

Восточно-Сибирский университет технологий и управления
Технологический колледж— Физика

Электромагнетизм

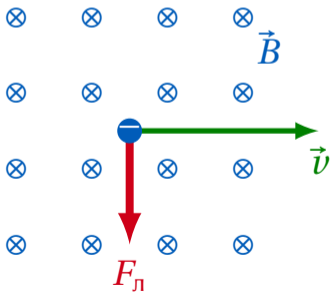
Магнитное поле. Электромагнитная индукция

Улан-Удэ / 2018

Сила Лоренца

$$\vec{F}_L = q[\vec{v}, \vec{B}], \quad F_L = qvB \sin \alpha$$

$$\alpha = \angle \vec{v}, \vec{r}.$$



1. Магнитное поле не действует на покоящийся заряд
2. Сила Лоренца изменяет только направление скорости, не изменяя ее модуля
3. Постоянное магнитное поле не совершает работы
4. Кинетическая энергия заряженной частицы в магнитном поле не изменяется

Сила, действующая на движущийся заряд в электрическом и магнитном полях (\vec{E} и \vec{B})

$$\vec{F} = \vec{F}_{\text{кулон}} + \vec{F}_{\text{л}} = q\vec{E} + q[\vec{v}, \vec{B}]$$

$$\vec{v} \perp \vec{B}$$

Траектория — **окружность**

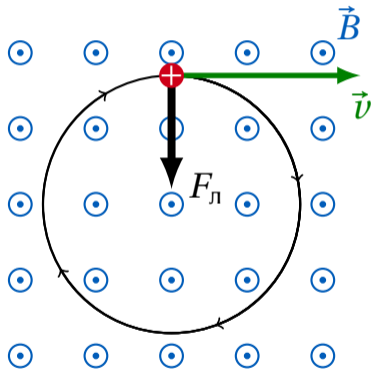
$$F = ma, \quad \Rightarrow \quad qvB = m \frac{v^2}{R}$$

Радиус окружности:

$$R = \frac{mv}{qB}$$

Период вращения:

$$T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi m}{qB}$$



$$\vec{v} \parallel \vec{B}$$

Траектория — **прямая**

$$\vec{F}_л = q[\vec{v}, \vec{B}] = 0,$$

$$\vec{v} = \text{const}$$

$$\vec{v} \nparallel \vec{B}$$

Траектория — **цилиндрическая винтовая линия**

1. Равномерное прямолинейное движение вдоль поля со скоростью $v_{\parallel} = v \cos \alpha$
2. Равномерное движение со скоростью $v_{\perp} = v \sin \alpha$ по окружности в плоскости, перпендикулярной полю

$$\vec{v} \parallel \vec{B}$$

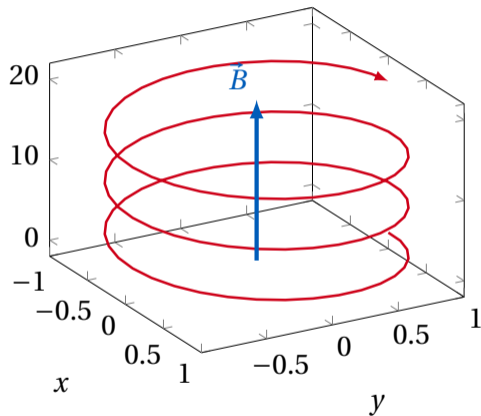
Траектория — **цилиндрическая винтовая линия**

Радиус винтовой линии

$$r = \frac{mv \sin \alpha}{qB}$$

Шаг винтовой линии

$$h = v_{\parallel} T = vT \cos \alpha = \frac{2\pi mv \cos \alpha}{qB}$$

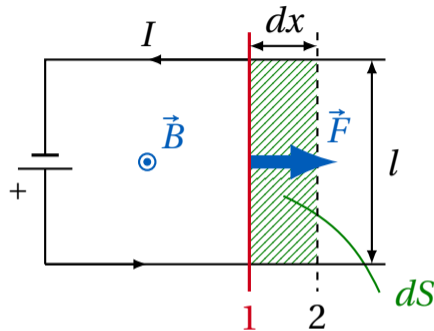


$$F_A = IBl$$

$$\delta A = F_A \cdot \Delta x = IBl \cdot \Delta x = IB \cdot \Delta S = I \cdot \Delta \Phi$$

