

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ

Лекция 14. Электромагнитная индукция

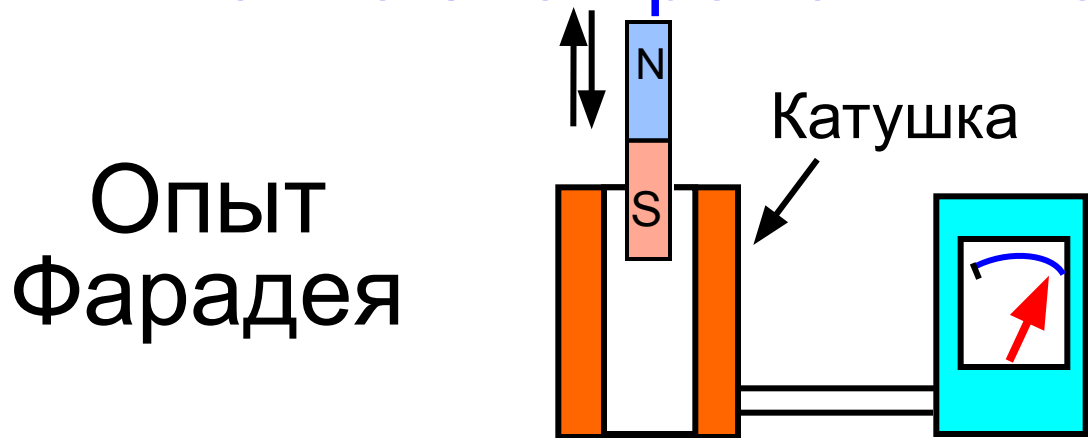
- Закон Фарадея,
- Правило Ленца,
- Вихревое эл. поле,
- Вихревые токи.

Т.И. Трофимова, Курс физики, 1988 г

§ 122 - 125, стр. 223 -228

1. Опыты Фарадея

- В 1831 г. М. Фарадей (Англия) открыл явление электромагнитной индукции.



$$\varepsilon_i \sim \frac{d\Phi}{dt}$$

Электромагнитная индукция – явление возникновения эл. тока в проводящем замкн. контуре при изменении через него магн. потока.

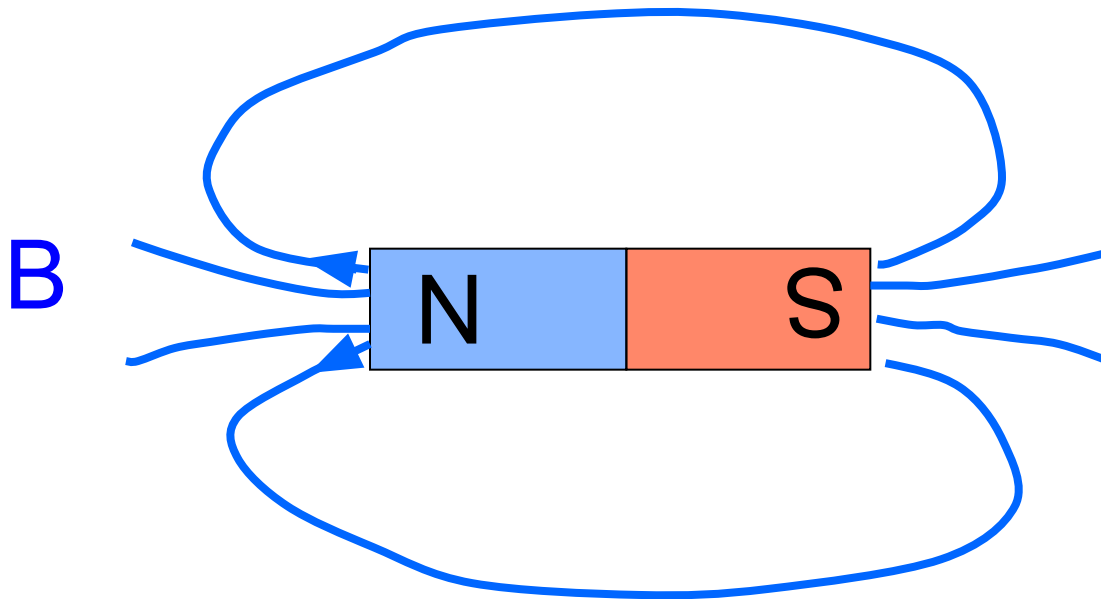
Такой ток **называли индукционным**. • Правило Ленца

