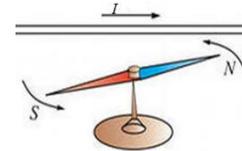


ЯВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ

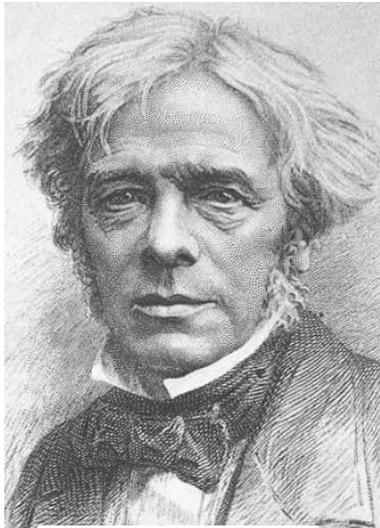
В 1820г. Эрстед показал, что **проводник с током создает магнитное поле.**



Возможно ли обратное явление – может ли магнитное поле «создать» электрический ток?

1821г. **М. Фарадей** - «Превратить магнетизм в электричество»

1831г. - **М. Фарадей** открыл **явление электромагнитной индукции**



Майкл Фарадей
(1791 –1867)

Явление электромагнитной индукции (ЭМИ) – возникновении электрического тока в замкнутом проводящем контуре при изменении магнитного потока через поверхность, ограниченную этим контуром.

Возникающий при этом ток называют **индукционным.**

Классические опыты Фарадея

Опыт 1. Введение и выведение постоянного магнита в замкнутый на гальванометр соленоид:

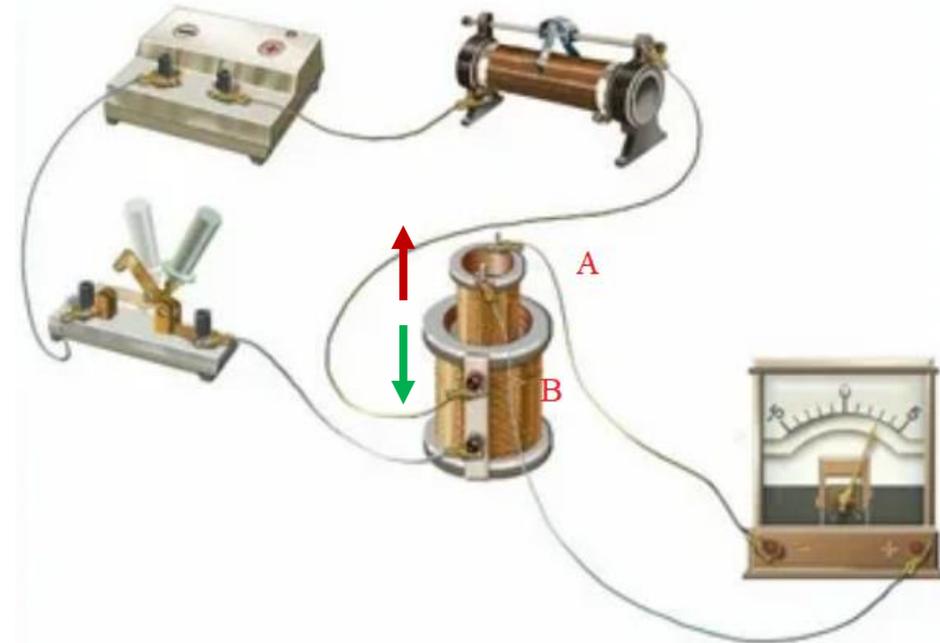


1. **Отклонение стрелки гальванометра** (возникновение индукционного тока) наблюдается *только при относительном движении катушки (соленоида) и магнита.*

2. **Направления отклонения** стрелки гальванометра **противоположны при введении и выведении магнита.**

3. **Отклонение** стрелки гальванометра *тем больше*, чем **больше скорость движения магнита** относительно катушки.

Опыт 2. Две катушки вставляются одна в другую, концы одной из катушек, присоединяются к гальванометру, а через другую катушку пропускается ток



1. **Отклонение стрелки гальванометра** (возникновение индукционного тока) наблюдается

- *при перемещении катушек друг относительно друга;*

- *в моменты включения и выключения тока;*

- *в моменты его увеличения или уменьшения.*

2. Направления отклонений стрелки гальванометра также противоположны при включении или выключении тока, его увеличении или уменьшении, сближении или удалении катушек.

Из опытов Фарадея следует:

1) **Индукционный ток** в контуре возникает *при изменении магнитного потока через поверхность, ограниченную контуром.*

2) **Величина индукционного тока не зависит от способа**, которым вызывается изменение потока магнитной индукции Φ , а определяется скоростью его изменения, то есть значением $d\Phi/dt$.

3) При изменении **знака** $d\Phi/dt$ меняется также **направление** индукционного тока.

