изменении потока магнитной индукции через поверхность, ограниченную этим контуром, возникает электрический ток (индукционный ток).*

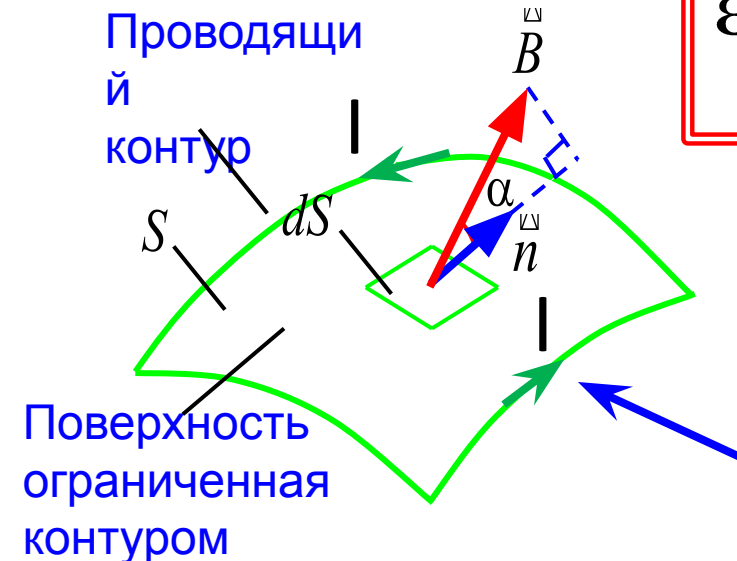
*Электродвижущая сила, возникающая при этом, пропорциональна скорости изменения магнитного потока, сцепленного с этим контуром:*

$$\varepsilon_i = - \frac{d\Phi}{dt}$$

Закон Фарадея  
в системе СИ

$\Phi$  в Веберах  
 $\varepsilon_i$  в В/м

$$\Phi = B \cos \alpha dS = B_n dS \quad \Phi = \int_S B_n dS$$



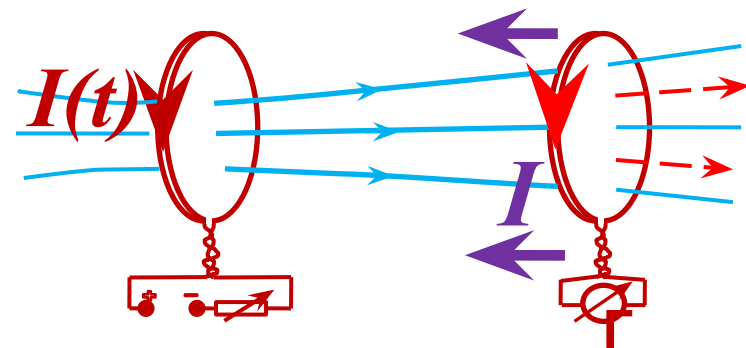
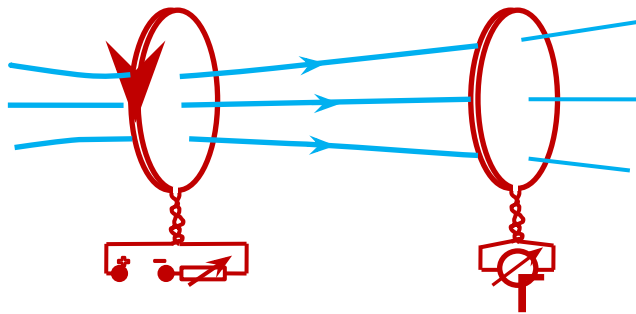
При изменении  $\Phi$  через поверхность, ограниченную контуром, в контуре возникает ЭДС и ток.



Правило Ленца: индукционный ток направлен всегда так, чтобы противодействовать причине его вызывающей

