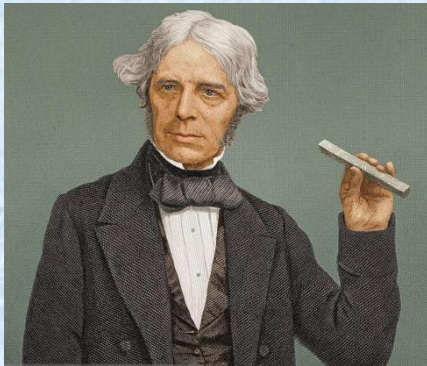
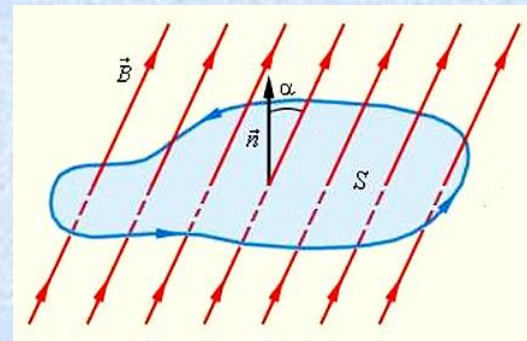
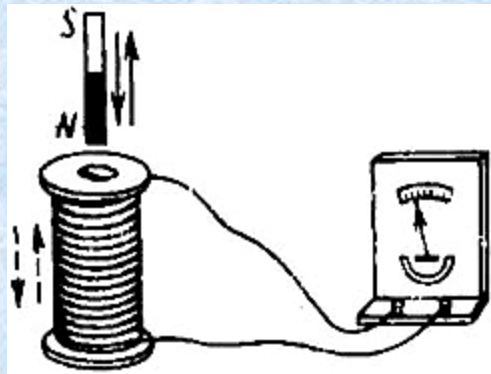


Закон электромагнитной индукции



Майкл Фарадей
1831 г.



$$\mathcal{E}_i \sim \frac{d\Phi}{dt}$$

Электродвижущая сила (ЭДС), возникающая в замкнутом проводящем контуре, пропорциональна скорости изменения магнитного потока через поверхность, ограниченную этим контуром.

$$\Phi = \int \vec{B} d\vec{S}$$

ЭДС возникает, если

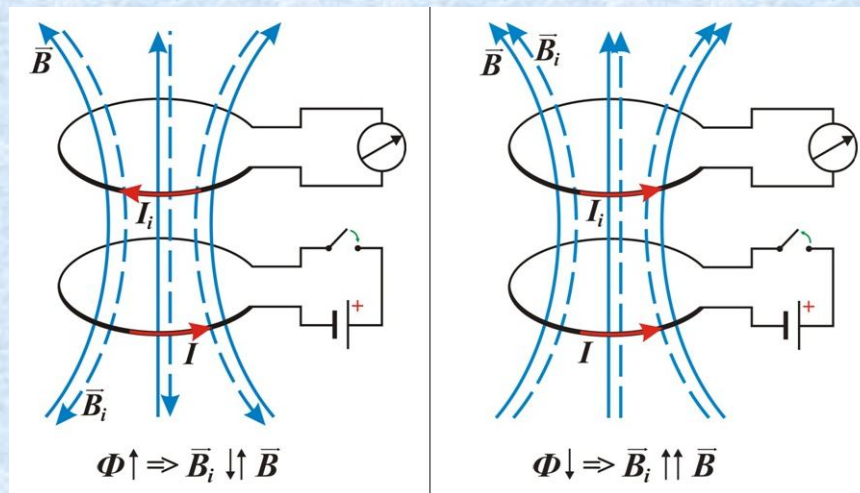
- меняется S
- меняется B
- меняется угол между \vec{n} и \vec{B}

Правило Ленца



Э. Х. Ленц
1833 г.

Индукционный ток всегда имеет такое направление, что он ослабляет действие причины, возбуждающей этот ток.