2. Правило Ленца

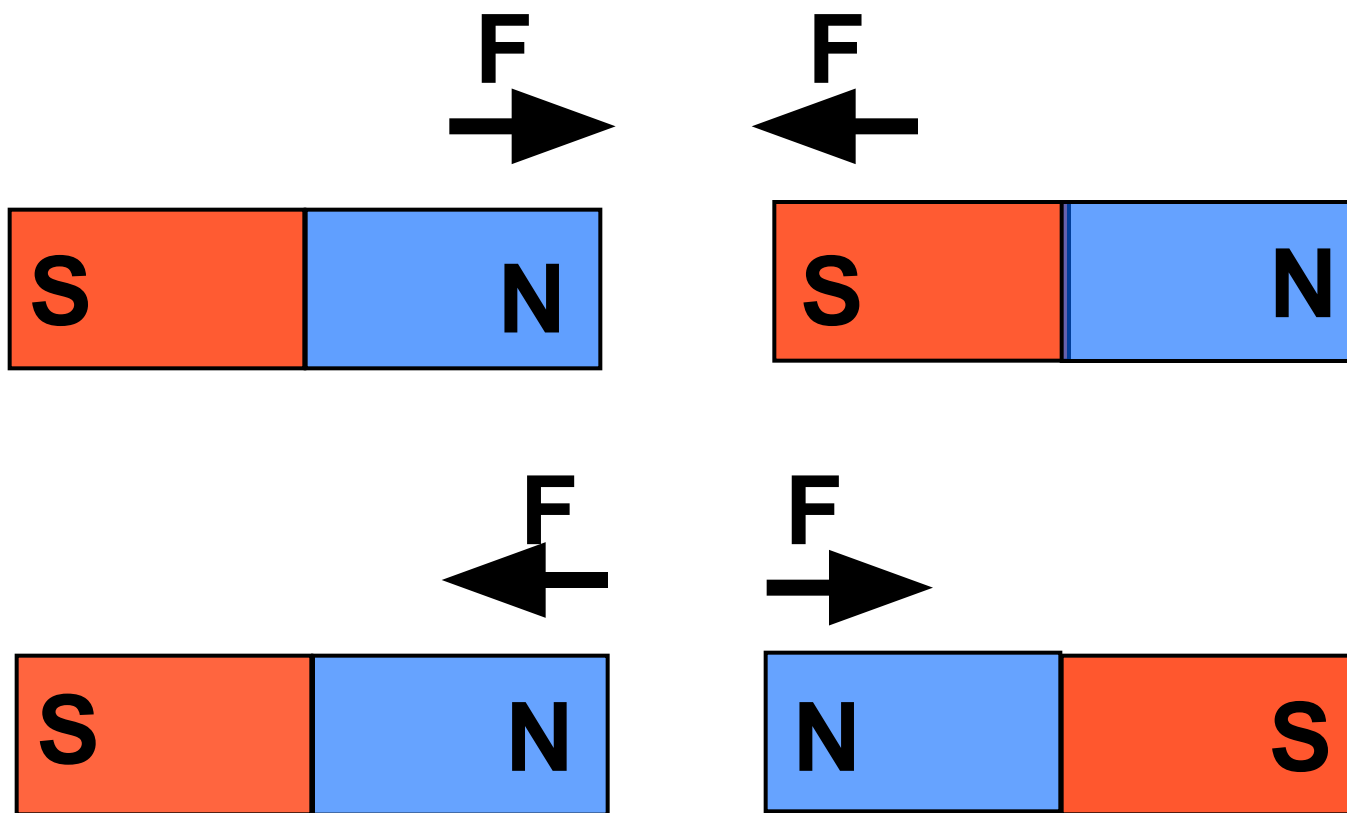
Правило Ленца определяет **направление** индукционного тока.