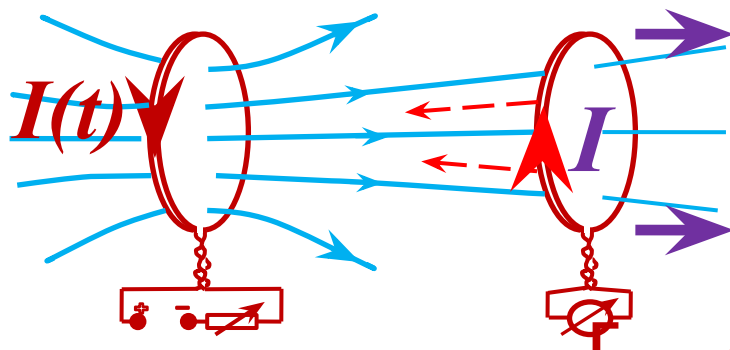
$$\varepsilon_i = - \frac{d\Phi}{dt}$$

Выражается знаком «-» в законе Фарадея



$$I(t) \downarrow \Rightarrow B \downarrow \Rightarrow \Phi \downarrow$$

*ПРИТЯЖЕНИЕ*  
контуров

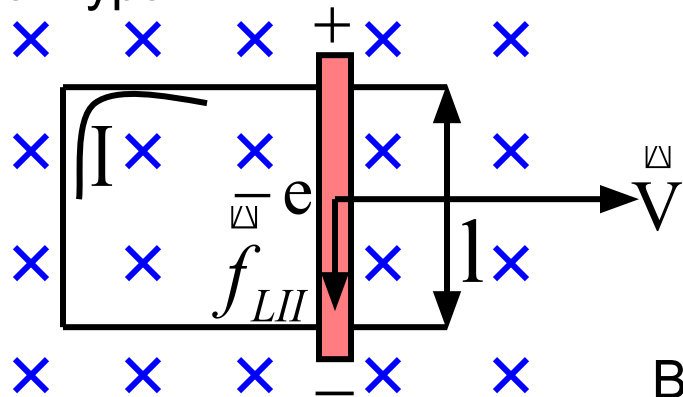


$$I(t) \uparrow \Rightarrow B \uparrow \Rightarrow \Phi \uparrow$$

*ОТТАЛКИВАНИЕ*  
контуров

# Вывод закона Фарадея

1. Проводник длиной  $l$ , являющийся частью замкнутого контура, движется со скоростью  $v$  в однородном магнитном поле  $B$ , перпендик. плоскости контура.



На электроны движущегося проводника действует сила Лоренца

$$f_{LII} = e[vB]$$

Это сила не кулоновской природы (сторонняя)

Величина, равная работе сторонних сил по

перемещению заряда на участке цепи, деленной на величину заряда, называется **электродвижущей силой (ЭДС)**

$$\epsilon_{12} = \frac{A_{\text{стор}}}{q} \longrightarrow \epsilon_{\text{ind}} = -\frac{eBV \cdot l}{e} = -BV \cdot l$$

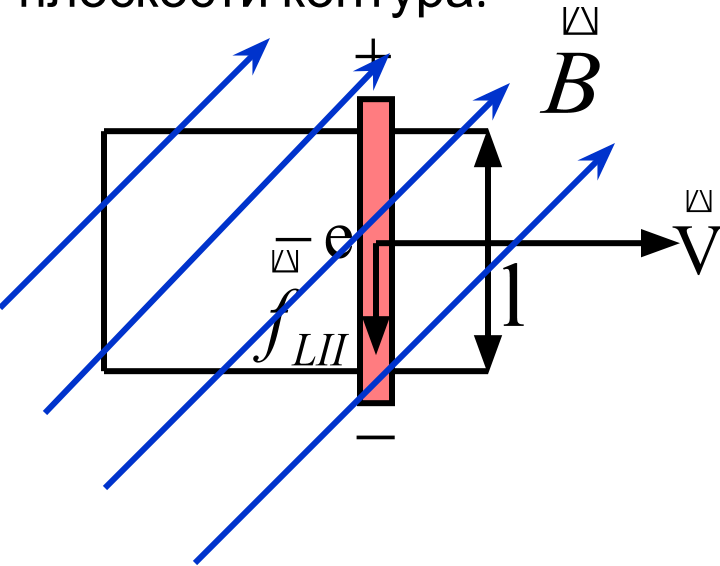
индукции

Знак «-»:  $\epsilon_{\text{ind}}$  создаёт ток, направленный против положительного обхода контура, определяемого вектором  $B$  по правилу правого винта.

$$\epsilon_{\text{ind}} = -BVl = -Bl \frac{dx}{dt} = -B \frac{dS}{dt} = -\frac{d\Phi}{dt} \longrightarrow \epsilon_{\text{ind}} = -\frac{d\Phi}{dt}$$

# Вывод закона Фарадея

2. Однородное магнитное поле  $\vec{B}$  направлено под любым углом к плоскости контура.



$$\vec{B} = \vec{B}_n + \vec{B}_t \quad f_L = e[\vec{B}_n \vec{v}] + e[\vec{B}_t \vec{v}]$$

$$f_L = e[\vec{B}_n \vec{v}]$$



Приходим к случаю 1

Перпендикулярна направлению тока

3. Легко обобщается на случай неоднородного магнитного поля.