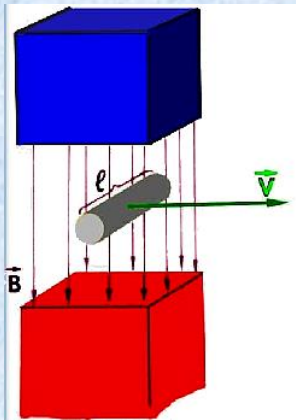


Правило Ленца – частный случай принципа Ле Шателье

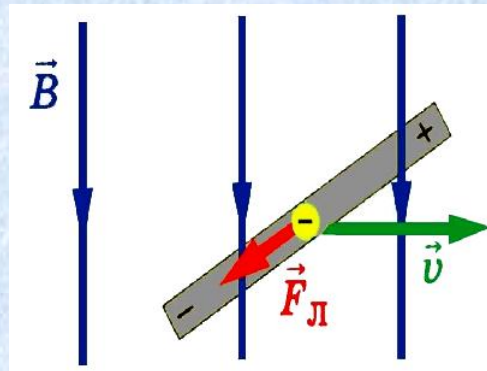
Возникновение ЭДС индукции.

Вариант 1. Движение проводника

Проводник движется
в магнитном поле



На заряды действует
направленная вдоль
провода сила Лоренца



Эта сила эквивалентна
электрической силе
поля напряженностью

$$F_L = evB$$

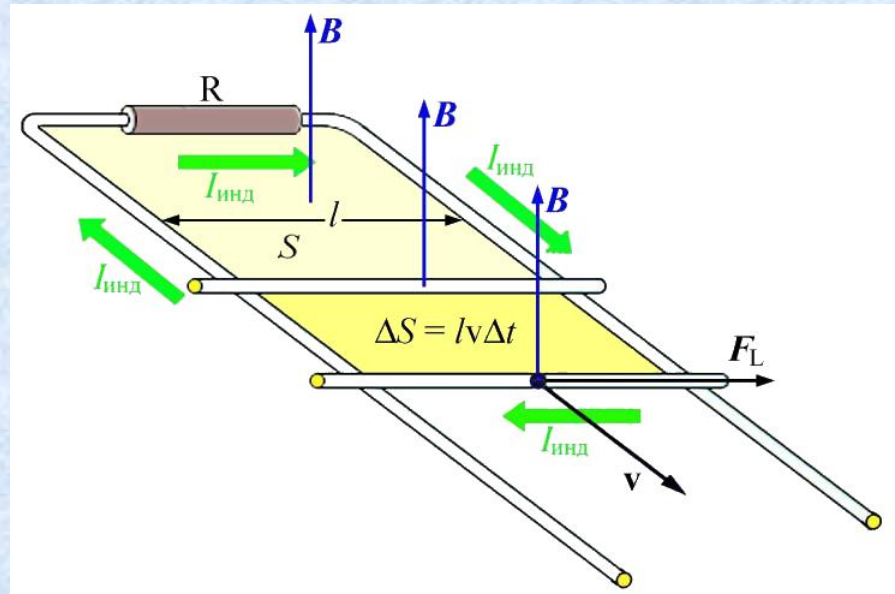
$$E^* = \frac{F_L}{e} = vB$$

Возникновение ЭДС индукции

Движение проводника

$$E^* = vB$$

Циркуляция вектора E^* по контуру равна ЭДС



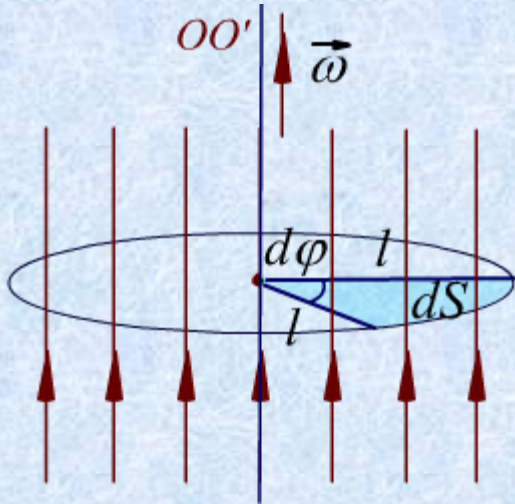
$$\mathcal{E} = \oint E_l^* dl = E^* l = vBl = B \frac{dS}{dt}$$

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

Знак минус связан с направлением обхода контура и отражает правило Ленца

Возникновение ЭДС индукции

Движение проводника



$$dS = \int_0^l r dr d\varphi = \frac{1}{2} r^2 d\varphi$$

$$|\mathcal{E}| = \left| \frac{d\Phi}{dt} \right| = \frac{1}{2} B r^2 \frac{d\varphi}{dt} = \frac{1}{2} B r^2 \omega$$

Возникновение ЭДС индукции.