Опыт с кольцами и магнитом

Силовые линии магн. поля пост. магнита



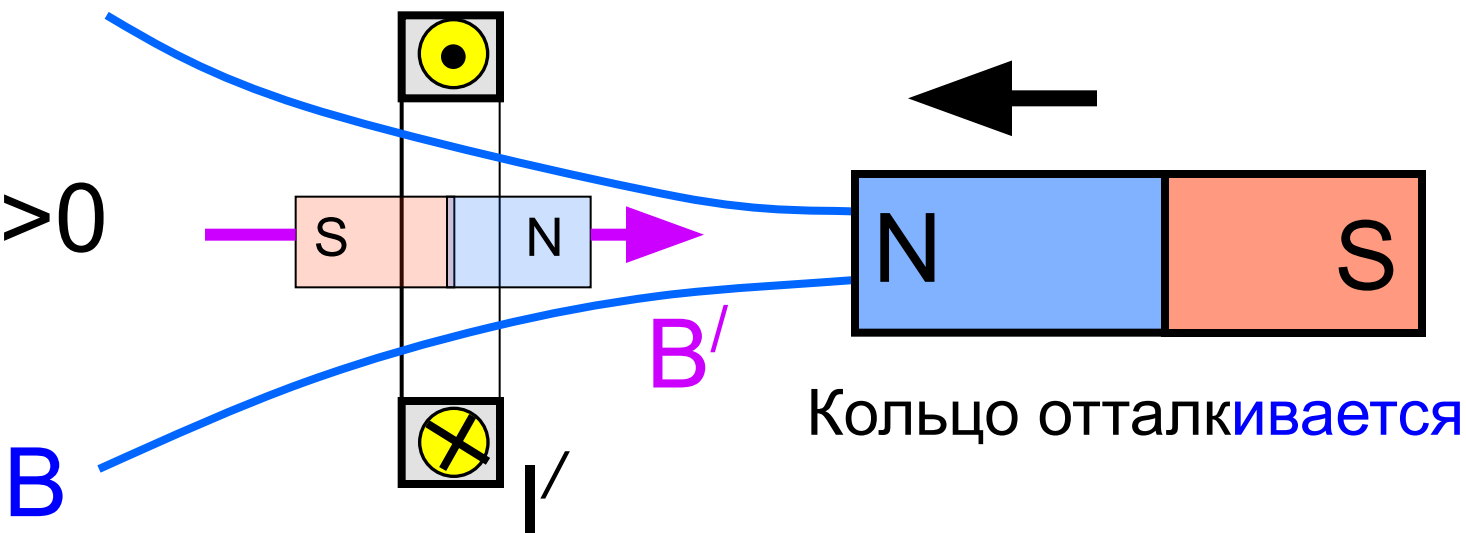
• Взаимодействие постоянных магнитов



$d\Phi/dt > 0$
Объяснение опыта

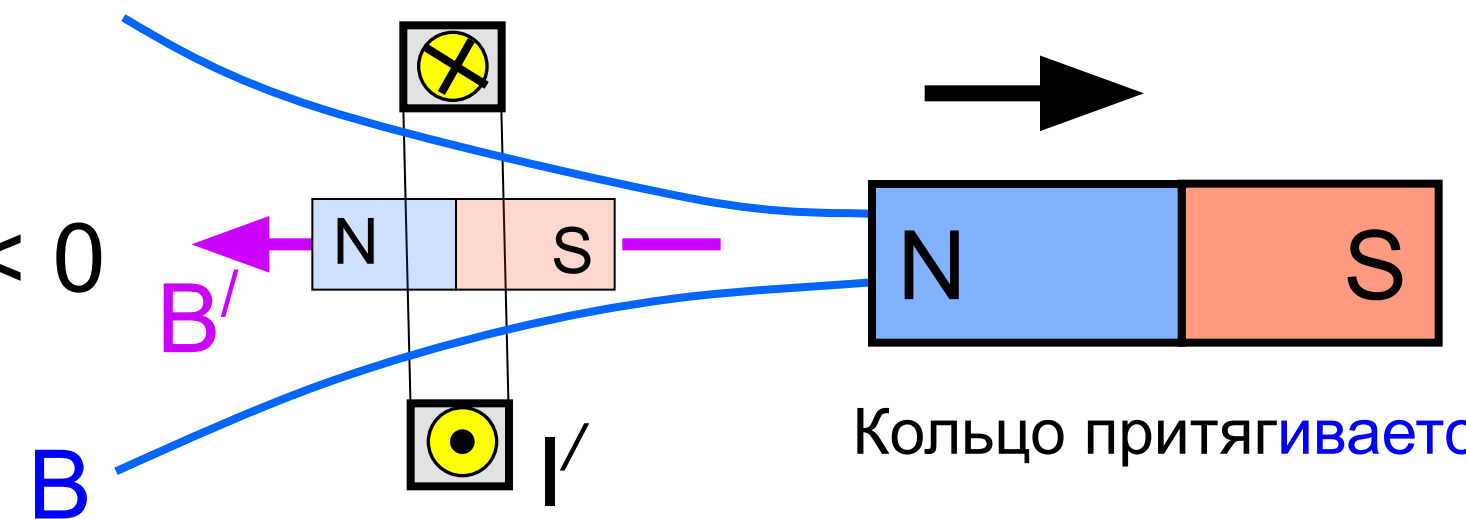
$\Phi = BS$

$d\Phi/dt > 0$



Кольцо отталкивается

$d\Phi/dt < 0$



Кольцо притягивается

Поле B' напр. против изменения поля B .

Индукционный ток в контуре направлен так, что создаваемое им магн. поле препятствует изменению магнитного потока, вызвавшего этот ток.

Правило Ленца

Правило Ленца определит направление индукционного тока через знак «-» в формуле закона Фарадея:

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

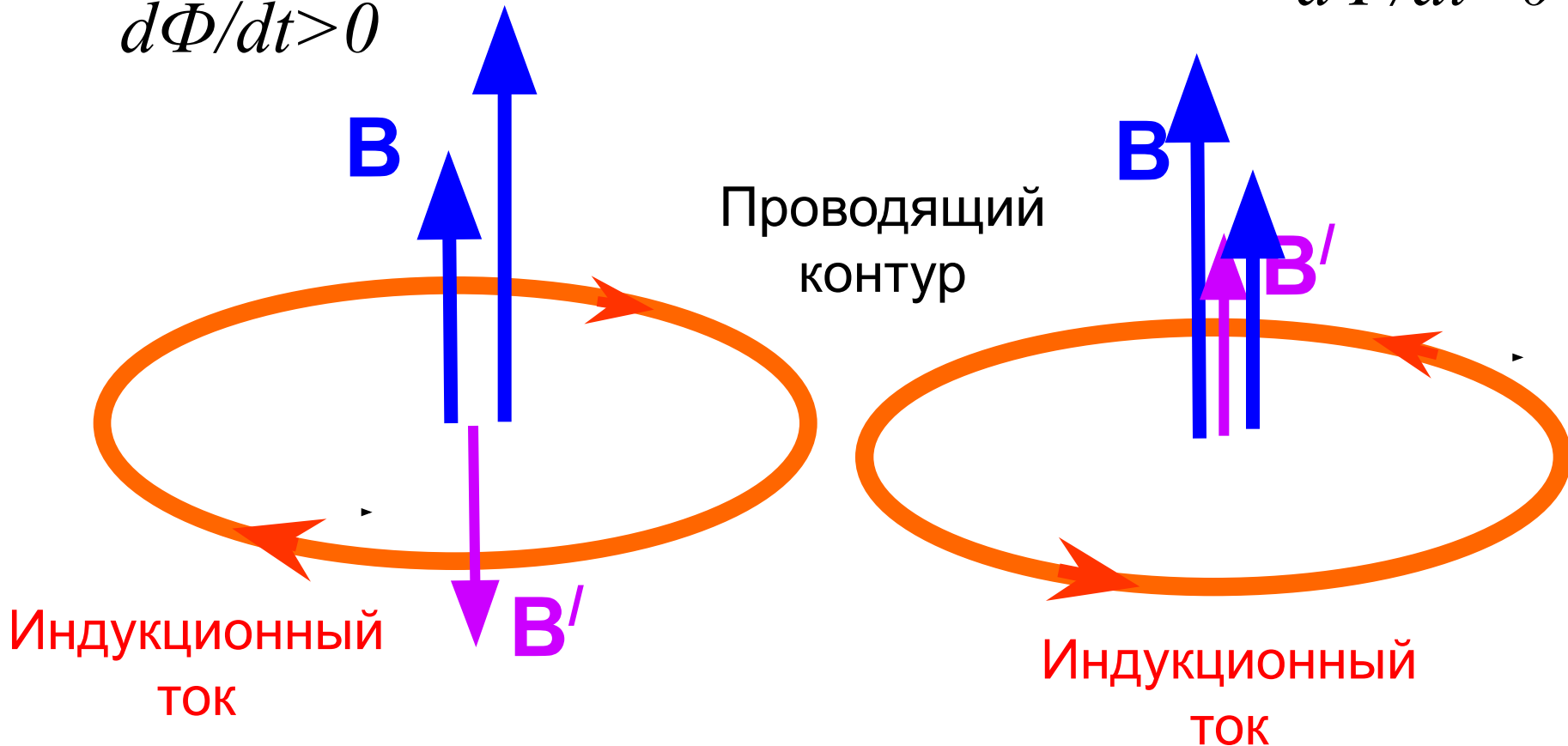
Исполнение правила Ленца

$$\Phi = BS$$

B' - против изменения B

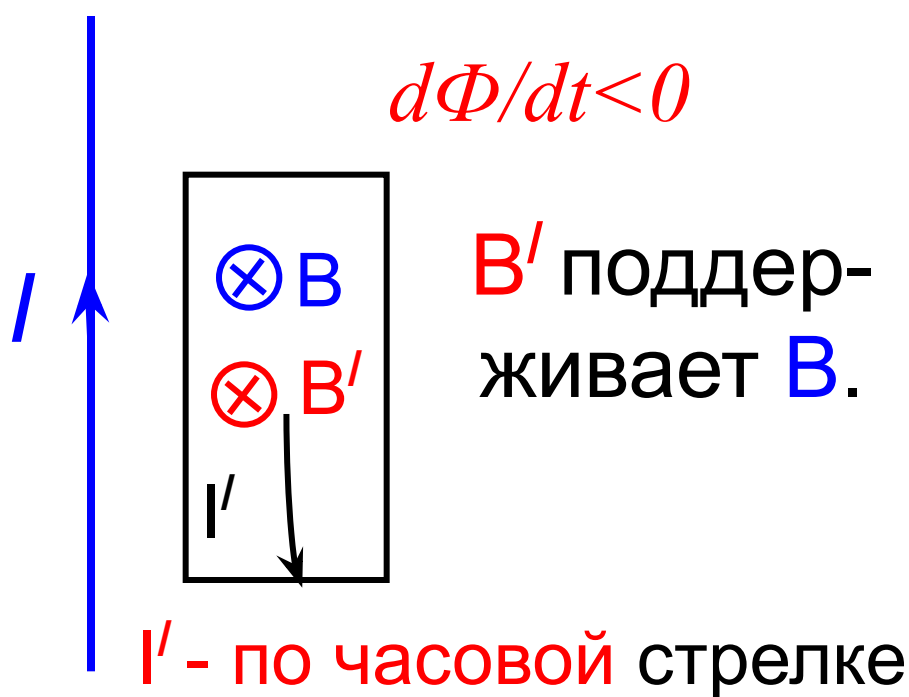
$$d\Phi/dt > 0$$

$$d\Phi/dt < 0$$

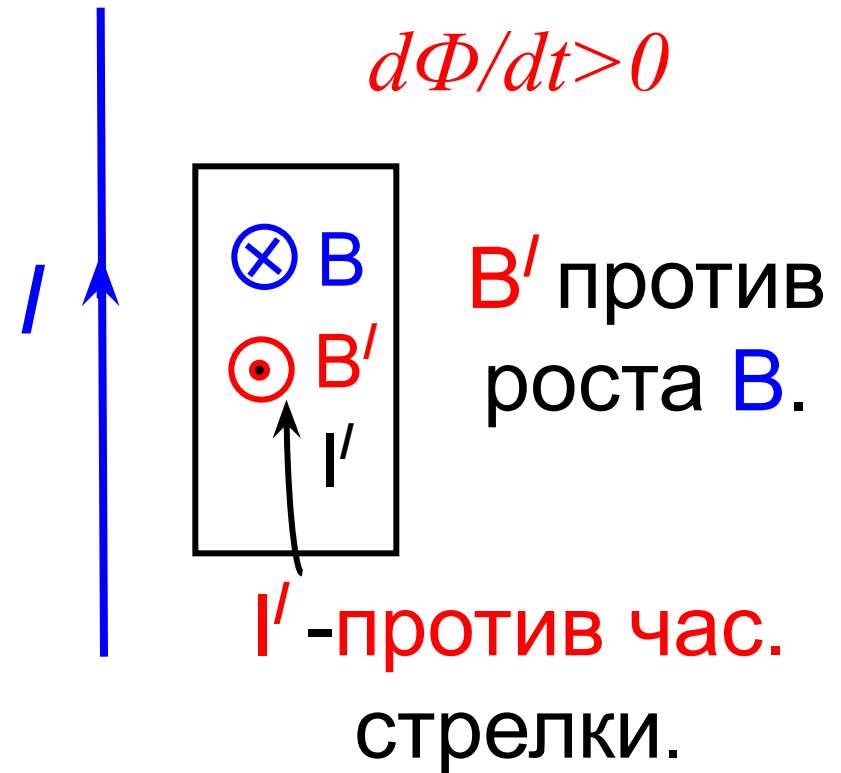


Правило правого винта для B' !