Работа по перемещению проводника с током в магнитном поле равна произведению силы тока на магнитный поток, пересеченный движущимся проводником

$$A = I \cdot \Delta \Phi, \quad \leftarrow \quad I = \text{const}$$

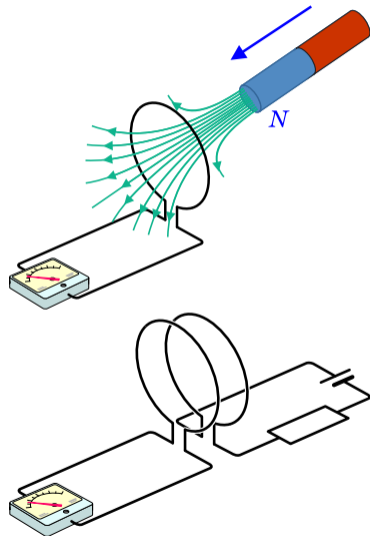


Работа по перемещению замкнутого контура равна произведению силы тока в контуре на изменение магнитного потока

Электромагнитная индукция

возникновение электрического тока в проводящем контуре при изменении магнитного потока сквозь поверхность ограниченную этим контуром

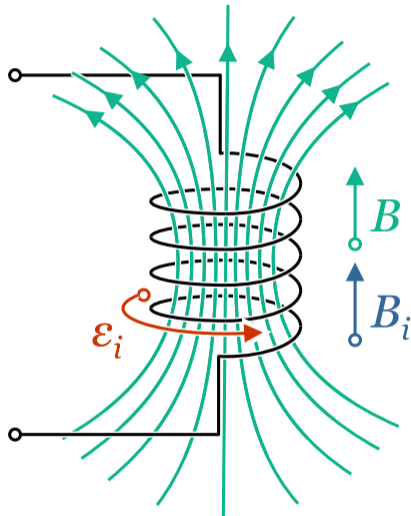
Значение индукционного тока совершенно не зависит от способа изменения потока магнитной индукции, а определяется лишь скоростью его изменения



Правило Ленца

Индукционный ток в контуре имеет всегда такое направление, что создаваемое им магнитное поле препятствует изменению магнитного потока, вызвавшему этот индукционный ток

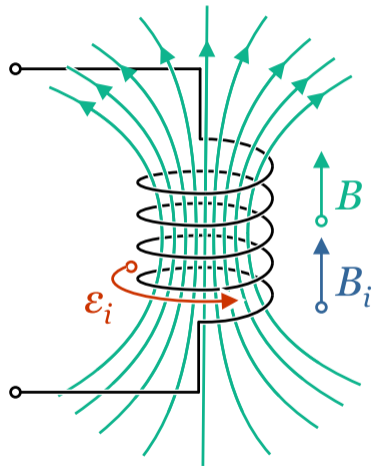
$$\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} < 0$$



Закон Фарадея

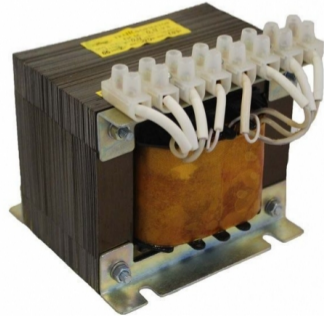
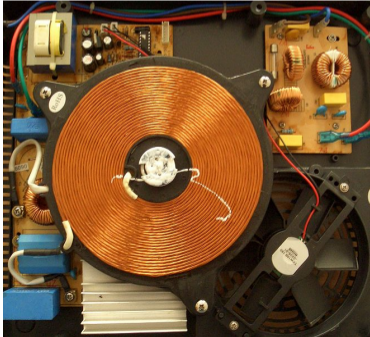
ЭДС электромагнитной индукции в контуре численно равна и противоположна по знаку скорости изменения магнитного потока сквозь поверхность, ограниченную этим контуром

$$\varepsilon_i = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$



Токи Фуко – индукционные токи в сплошных массивных проводниках

Применение: магнитный тормоз, индукционные печи и бытовые плиты



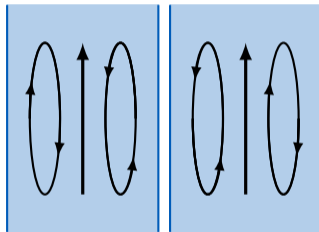
Скин-эффект (поверхностный эффект) – явление смещения высокочастотного тока на поверхность проводника