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

- основной закон ЭМИ (закон Фарадея)

ε_i - ЭДС электромагнитной индукции
(**мгновенное** значение)

$\frac{d\Phi}{dt}$ - скорость изменения магнитного потока

Φ - магнитный поток

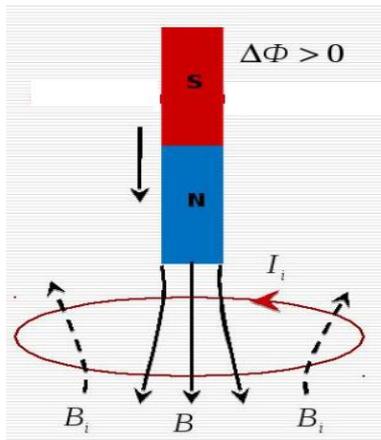
$\langle \varepsilon_i \rangle = \left| \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \right|$ - среднее значение ЭДС индукции

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

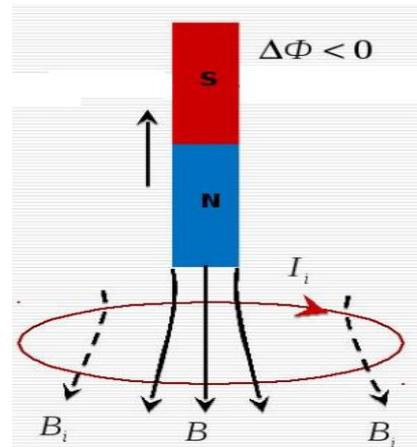
Знак «-» в законе Фарадея соответствует *правилу Ленца*.

Правило Ленца: индукционный ток всегда имеет такое направление, что создаваемое им магнитное поле препятствует изменению магнитного потока, которое вызвало данный ток.

ПРИМЕРЫ



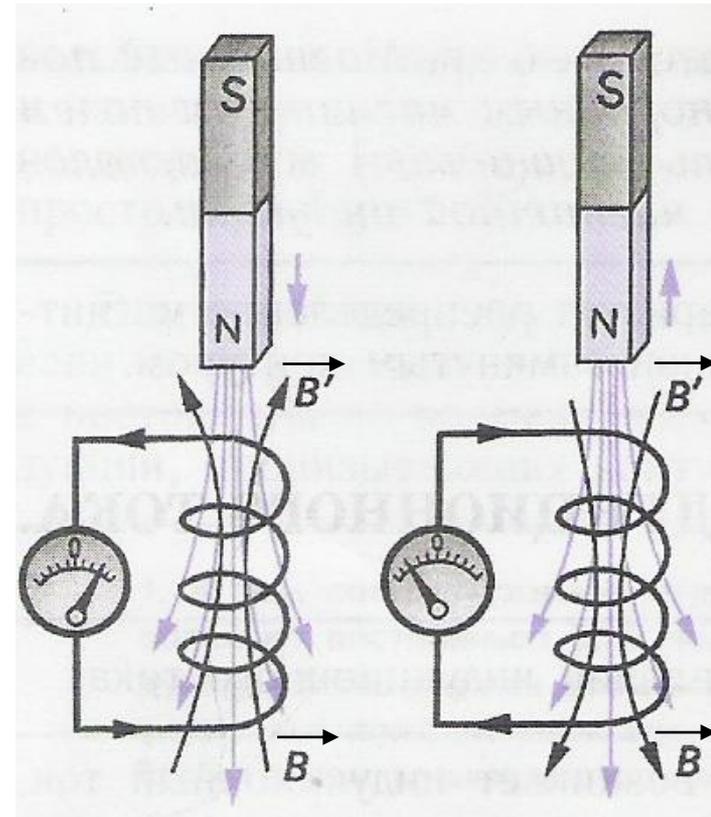
Если магнитный поток через контур возрастает, то направление индукционного тока в контуре таково, что вектор магнитной индукции созданного этим током поля направлен противоположно вектору магнитной индукции внешнего магнитного поля.



Если магнитный поток через контур уменьшается, то направление индукционного тока таково, что вектор магнитной индукции созданного этим током поля сонаправлен вектору магнитной индукции внешнего поля.

Алгоритм определения направления индукционного тока

1. Определить направление линий индукции внешнего поля B (выходят из N и входят в S).
2. Определить, увеличивается или уменьшается магнитный поток через контур (если магнит вдвигается в кольцо, то $\Delta\Phi > 0$, если выдвигается, то $\Delta\Phi < 0$).
3. Определить направление линий индукции магнитного поля B' , созданного индукционным током (если $\Delta\Phi > 0$, то линии B и B' направлены в противоположные стороны; если $\Delta\Phi < 0$, то линии B и B' сонаправлены).
4. Пользуясь правилом буравчика (правой руки), определить направление индукционного тока.