Вариант 2. Изменение магнитного поля

Проводник неподвижен,
меняется магнитное поле

$$\mathcal{E} = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d}{dt} \int_S \vec{B} d\vec{S} = -\int_S \frac{d\vec{B}}{dt} d\vec{S}$$

$$\mathcal{E} = \oint_l \vec{E} d\vec{l} = \int_S \text{rot } \vec{E} d\vec{S}$$

$$\text{rot } \vec{E} = -\frac{d\vec{B}}{dt}$$

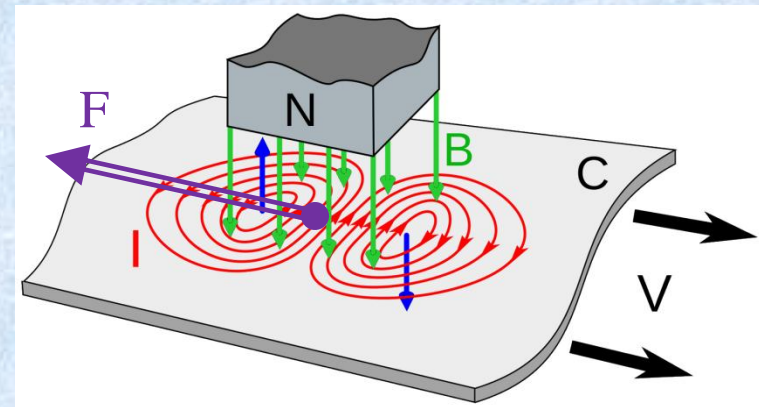
Изменяющееся магнитное поле
порождает **вихревое** электрическое поле

Токи Фуко

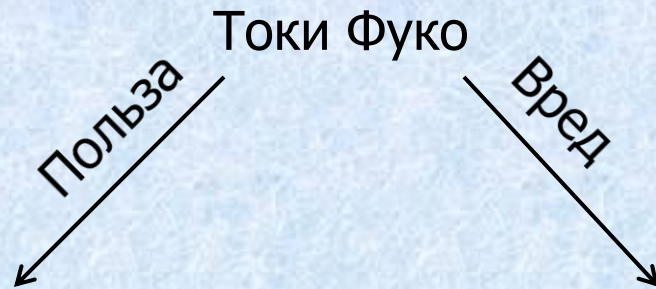
Вихревые токи, или токи Фуко открыты Д. Араго в 1824 г., объяснены М. Фарадеем, подробно исследованы Ж. Фуко.

При движении проводящей пластины в магнитном поле возникают вихревые токи

Взаимодействие токов с магнитным полем приводит к появлению тормозящей силы

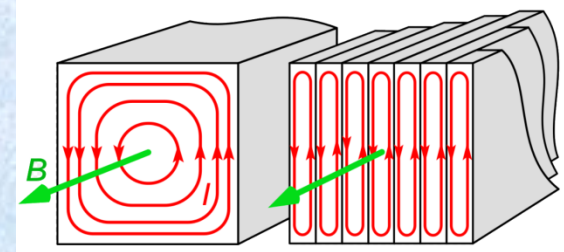


Токи Фуко



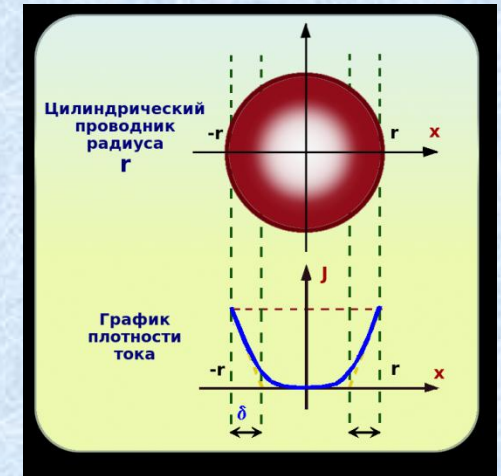
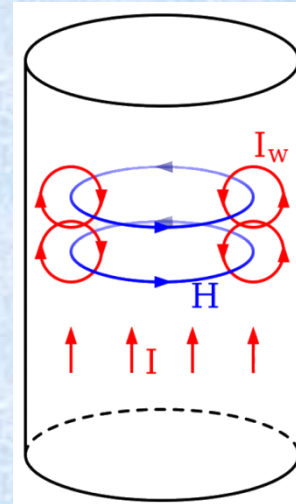
Микроволновка
Индукционные
печи
Индукционные
тормоза

Потери энергии
Перегрев
устройств



Скин-эффект

Переменный ток при протекании по проводнику распределяется не равномерно по сечению, а преимущественно в поверхностном слое.



