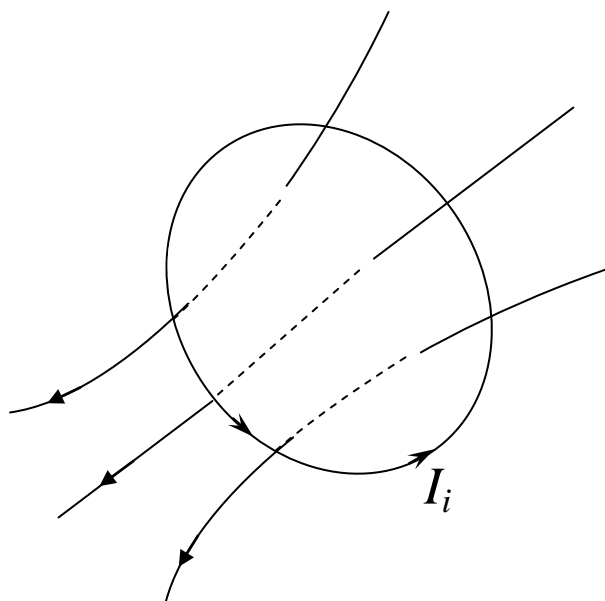


ЛЕКЦИЯ № 9

Гл. 4. Электромагнитная индукция

1. Явление электромагнитной индукции

Для протекания электрического тока в замкнутом контуре нужен источник (батарея, аккумулятор, генератор и т. п.), однако ток в замкнутом контуре может протекать и без источника, но для этого магнитный поток, проходящий через поверхность, ограниченную контуром, должен изменяться.



Опыты Фарадея:

- 1) две катушки → Вкл, Выкл.;
- 2) реостат;
- 3) ферромагнетик;
- 4) постоянный магнит.

$$\frac{d\Phi_m}{dt} \neq 0$$

Явление возникновения индукционного тока в замкнутом контуре, через поверхность которого проходит изменяющийся магнитный поток, называется **явлением электромагнитной индукции** (открыто английским физиком Фарадеем).

$$I_i \sim \mathcal{E}_i \sim \frac{d\Phi_m}{dt}, N$$

Основной закон электромагнитной индукции (закон Фарадея-Ленца) определяет ЭДС индукции, возникающую в замкнутом контуре при изменении пронизывающего его магнитного потока:

$$\mathcal{E}_i = -N \frac{d\Phi_m}{dt} = -\frac{d\psi_m}{dt}, \quad (9-1)$$

где N – количество витков в замкнутом контуре;

$\psi_m = N\Phi_m$ – потокосцепление.

Знак «минус» в законе (9-1) соответствует **правилу Ленца**: индукционный ток всегда имеет такое направление, чтобы своим магнитным полем противодействовать изменению магнитного потока, вызвавшего этот ток.

Магнитный поток через поверхность замкнутого контура:

$$\Phi_m = \int_S \vec{B} d\vec{S} = \int_S B dS \cdot \cos \alpha, \quad \alpha = \angle \vec{B} d\vec{S} = \angle \vec{B} \cdot \vec{n}$$

Изменить Φ_m во времени можно

- 1) $B = f(t), \alpha = \text{const}, d\vec{S} = \text{const} \quad \Phi_m = B(t) \cdot S \cdot \cos \alpha.$
- 2) $S = f(t), \alpha = \text{const}, B = \text{const} \quad \Phi_m = B \cdot S(t) \cdot \cos \alpha.$
- 3) $\alpha = f(t), B = \text{const}, S = \text{const} \quad \Phi_m = B \cdot S \cdot \cos \alpha(t).$

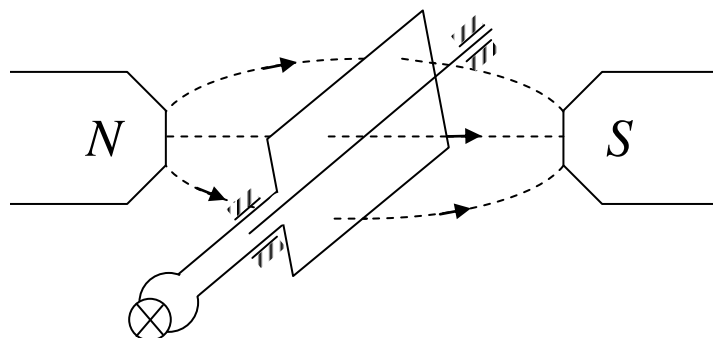
$$\alpha = \omega t = 2\pi \nu t = \frac{2\pi}{T} t.$$

Силу индукционного тока в замкнутом контуре можно вычислить по закону Ома для замкнутой цепи:

$$I_i = \frac{\mathcal{E}_i}{R}, \quad (9-2)$$

где R – сопротивление проводов контура ($r = 0$ – в цепи нет источника).

Генератор электрического тока!



– статор (постоянный магнит)

– ротор, якорь (вращающаяся рамка, катушка)

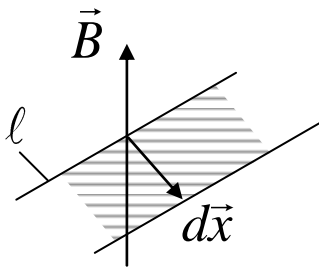
ГЭС ТЭЦ АЭС

вода пар → турбина → замкнутый контур → магнитное поле → вращение → эл. ток

Вихревые токи Фуко!