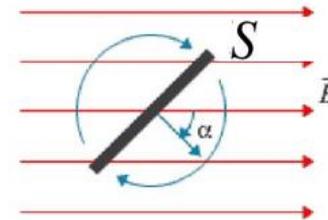
$\Delta\Phi$

характеризуется изменением
числа линий B , пронизывающих
контур.

$$\Phi = \int_S \vec{B} d\vec{S} = \int_S B dS \cos \alpha$$

Магнитный поток Φ через контур площадью S изменяется в следующих случаях

1. Контур перемещается в неоднородном поле $\vec{B} \neq const$
2. Неподвижный контур в переменном поле $B = B(t)$.
3. Деформация контура ($S = S(t)$).
4. Изменение ориентации плоскости контура по отношению к индукции магнитного поля $\alpha = \alpha(t)$.



Природа ЭДС электромагнитной индукции (природа сторонних сил)

Возникновение ЭДС индукции в движущемся проводнике:

- свободные электроны внутри движущегося проводника под действием **силы Лоренца** смещаются к одному из концов проводника,
- на другом конце проводника остаются некомпенсированные положительные заряды,
- между противоположными концами возникает разность потенциалов (\mathcal{E}_i), если проводник замкнут, в нем течет ток.



Возникновение ЭДС индукции в неподвижных проводниках

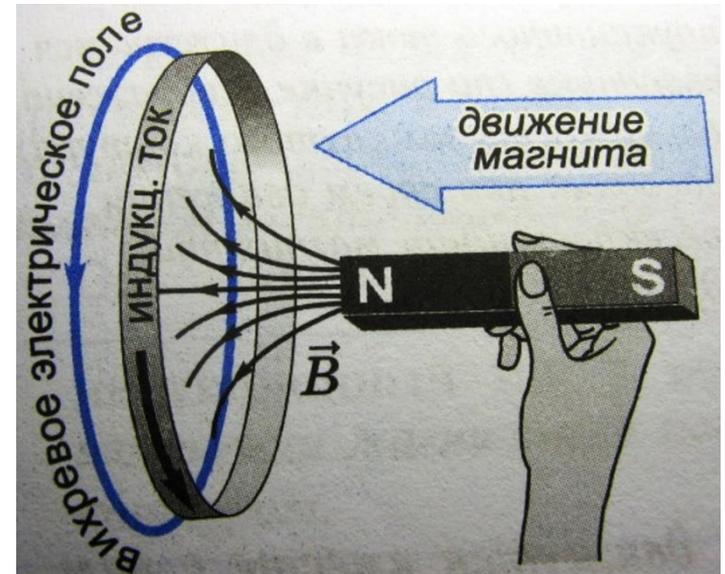
(теория Максвелла):

Всякое переменное магнитное поле возбуждает в окружающем пространстве переменное электрическое поле, которое и является причиной возникновения индукционного тока в проводнике.

Циркуляция вектора \vec{E}_B этого поля по любому неподвижному контуру L проводника представляет собой ЭДС электромагнитной индукции:

$$\varepsilon_i = \oint \vec{E}_B \cdot d\vec{l} = - \frac{d\Phi}{dt}$$

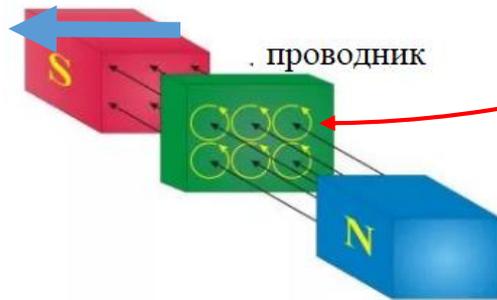
напряженность переменного электрического поля,
которое является **вихревым**



Вихревые токи (токи Фуко)

Вихревые токи (токи Фуко) - индукционные токи, возникающие в массивном сплошном проводнике, помещенном в переменное магнитное поле, или движущемся в магнитном поле.

Токи Фуко **замкнуты** в толще проводника.