Применение: поверхностная закалка металлических деталей

Вследствие возникновения вихревых токов быстропеременный ток оказывается распределенным по сечению провода неравномерно — он как бы вытесняется на поверхность проводника

$$\frac{\Delta I}{\Delta t} > 0$$

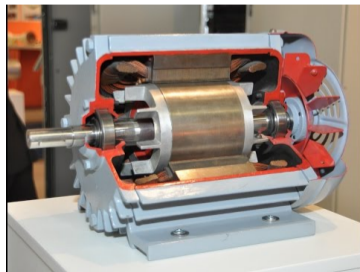
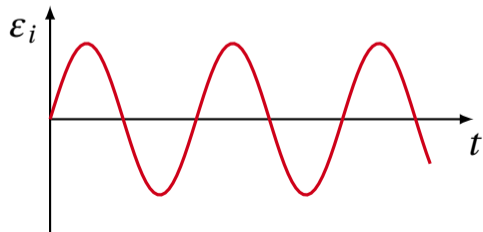
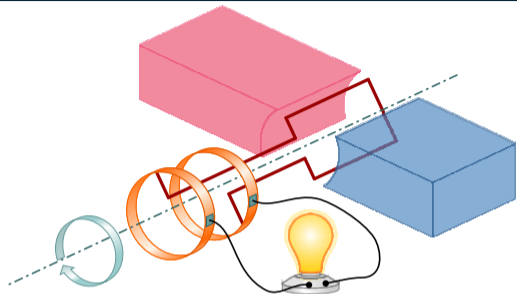
$$\frac{\Delta I}{\Delta t} < 0$$



$$\Phi = \vec{B}\vec{S} = BS\cos\alpha = BS\cos(\omega t),$$

$$\varepsilon_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = \omega BS\sin(\omega t)$$

$$\varepsilon_{i,max} = \omega BS$$



$$\begin{cases} B \sim I, \\ \Phi \sim B, \end{cases} \Rightarrow \Phi \sim I, \Rightarrow \Phi = LI, \quad L = \text{const}$$

Индуктивность

коэффициент пропорциональности силой тока в контуре и магнитным потоком

$$L = \frac{\Phi}{I}, \quad L = \frac{B\delta}{A} = \Gamma_H$$

$$B = \frac{\mu_0 \mu N I}{l}, \Rightarrow \Psi = N\Phi = NBS = \frac{\mu_0 \mu N^2 I S}{l}, \Rightarrow L = \frac{\mu_0 \mu N^2 S}{l}$$

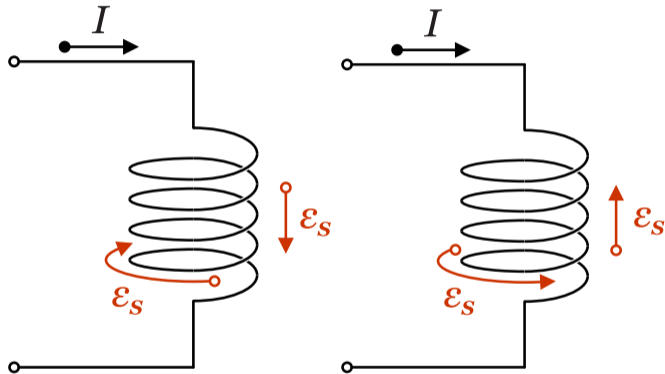
$$L = \text{const}, \quad \Rightarrow \quad \varepsilon_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -\frac{\Delta(LI)}{\Delta t} = -L\frac{\Delta I}{\Delta t}$$

Для ферромагнетиков $L = f(I)$, $\Leftarrow \mu = f(H) = f(I)$

Контур, обладая определенной индуктивностью, приобретает электрическую инертность, заключающуюся в том, что любое изменение тока тормозится, тем сильнее, чем больше индуктивность контура

$$\varepsilon_i = -L\frac{\Delta I}{\Delta t}$$

$$\varepsilon_i = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$$



Экстратоки самоиндукции, согласно правилу Ленца, всегда направлены так, чтобы препятствовать изменениям тока в цепи.