ЭДС индукции возникает и в незамкнутом проводнике, если он движется в магнитном поле.

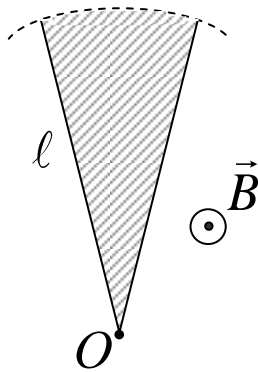
– незамкнутый проводник движется с постоянной скоростью.



$$\begin{aligned}
 U = \mathcal{E}_i &= -\frac{d\Phi_m}{dt} = -B \cos \alpha \frac{dS}{dt} = \\
 &= -B \cos \alpha \frac{\ell dx}{dt} = -B \cdot \ell \cdot v \cdot \cos \alpha, \\
 \alpha &= \vec{B} \cdot \vec{n}
 \end{aligned}$$

при $\alpha = 0^\circ$ $U = \mathcal{E}_i = -B \cdot \ell \cdot v$ (9-3)

- фюзеляж самолета;
- колесная пара.
- незамкнутый проводник равномерно вращается в магнитном поле.



$$\begin{aligned}
 U = \mathcal{E}_i &= -\frac{d\Phi_m}{dt} = -B \cos \alpha \frac{dS}{dt} = \\
 &= -B \cos \alpha \frac{\frac{1}{2} \ell dx}{dt} = -\frac{1}{2} B \ell \cos \alpha \frac{dx}{dt} = \\
 &= -\frac{1}{2} B \ell \cos \alpha \cdot v = -\frac{1}{2} B \ell \cos \alpha \cdot \omega \ell = \\
 &= -\frac{1}{2} B \ell^2 \omega \cdot \cos \alpha.
 \end{aligned}$$

при $\alpha = 0^\circ$ $U = \mathcal{E}_i = -\frac{1}{2} B \ell^2 \omega = -B \ell^2 \pi \nu = -B \ell^2 \frac{\pi}{T}$ (9-4)

2. Индуктивность контура. Явление самоиндукции

Любой замкнутый контур создает магнитный поток, если в нем протекает электрический ток. При этом в разных контурах создаются разные магнитные потоки, даже если сила тока в них одинаковая – контуры отличаются индуктивностью.

$$\Psi_m = N\Phi_m \sim B \sim I \quad \Psi_m = LI$$

Индуктивность контура L – скалярная физическая величина, равная отношению суммарного магнитного потока, проходящего через все витки контура $N\Phi_m$, к силе тока I в замкнутом контуре:

$$L = \frac{N\Phi_m}{I}. \quad (9-5)$$

В СИ индуктивность измеряется в генри (Гн).

Индуктивность контура не зависит ни от магнитного потока, ни от силы тока в контуре, она зависит от размеров и формы контура и от магнитных свойств среды, в которой находится контур. Так, для соленоида индуктивность вычисляется по формуле:

$$L = \mu\mu_0 n^2 V, \quad (9-6)$$

где $n = \frac{N}{\ell}$ – количество витков N соленоида, отнесенное к длине ℓ соленоида;

V – объем соленоида.

$$(\Psi_m = N\Phi_m = N \cdot B \cdot S = N\mu\mu_0 nIS$$

$$\Psi_m = LI$$

$$L = \mu\mu_0 NnS)$$

Если по замкнутому контуру пропускать изменяющийся электрический ток, то он будет создавать изменяющееся магнитное поле. А изменяющийся через площадь контура магнитный поток приведет к возникновению в контуре ЭДС.

Явление возникновения индукционного тока в замкнутом контуре, по которому проходит изменяющийся электрический ток, называется **явлением самоиндукции**.

ЭДС самоиндукции, которая при этом возникает в контуре, согласно закону (9-1) и отношению (9-5) вычисляется ($L = \text{const}$) по уравнению:

$$E_s = -L \frac{dI}{dt}. \quad (9-7)$$

L – мера инертности контура по отношению к изменению силы тока в нем.

«Правило Ленца»: индукционный ток всегда имеет такое направление, чтобы своим магнитным полем противодействовать причине, его вызывающей.

Экстратоки!

3. Явление взаимной индукции. Устройство трансформатора

САМОСТОЯТЕЛЬНО

– для чего ферромагнитный сердечник?

– почему не из сплошного металла, а листовое железо?

4. Энергия магнитного поля

Полная работа источника электрического поля за время dt :

$$\delta A = I \mathcal{E} dt$$

Эта работа идет на создание магнитного поля, которое обладает энергией:

$$\delta A = -I \frac{d\Psi_m}{dt} dt = -I d\Psi_m = I L dI = L d\left(\frac{I^2}{2}\right) = d\left(\frac{LI^2}{2}\right)$$

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

Т. о., электрический ток, протекая по проводам, создает вокруг себя магнитное поле, которое обладает энергией:

$$W_m = \frac{LI^2}{2}. \quad (9-8)$$

Объемная плотность энергии магнитного поля может быть вычислена по формуле:

$$\omega_m = \frac{dW_m}{dV} = \frac{B^2}{2\mu\mu_0} = \frac{\mu\mu_0 H^2}{2} = \frac{BH}{2} \quad (9-9)$$