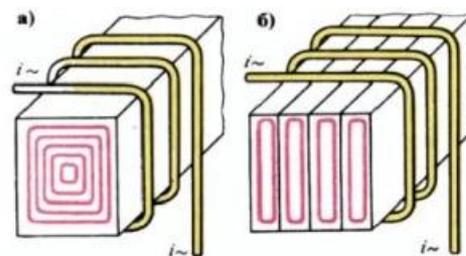
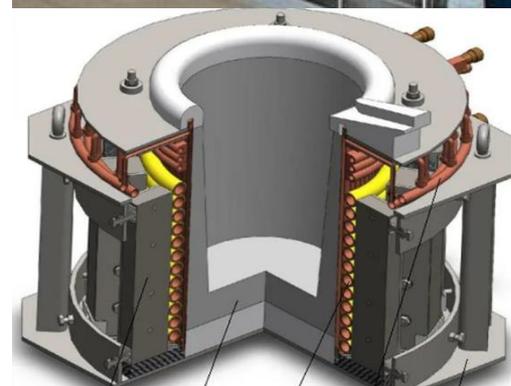
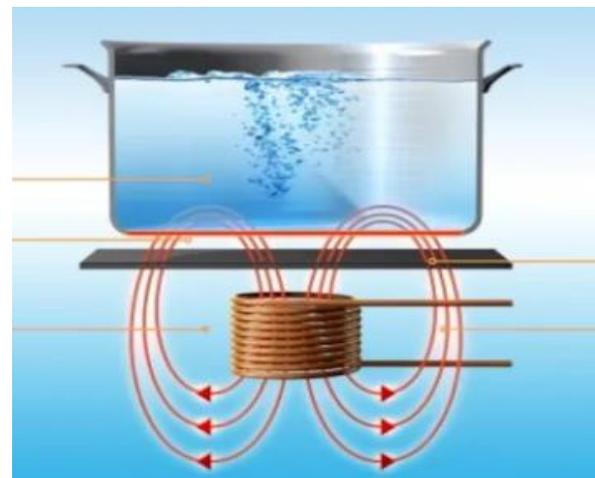


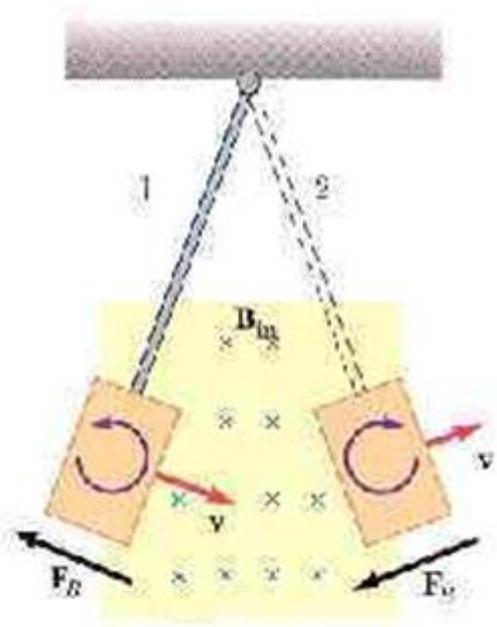
Проявление токов Фуко:

1. **ТЕПЛОВОЕ** действие используют:

- в индукционных печах для плавления проводящих тел;
- прогрев металлических частей вакуумных установок для их дегазации;
- пайка, плавка и поверхностная закалка металлов;
- в бытовых индукционных и микроволновых СВЧ-печах.







1 – металлическая пластина входит в магнитное поле: вихревые токи направлены против часовой стрелки.

2 – металлическая пластина покидает магнитное поле: вихревые токи направлены по часовой стрелке.

Силы, действующие на пластину, направлены к положению равновесия, и, в конце концов, колебательное движение пластины затухает.

2. ДЕМПФИРУЮЩЕЕ -

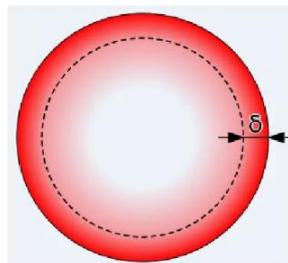
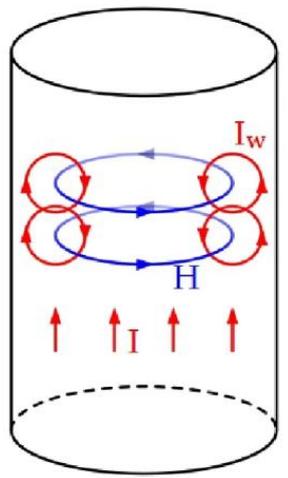
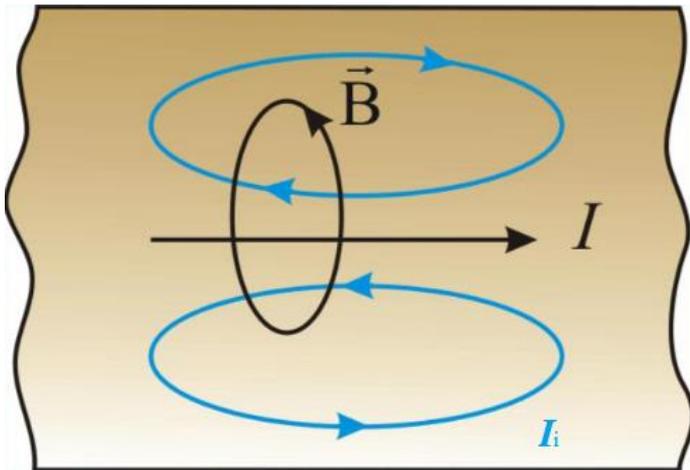
торможение движущих в сильном магнитном поле проводников из-за взаимодействия токов Фуко с магнитным полем

- в успокоителях колебаний подвижных частей приборов и аппаратов, (в гальванометрах, сейсмографах и др.)