Материал	Частота	Толщина скин-слоя δ
Медь	50 Гц	9,3 мм
	10 кГц	0,66 мм
	10 МГц	0,021 мм
Сталь	50 Гц	0,74 мм

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\sigma \mu \mu_0 \omega}}$$

Самоиндукция

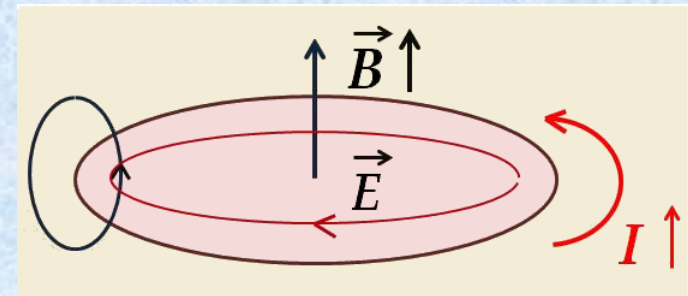
Пусть по контуру течет ток и увеличивается



Контур оказывается в переменном магнитном поле собственного тока



Возникает вихревое электрическое поле, тормозящее изменение тока



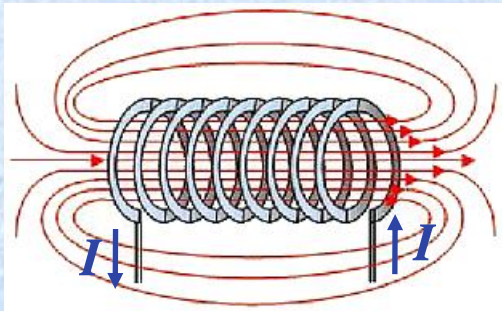
Магнитный поток пропорционален силе тока
 $\Phi = LI$

L – индуктивность $[L] = \Gamma_{\text{H}}$

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

Самоиндукция — возникновение ЭДС индукции в проводящем контуре при изменении протекающего через контур тока.

Индуктивность соленоида

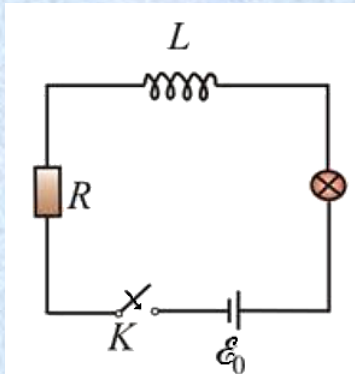


$$B = \mu\mu_0 In$$

$$\Phi = BS N = BS n l = \mu\mu_0 I n^2 V$$

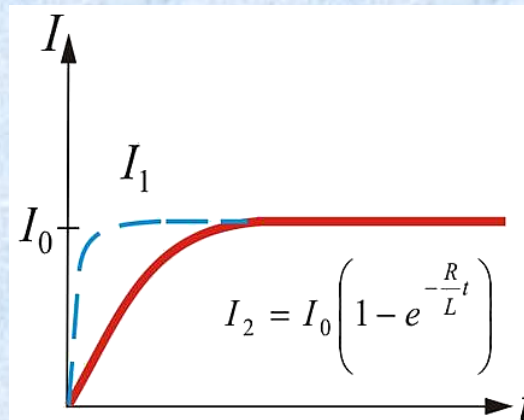
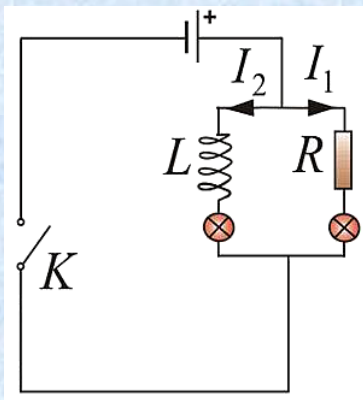
$$L = \frac{\Phi}{I} = \mu\mu_0 n^2 V$$