4. Конфигурация контура не изменяется (проводник неподвижен), магнитный поток через поверхность, ограниченную контуром, **меняется за счёт изменения магнитного поля.**

*А. Движение магнита относительно контура (катушки)*

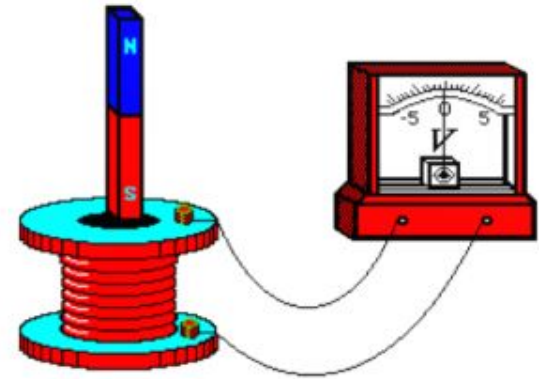
Принцип относительности: индукционный ток должен зависеть только от **относительного движения** контура и магнита.

Это и наблюдается на опыте.

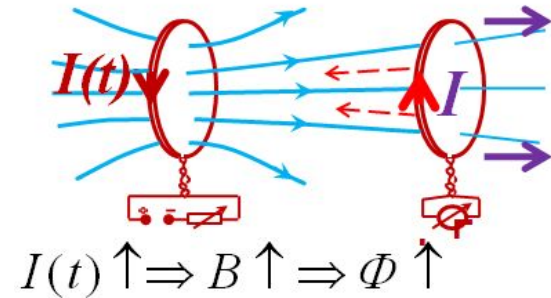
*Б. Переменное магнитное поле*

При всех условиях

$$\varepsilon_i = - \frac{d\Phi}{dt}$$



трансформатор



## Закон Фарадея (1831)

Независимо от способа изменения потока вектора магнитной индукции  $\Phi$ , явление ЭМИ можно описать единым законом.

*Во всяком замкнутом проводящем контуре при изменении потока магнитной индукции через поверхность, ограниченную этим контуром, возникает электрический ток (индукционный ток).*

*Электродвижущая сила, возникающая при этом, пропорциональна скорости изменения магнитного потока, сцепленного с этим контуром:*