- в индукционных тормозах, в которых массивный металлический диск вращается в поле электромагнитов.



3. МАГНИТНЫЙ СКИН ЭФФЕКТ - явление вытеснения из ферромагнетика переменного тока на поверхность проводника.



Явление самоиндукции

Самоиндукция – возникновение ЭДС индукции в проводящем контуре при изменении тока в этом же контуре.



$$\varepsilon_s = - \frac{d \Phi}{d t}$$

Из закона Б-С-Л

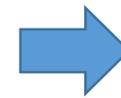


$$B \sim I$$

По определению



$$\Phi \sim B$$



$$\Phi \sim I$$

$$\Phi = L I$$

- сцепленный с контуром магнитный поток

L – индуктивность контура

$$[L] = \text{Гн (генри)}$$

Индуктивность контура зависит

от его формы и размеров

от магнитных свойств окружающей его среды (магнитной проницаемости μ).

$$L = \mu\mu_0 \frac{N^2}{l} S = \mu\mu_0 n^2 V \quad \text{-индуктивность соленоида}$$

$n = \frac{N}{l}$ - число витков на единицу длины; $V = Sl$ - объем соленоида

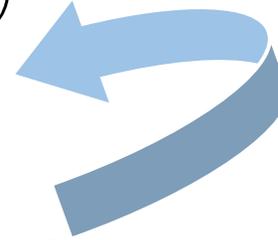
$$\varepsilon_s = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d}{dt}(LI) = -\left(L \frac{dI}{dt} + I \frac{dL}{dt} \right)$$

$\underbrace{\hspace{10em}}_{\text{равно 0}}$

Если размеры контура не изменяются
и среда не является ферромагнитной



$L = \text{const}$



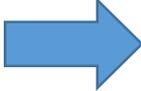
$$\varepsilon_s = -L \frac{dI}{dt} \quad \text{- ЭДС самоиндукции (мгновенное значение)}$$

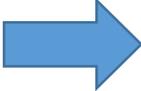
(1)

$\frac{dI}{dt}$ - скорость изменения силы тока

$\langle \varepsilon_s \rangle = L \left| \frac{\Delta I}{\Delta t} \right|$ - среднее значение ЭДС самоиндукции

Знак «-» в формуле (1) соответствует **правилу Ленца** и показывает, что наличие индуктивности в контуре приводит к **замедлению изменения тока** в нем.

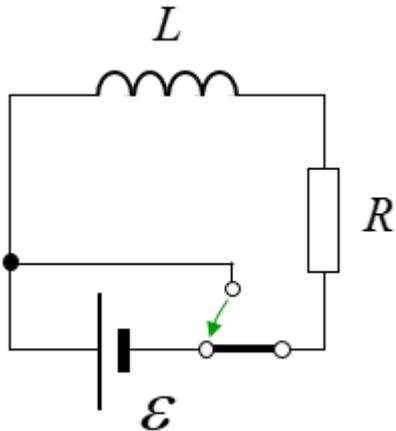
Если $\frac{dI}{dt} > 0$, то $\mathcal{E}_s < 0$  $I \uparrow \downarrow I_i$
сила тока самоиндукции

Если $\frac{dI}{dt} < 0$, то $\mathcal{E}_s > 0$  $I \uparrow \uparrow I_i$
сила тока самоиндукции

Из-за явления самоиндукции установление и исчезновение тока в цепи, содержащей индуктивность, происходит не мгновенно, а *постепенно*.

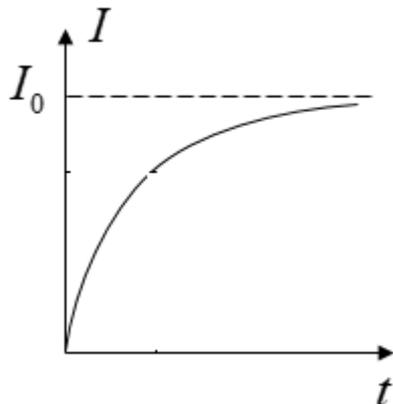
Токи при замыкании и размыкании электрической цепи

Замыкание цепи



$$\left. \begin{aligned} RI &= \mathcal{E} + \mathcal{E}_s \\ \mathcal{E}_s &= -L \frac{dI}{dt} \end{aligned} \right\} \Rightarrow RI = \mathcal{E} - L \frac{dI}{dt} \quad (2)$$