Замыкание цепи

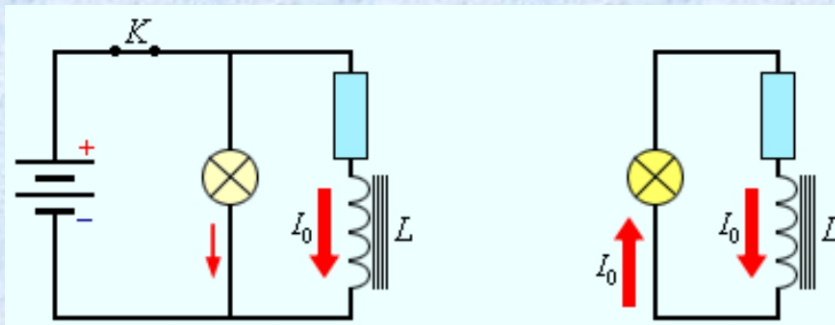
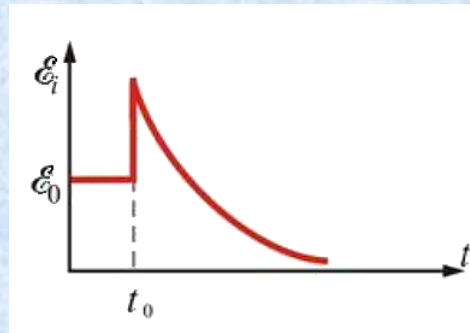
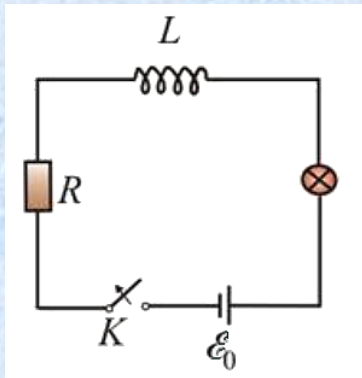


$$\mathcal{E}_0 + \mathcal{E}_i = \mathcal{E}_0 - L \frac{dI}{dt} = RI$$

$$I = I_0 \left(1 - e^{-\frac{R}{L}t} \right) = I_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad I_0 = \frac{\mathcal{E}_0}{R} \quad \tau = \frac{L}{R}$$



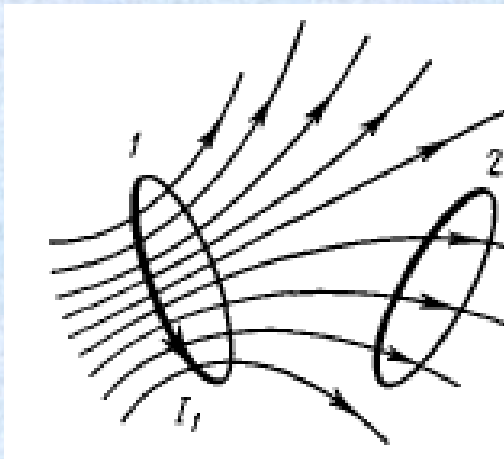
Размыкание цепи



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

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

Взаимная индуктивность



$$\Phi_2 = L_{21}I_1$$

$$\Phi_1 = L_{12}I_2$$

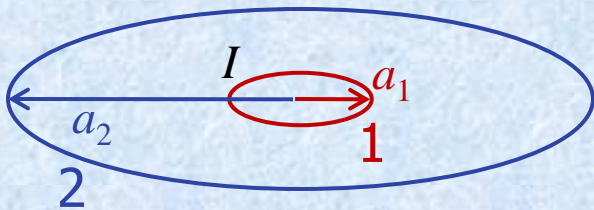
Теорема взаимности:

В отсутствии ферромагнетиков $L_{12} = L_{21}$

Магнитный поток Φ_1 сквозь контур 1, созданный током I в контуре 2, равен магнитному потоку Φ_2 сквозь контур 2, созданному таким же током I в контуре 1

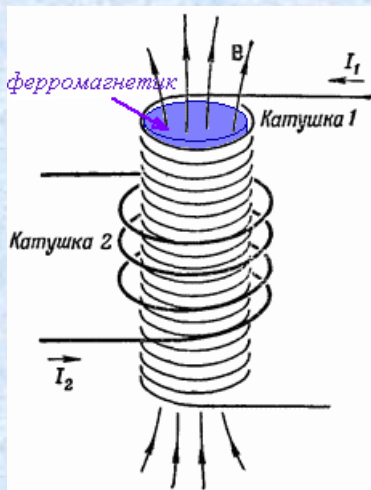
Взаимная индуктивность

Пример 1



Вопрос: Найти поток через контур 2, если $a_1 \ll a_2$.