Наличие индуктивности в цепи приводит к замедлению исчезновения или установления тока в цепи



Ферритовый фильтр

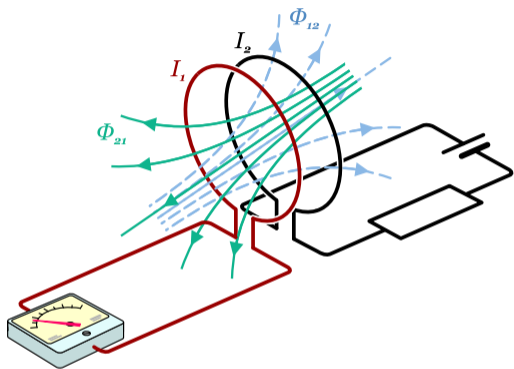
$$\Phi_{12} = L_1 I_1, \quad \Psi_{12} = N_2 \Phi_{12}$$

$$\varepsilon_{i2} = -\frac{\Delta \Psi_{21}}{\Delta t} = -L_{21} \frac{\Delta I_1}{\Delta t}$$

$$\varepsilon_{i1} = -\frac{\Delta \Psi_{12}}{\Delta t} = -L_{12} \frac{\Delta I_2}{\Delta t}$$

L_{12} – взаимная индуктивность контуров

$$B = \mu_0 \mu \frac{N_1 I_1}{l}$$



$$\Psi_2 = \Phi_2 N_2 = \mu_0 \mu \frac{N_1 N_2 I_1}{l} S$$

$$L_{12} = L_{21} = \mu_0 \mu \frac{N_1 N_2 I_1}{l} S$$

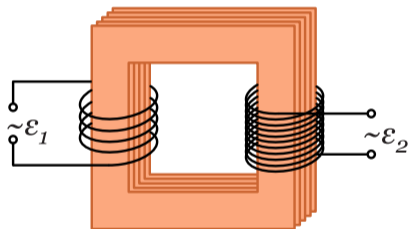
Трансформатор

$$\varepsilon - \frac{\Delta(N_1\Phi)}{\Delta t} = I_1 R_1$$

$R_1 \rightarrow 0$:

$$\begin{cases} \varepsilon_1 \approx N_1 \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}, \\ \varepsilon_2 \approx N_2 \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}, \end{cases} \Rightarrow \varepsilon_1 = -\frac{N_2}{N_1} \varepsilon_2$$

$\frac{N_2}{N_1}$ – коэффициент трансформации



Повышающий трансформатор:

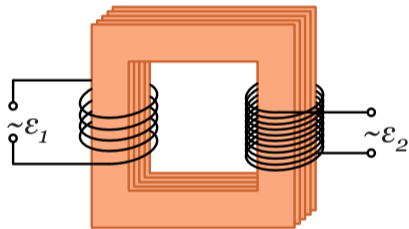
увеличивающий переменную э.д.с. и
понижающий ток

$$\frac{N_2}{N_1} > 1$$

Понижающий трансформатор:

уменьшающий э.д.с. и повышающий
ток

$$\frac{N_2}{N_1} < 1$$



$$A = \frac{LI^2}{2}$$
$$W_{\text{магн}} = \frac{LI^2}{2} = \frac{B^2}{2\mu_0\mu} V = \frac{BH}{2} V$$

Носителем данной энергии является магнитное поле

Максвелл для объяснения э.д.с. индукции в неподвижных проводниках предположил, что всякое переменное магнитное поле возбуждает в окружающем пространстве **вихревое электрическое поле** \vec{E}_B :

$$\varepsilon_i = \vec{E}_B \cdot \Delta \vec{l} = -\frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = -\frac{\Delta \vec{B} S}{\Delta t}$$

Переменное магнитное поле всегда связано с порождаемым им электрическим полем, а переменное электрическое поле всегда связано с порождаемым им магнитным