Тест 1. Длинный пр-к с током и провод. контур находится в одной пл-сти. **Опред-** **ть направление индукционного** тока в контуре при **выкл.**, при **вкл.** тока.



Выкл. ТОК



Вкл. ТОК

ЭДС в пр-ке, движущимся в поле B

3. ЭДС Э/М индукции

движущегося в магн. поле пров-ка

Пров-к длиной l движется в однородном магн. поле B со скоростью V . Поле $B \perp V$. Вместе с пр-ком двигаются и свободн. e , на которые действует сила Лоренца F_L .

$$F_L = eVB$$

Под действ. силы F_L эл-ны перемещ-ся и на концах пров-ка появл-ся заряды $\pm q$, которые создают разность потенц. $\Delta\phi$.

Появление $\Delta\phi$ означает:

F_L играет роль **сторонних сил**:

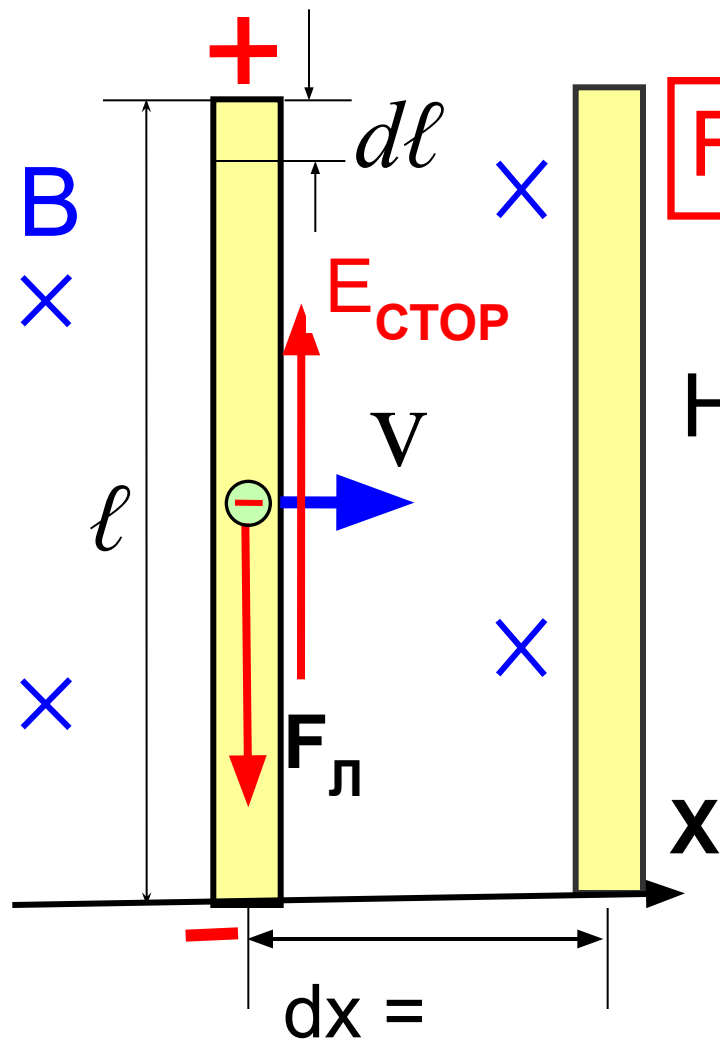
$$F_L = e E_{\text{стор}} \quad \rightarrow$$