$$\varepsilon_i = - \frac{d\Phi}{dt}$$

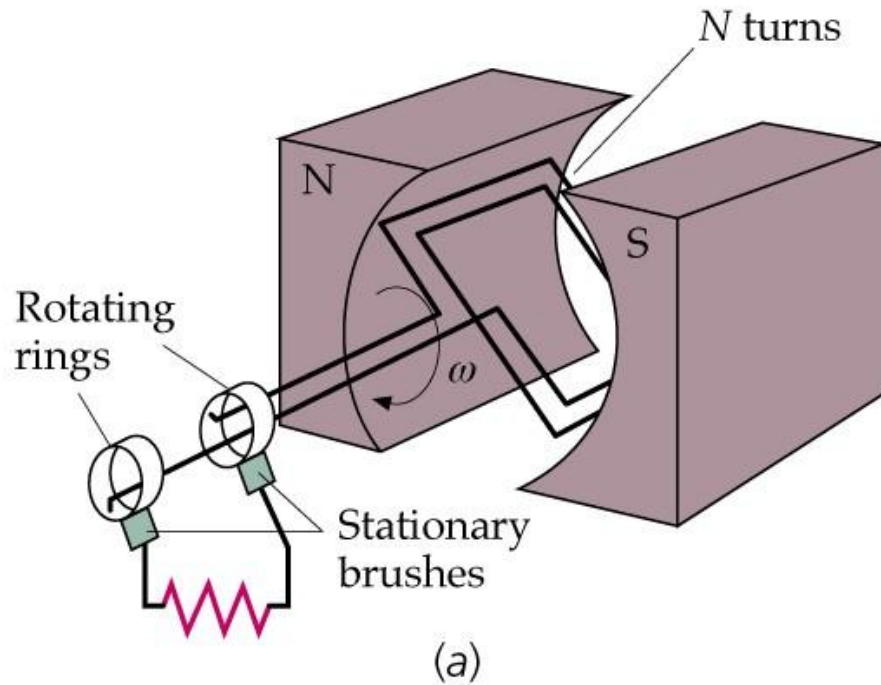


# Многовитковый контур с числом витков $N$

Потокоцепление



$$\Psi = N\Phi$$

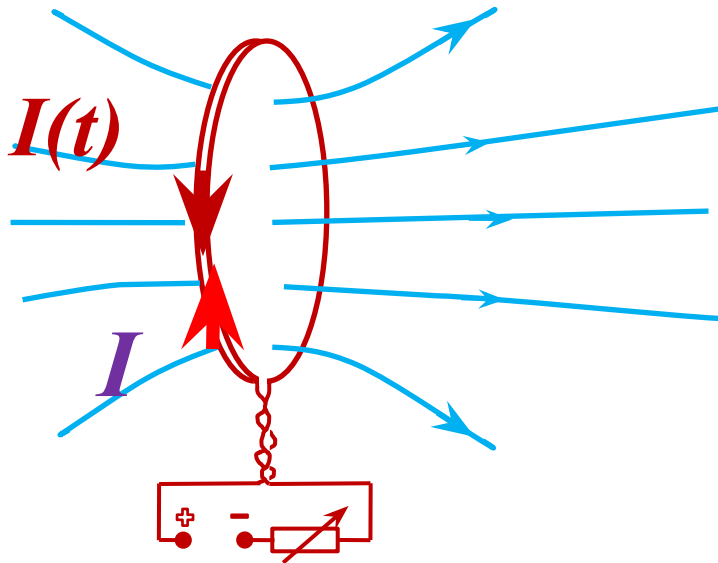


$$\varepsilon_i = - \frac{d\Psi}{dt}$$

## Явление самоиндукции. Индуктивность.

Контур с током создаёт магнитный поток  $\Phi$ .

Если ток меняется во времени  $I = I(t)$ ,  $\frac{d\Phi}{dt} \neq 0$



В самом контуре возникает

$$\text{ЭДС} \quad \varepsilon_s = -\frac{d\Phi}{dt} \quad \text{\u0415\u0414\u0421 самоиндукции}$$

ЭДС самоиндукции препятствует изменению тока в контуре:

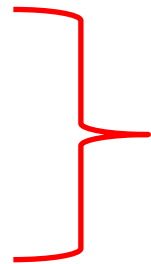
Если ток возрастает, возникает индукционный ток, направленный в противоположную сторону

Если ток убывает, возникает индукционный ток, направленный в ту же сторону.

# ИНДУКТИВНОСТЬ

$$\Phi = \int_S B_n dS$$

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{I [dl \times r]}{r^3}$$



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



$$\Phi \sim I$$



$$L \leftarrow \text{Индуктивность}$$

$$1 \text{ Гн} = 1 \text{ Вб} / 1 \text{ А}$$

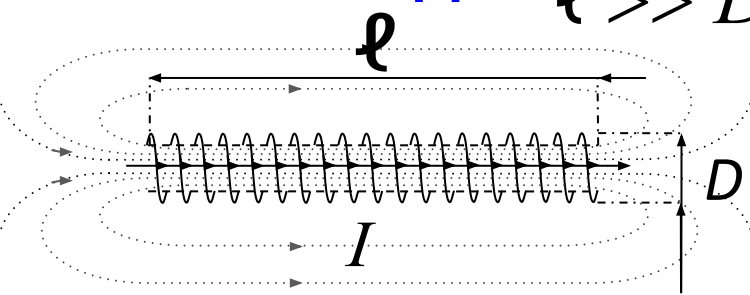
$$\Phi = LI$$

$$\Psi = N \Phi = LI$$

## ИНДУКТИВНОСТЬ СОЛЕНОИДА

$$\ell \gg D, n$$

Число витков на ед. длины



$$B = \mu\mu_0 nI$$

$$\Psi = N\Phi = n\ell BS$$

$$\Psi = LI$$



$$L = \mu\mu_0 n^2 \ell S$$



Зависит от:

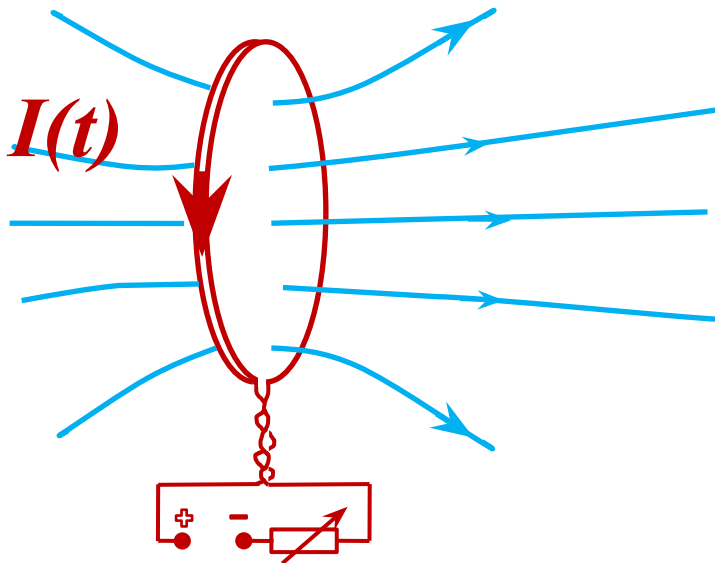
- 1) магн. св-в среды
- 2) констр. особ-ей