Пример 2



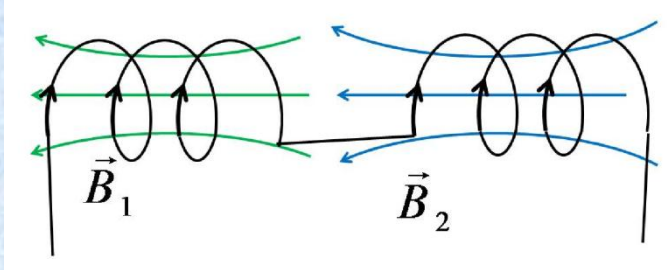
$$\Phi_2 = N_2 B_1 S = \mu_1 \mu_0 n_1 n_2 V I_1$$

$$L_{21} = \mu_1 \mu_0 n_1 n_2 V \quad L_{21} L_{12} = L_1 L_2$$

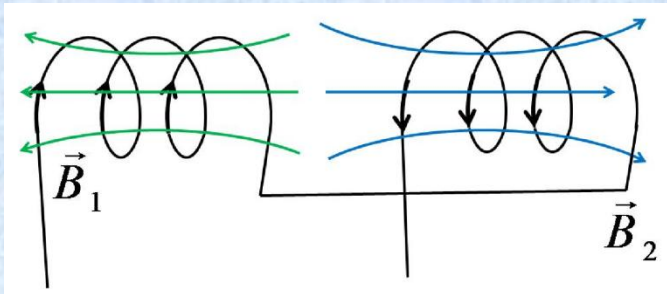
$$L_{12} = \mu_2 \mu_0 n_1 n_2 V$$

В ферромагнетике $\mu = \mu(H)$, $\mu_1 \neq \mu_2$, $L_{12} \neq L_{21}$

Индуктивность системы катушек

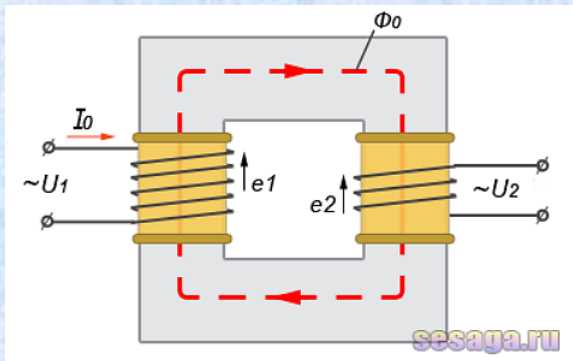


$$L = L_1 + L_2 + 2L_{12}$$



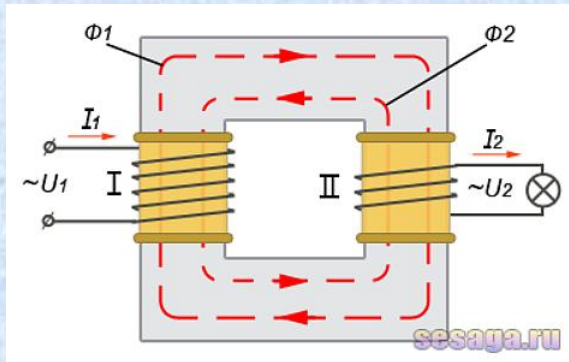
$$L = L_1 + L_2 - 2L_{12}$$

Взаимная индукция. Трансформаторы



$$\mathcal{E}_2 = -L_{21} \frac{dI_1}{dt}$$

Трансформаторы



$$R_1 I_1 = \mathcal{E}_1 - \frac{d\Phi_1}{dt}$$

$$R_2 I_2 = -\frac{d\Phi_2}{dt}$$

$$\frac{\Phi_2}{\Phi_1} \approx \frac{N_2}{N_1}$$

$$R_1 I_1 - \frac{N_1}{N_2} R_2 I_2 = \mathcal{E}_1$$

$$\Phi_1 = L_1 I_1 + L_{12} I_2$$

$$\Phi_2 = L_{21} I_1 + L_2 I_2$$

$$I_2 = -\frac{N_2}{N_1} \frac{\mathcal{E}_1}{R_2}$$

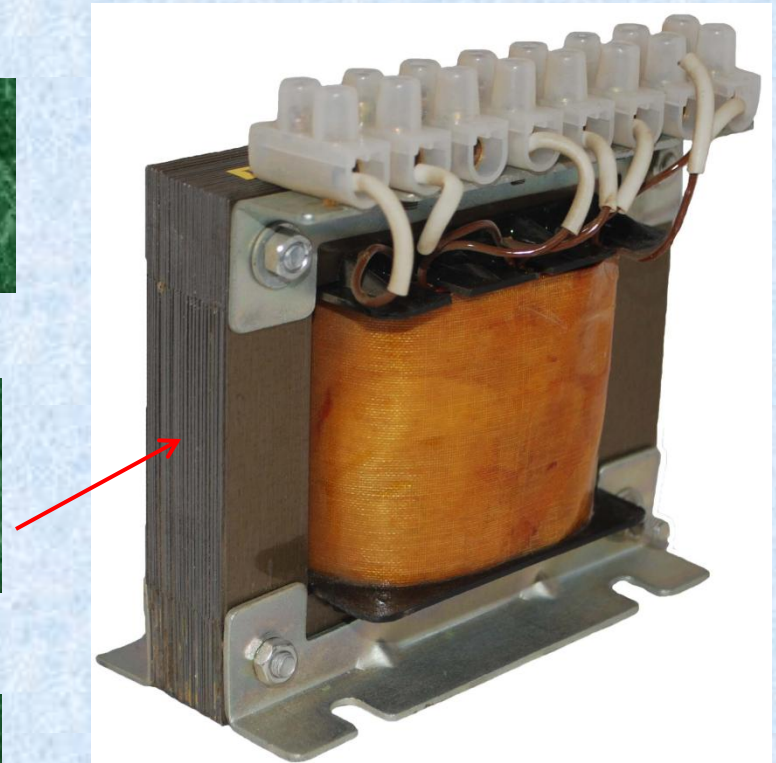