Решением уравнения (2) с учетом начального условия $I(0) = 0$ является выражение



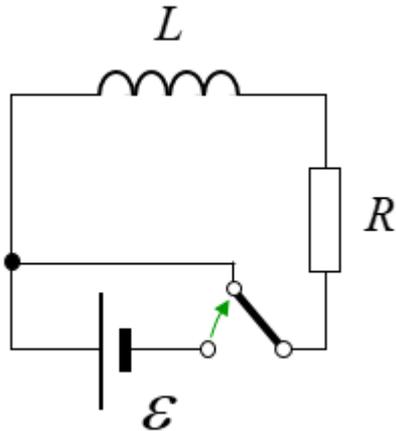
$$I = I_0 (1 - e^{-t/\tau})$$

- закон изменения тока при замыкании цепи

$$I_0 = \mathcal{E}/R \quad \text{— установившийся ток (при } t \rightarrow \infty)$$

$$\tau = L/R \quad \text{— время релаксации}$$

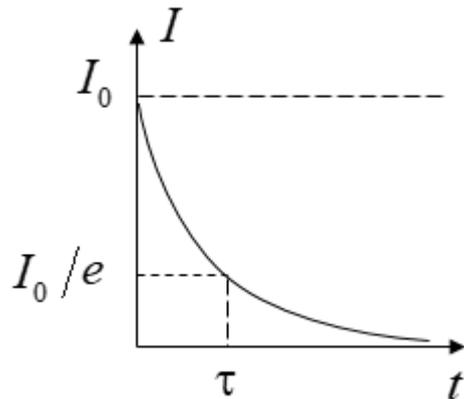
Размыкание цепи



$$\left. \begin{aligned} RI &= \mathcal{E}_s \\ \mathcal{E}_s &= -L \frac{dI}{dt} \end{aligned} \right\} \Rightarrow RI = -L \frac{dI}{dt} \quad (3)$$

Решением уравнения (3) с учетом начального условия $I(0) = I_0$ является выражение

$$I = I_0 e^{-t/\tau} \quad \text{- закон изменения тока при размыкании цепи}$$



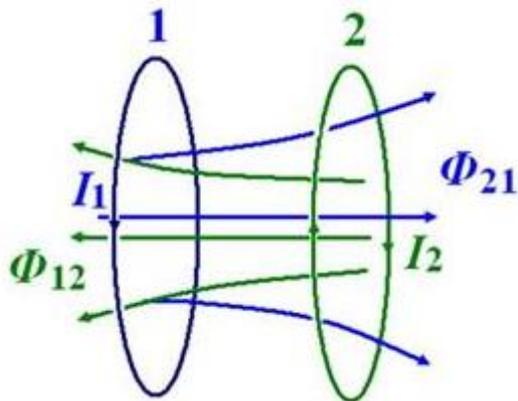
$$I_0 = \mathcal{E}/R \quad \text{- начальный ток (при } t = 0)$$

$$\tau = L/R \quad \text{- время релаксации}$$

Явление взаимной индукции

Явление возникновения ЭДС индукции в одном из контуров при изменении тока в другом контуре называется **взаимной индукцией**.

Рассмотрим два неподвижных контура **1** и **2**, расположенных достаточно близко друг от друга (**связанные контуры**).



Если в контуре **1** течет ток I_1 , то он создает через контур **2** полный магнитный поток (в отсутствие ферромагнетиков)

$$\Phi_{21} = L_{21} \cdot I_1$$

При изменении тока I_1 во времени в контуре **2** наводится ЭДС индукции:

$$\mathcal{E}_{i2} = - L_{21} \cdot dI_1/dt$$

При протекании тока I_2 в контуре **2** возникает сцепленный с контуром **1** магнитный поток

$$\Phi_{12} = L_{12} \cdot I_2$$

При изменениях тока I_2 в контуре **1** индуцируется ЭДС:

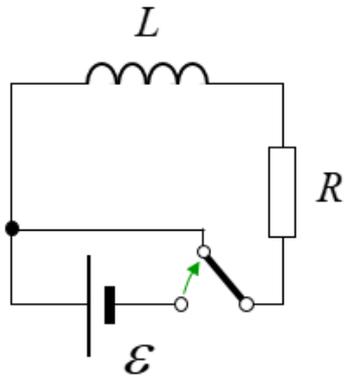
$$\mathcal{E}_{i1} = - L_{12} \cdot dI_2/dt$$

L_{12} и L_{21} - **взаимная индуктивность контуров**

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

На явлении взаимной индукции основан принцип работы трансформаторов, которые применяют для повышения или понижения переменного напряжения.

Энергия магнитного поля. Объемная плотность энергии



После размыкания ключа через сопротивление некоторое время течет убывающий ток. Проводник нагревается.

$dQ = dA$
(количество теплоты = работе тока самоиндукции)

$$dA = \varepsilon_s dq = -L \frac{dI}{dt} \cdot Idt = -LI dI$$

При убывании тока от I до 0:

$$A = -\int_I^0 LI dI = -\frac{LI^2}{2} \Big|_I^0 = \frac{LI^2}{2}$$

Совершение этой работы сопровождается *исчезновением* магнитного поля, которое первоначально существовало в соленоиде и окружающем его пространстве.