Правило Ленца

$$\varepsilon_S = -\frac{d\Phi}{dt} = -L \frac{dI}{dt}$$



$$\varepsilon_S = -L \frac{dI}{dt}$$



Чем больше индуктивность, тем больше  $\varepsilon_S$  при данной скорости изменения тока,

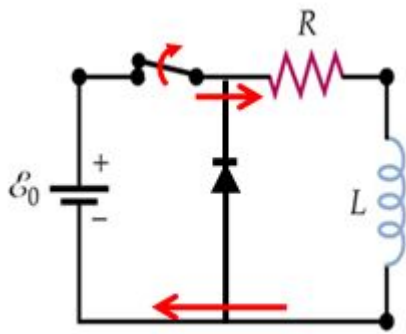


тем больше «сопротивление» изменению тока, больше «инерционность» контура.

Пример:  
соленоид

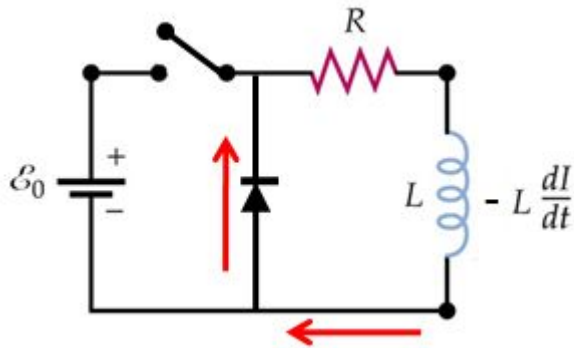
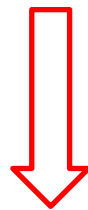
$$L = \mu\mu_0 n^2 \ell S$$

Токи при размыкании и замыкании цепи



$$I_0 = \frac{\varepsilon_0}{R} \xrightarrow{t=0}$$

Размыкание:



3-н Ома:  $I = \frac{\varepsilon_s}{R} = -\frac{L}{R} \frac{dI}{dt}$

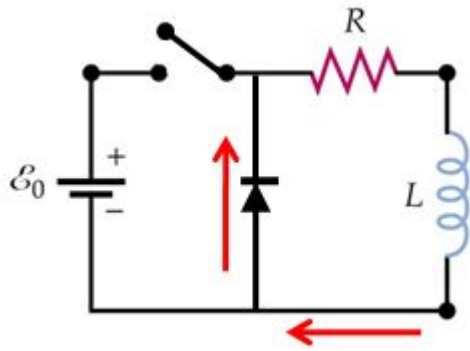
Одн. диф. ур-ие  
1-го пор.