$$U_2 = I_2 R_2 = -\frac{N_2}{N_1} \mathcal{E}_1$$

Трансформаторы

Вопрос: Что будет, если в первичную обмотку трансформатора включить источник постоянного напряжения?

Вопрос: Почему сердечник трансформатора собирается из большого числа листов?

Вопрос: Уже при разработке первой радиоаппаратуры для авиационной и космической техники была выбрана частота питания 500 Гц.
А почему не 50?



Энергия магнитного поля

$$I = \frac{\mathcal{E} + \mathcal{E}_i}{R} \quad \mathcal{E} = IR + L \frac{dI}{dt}$$

При увеличении силы тока от 0 до I сторонние силы совершают работу

$$A = \int_0^t \mathcal{E} I dt = \int_0^t I^2 R dt + \int_0^I L I dI \quad W = \frac{LI^2}{2}$$

энергия, затраченная
на нагрев проводника

энергия, затраченная на
создание магнитного поля

Энергия магнитного поля

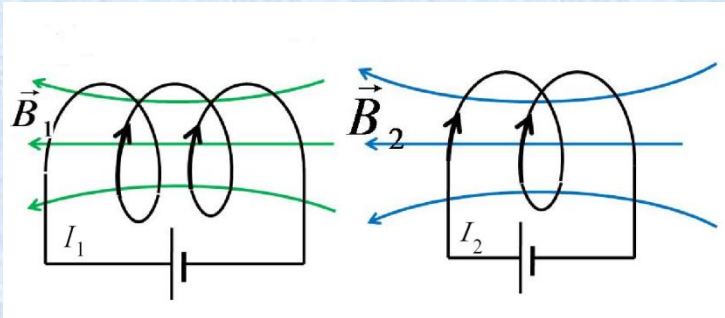
$$W = \frac{LI^2}{2}$$

В соленоиде $B = \mu_0 \mu n I$; $L = \mu_0 \mu n^2 V$ $W = \frac{B^2 V}{2\mu_0 \mu}$