Магнитное поле является *носителем* той энергии, за счет которой производится работа тока, идущая на изменение *внутренней энергии* проводников – их нагревание.

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

-энергия магнитного поля

Индуктивность соленоида

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

$$\left. \begin{aligned} W_m &= \frac{1}{2} \mu\mu_0 n^2 V I^2 \\ H &= nI \end{aligned} \right\} W_m = \frac{1}{2} \mu\mu_0 H^2 V$$

$$w_m = \frac{W_m}{V} \quad \text{- объемная плотность энергии (энергия}$$

приходящаяся на единицу объема)

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

- объемная плотность энергии магнитного поля

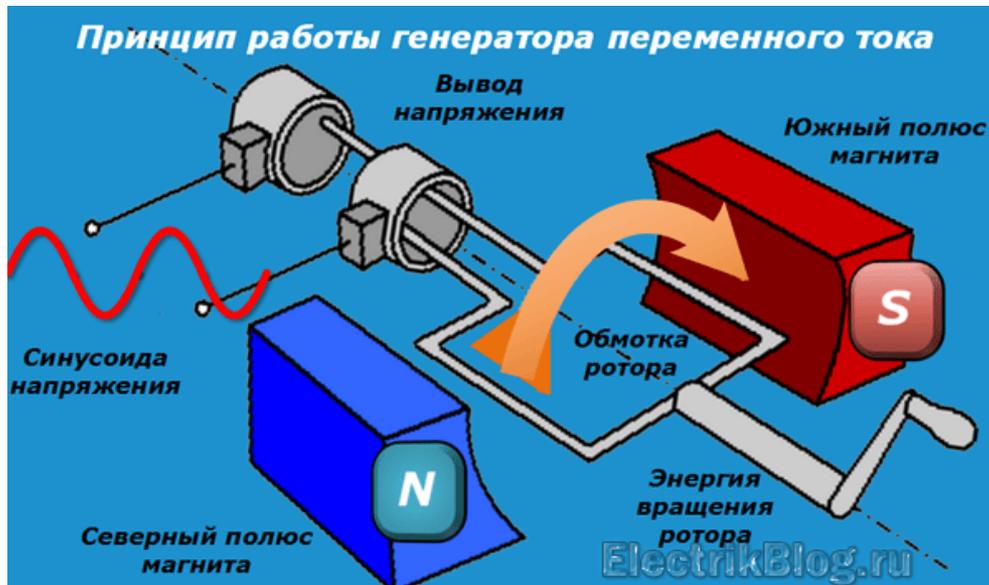
B - индукция магнитного поля

H - напряженность магнитного поля

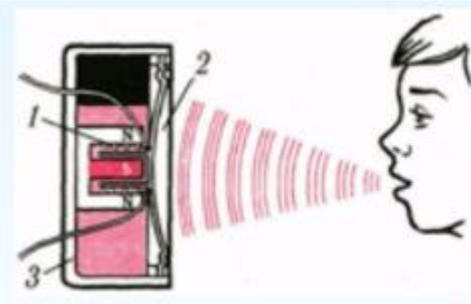
$B = \mu\mu_0 H$ - связь индукции и напряженности магнитного пол