$$\frac{dI}{dt} + \frac{R}{L} I = 0$$

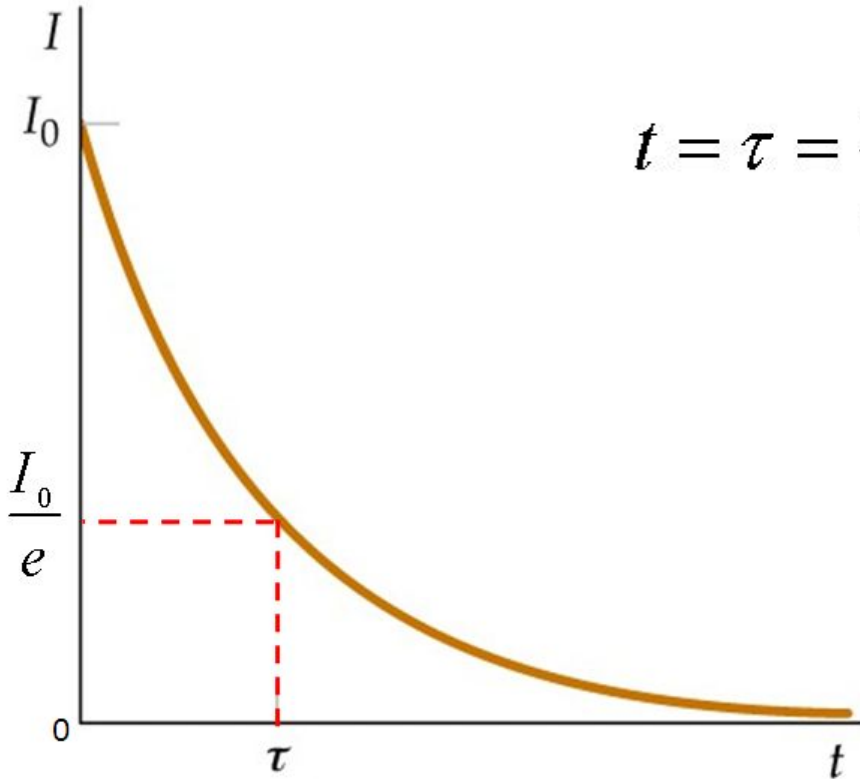
$$\frac{dI}{I} = -\frac{R}{L} dt \xrightarrow{\text{РЕШЕНИ Е:}} \ln I = -\frac{R}{L} t + \ln C \xrightarrow{} I = C e^{-\frac{R}{L} t}$$

Начальное условие  $I|_{t=0} = I_0 \Rightarrow C = I_0 \xrightarrow{} I = I_0 e^{-\frac{R}{L} t}$

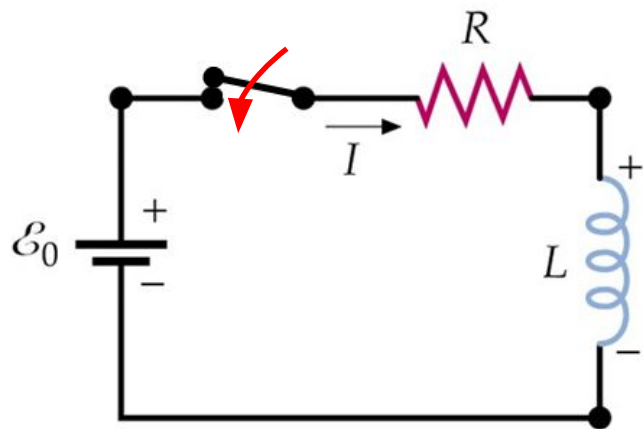


$$I = I_0 e^{-\frac{R}{L}t} \quad \leftarrow \text{Зависимость тока от времени при размыкании}$$

$$I = I_0 e^{-\frac{R}{L}t} = I_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \quad \leftarrow \tau = \frac{L}{R} \quad \text{Постоянная времени}$$



$$t = \tau = \frac{L}{R} \Rightarrow I = I_0 e^{-\frac{R}{L} \cdot \frac{L}{R}} = I_0 e^{-1}$$



$$t = 0 \rightarrow I = 0$$

Замыкание:

$$R \gg r$$

3-н Ома:  $I = \frac{\mathcal{E}_0 + \mathcal{E}_s}{R}$

$$L \frac{dI}{dt} + IR = \mathcal{E}_0$$

$$IR = \mathcal{E}_0 + \mathcal{E}_s = \mathcal{E}_0 - L \frac{dI}{dt}$$

$$\frac{dI}{dt} + \frac{R}{L} I = \frac{\mathcal{E}_0}{L}$$

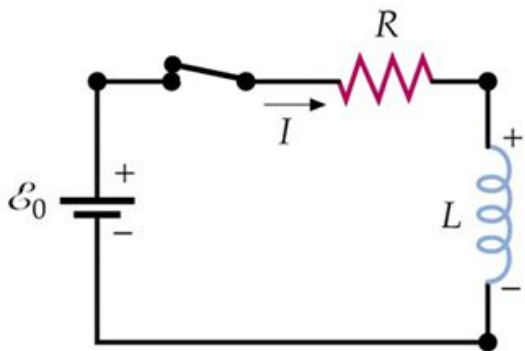
РЕШЕНИ  
Е:

$$I = C e^{-\frac{R}{L}t} + I_0$$

$$I|_{t=0} = 0 \Rightarrow C = -I_0$$

$$I = I_0 (1 - e^{-\frac{R}{L}t})$$

Неодн. диф. ур-ие 1-го пор.



$$I = I_0 \left( 1 - e^{-\frac{R}{L}t} \right)$$

Зависимость тока от времени при замыкании