Объемная плотность энергии
магнитного поля

$$w = \frac{W}{V} = \frac{B^2}{2\mu_0 \mu} = \frac{\vec{B} \vec{H}}{2}$$

Магнитная энергия связанных контуров



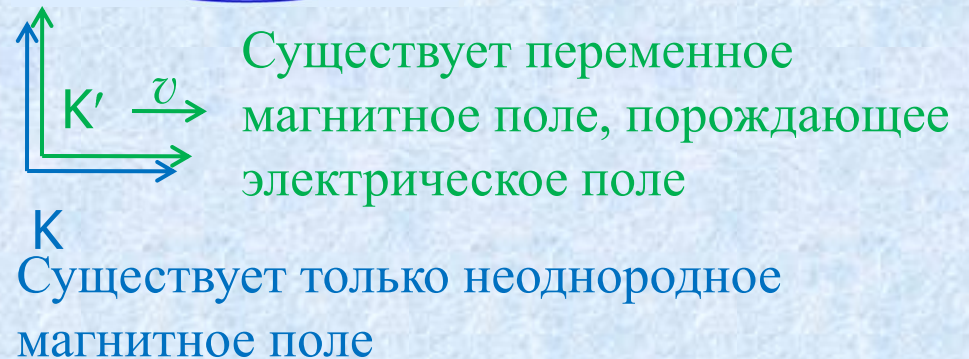
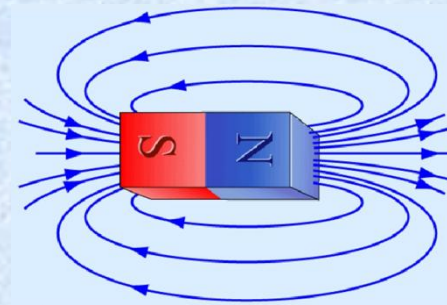
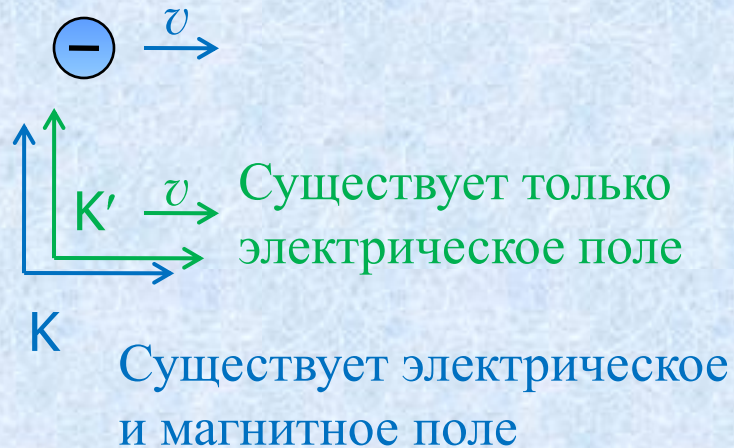
$$dW = - \mathcal{E}_{i1} + \mathcal{E}_{12} I_1 dt - \mathcal{E}_{i2} + \mathcal{E}_{21} I_2 dt$$

$$\mathcal{E}_{i1} = -L_1 \frac{dI_1}{dt} \quad \text{ЭДС самоиндукции в первом контуре}$$

$$\mathcal{E}_{12} = -L_{12} \frac{dI_2}{dt} \quad \text{ЭДС взаимной индукции в первом контуре}$$

$$W = \frac{L_1 I_1^2}{2} + \frac{L_2 I_2^2}{2} + L_{21} I_1 I_2$$

Относительность электрического и магнитного полей



Относительность электрического и магнитного полей

Инвариантность заряда

Преобразование полей ($v \ll c$)

$$E'_{\parallel} = E_{\parallel}$$

$$B'_{\parallel} = B_{\parallel}$$

$$E'_{\perp} = E_{\perp} + [\vec{v}_0 \vec{B}]$$

$$B'_{\perp} = B_{\perp} - [\vec{v}_0 \vec{E}] / c^2$$

Если в К-системе $\vec{B} = 0$, то $B' = -[\vec{v} \vec{E}']$, т. е. $\vec{B}' \perp \vec{E}'$

Инварианты полей

$$\vec{E} \cdot \vec{B} = \vec{E}' \cdot \vec{B}'$$

$$E^2 - c^2 B^2 = E'^2 - c^2 B'^2$$