Применение явления электромагнитной индукции

Индукционные генераторы

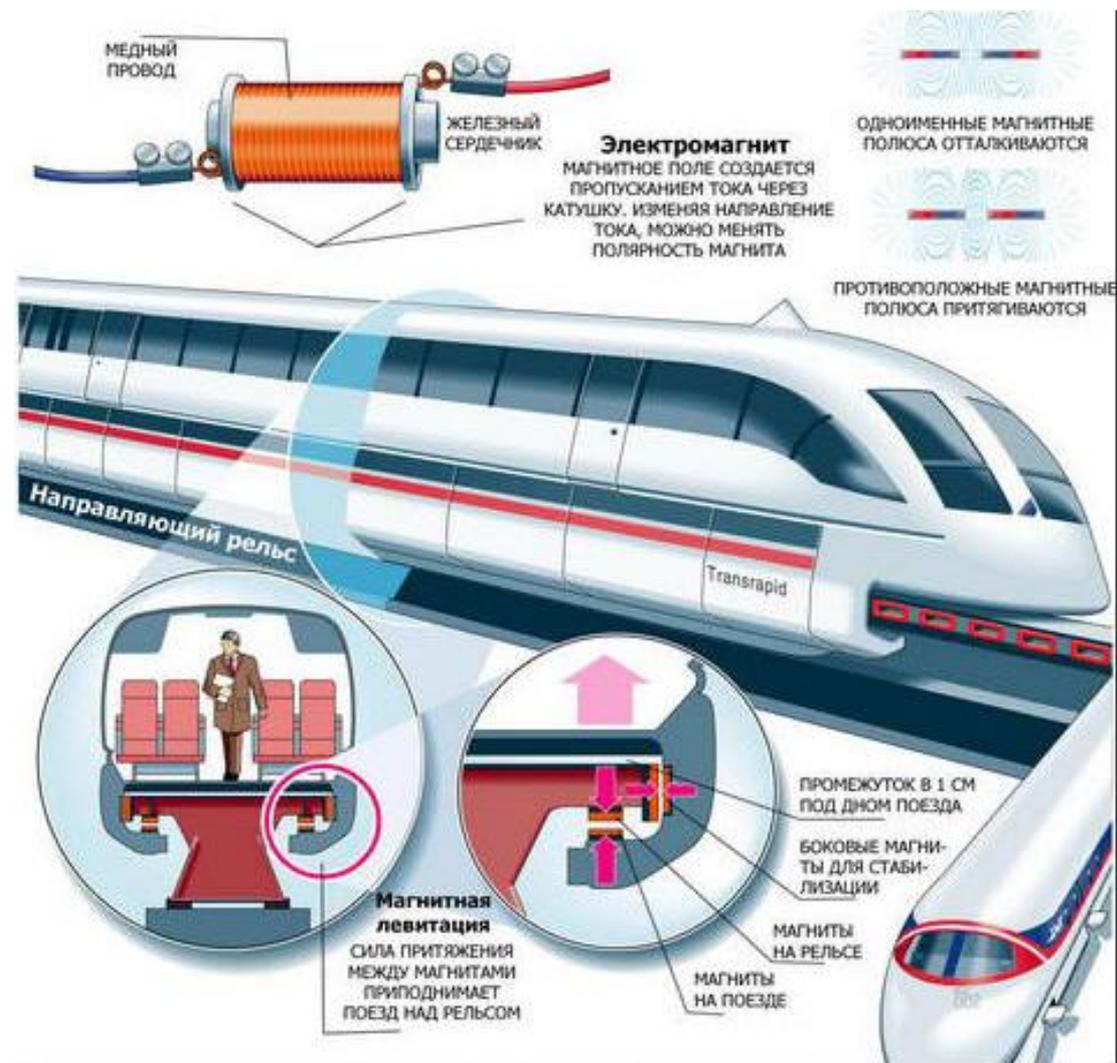


Микрофоны и громкоговорители



Мембрана под действием воздуха колеблется, а вместе с ней и звуковая катушка. А так как она находится в магнитном поле постоянного магнита, то в ней возникает индукционный ток. Микрофон преобразует звуковые колебания воздуха в электрический ток

Поезда на магнитной подушке



Электрический ток в рельсовых магнитах включается и выключается 100 000 раз в секунду, обеспечивая поступательное движение и отсутствие силы трения

■ Детекторы для обнаружения металлических предметов



Военный миноискатель



Досмотровый



Арочный



Принцип работы металлодетекторов



Излучающая катушка излучает магнитное поле



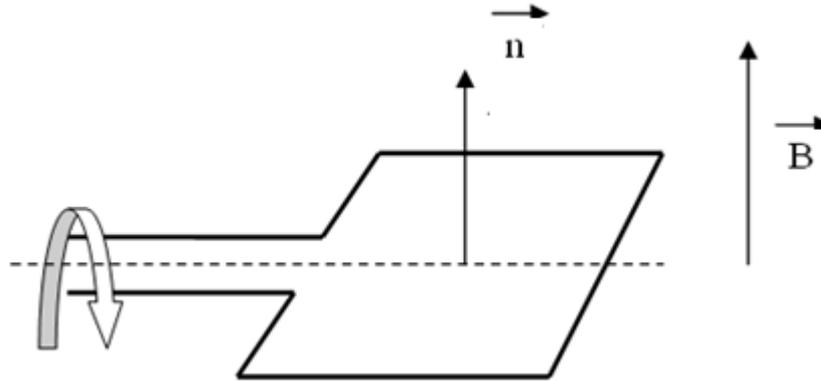
Под действием поля в предмете генерируются вихревые токи



Предмет генерирует собственное магнитное поле, улавливаемое приемной катушкой



Вращение рамки в магнитном поле



$$\varepsilon_i = -N \frac{d\Phi}{dt} = -N \frac{d}{dt} (BS \cos(2\pi\nu t)) = NBS 2\pi\nu \sin(2\pi\nu t)$$

где N – число витков; Φ – магнитный поток через один виток; B - индукция магнитного поля;

S - площадь рамки; ν - частота вращения рамки.

Электрический индукционный ток в замкнутом контуре:

$$I = \varepsilon_i / R ,$$

где R - сопротивление контура.