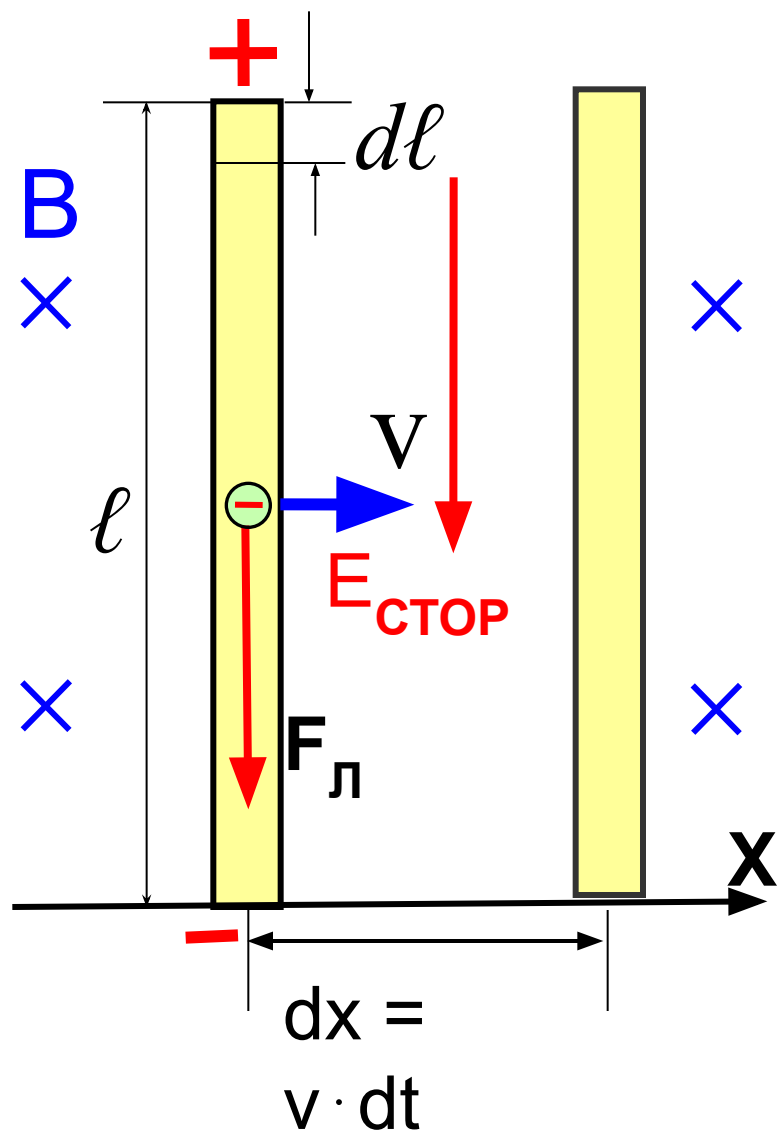
Напряж-сть поля сторон. сил:

$$E_{\text{стор}} = \frac{F_L}{e} = VB.$$

Тогда **ЭДС** э/м индукции \mathcal{E}_i равна циркуляции $E_{\text{стор}}$ в пр-ке длиной ℓ ($\ell \uparrow E_{\text{стор}}$):

$$\mathcal{E}_i = \int_0^{\ell} E_{\text{стор}} dx =$$





$$\varepsilon_i = BV \boxtimes \left. \begin{array}{l} \text{Скорость: } V = dx/dt \end{array} \right\} \rightarrow$$

$$\varepsilon_i = B \frac{\boxtimes dx}{dt} = \overset{dS}{\quad}$$

С учетом знака:

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

Закон Фарадея

ЭДС э/м индукции в движущемся пр-ке равна скорости изменения магн. потока, пересекаемого пр-ком.

Появление ЭДС в движущемся в магн. поле пр-ке обусловлено силой Лоренца.

Если движ-ся в магн. поле пр-к замкнуть, то по замкнутому контуру потечёт эл. ток, называемый индукционным.

4. Вихревое электр. поле

Опыт с кольцом и лампочкой

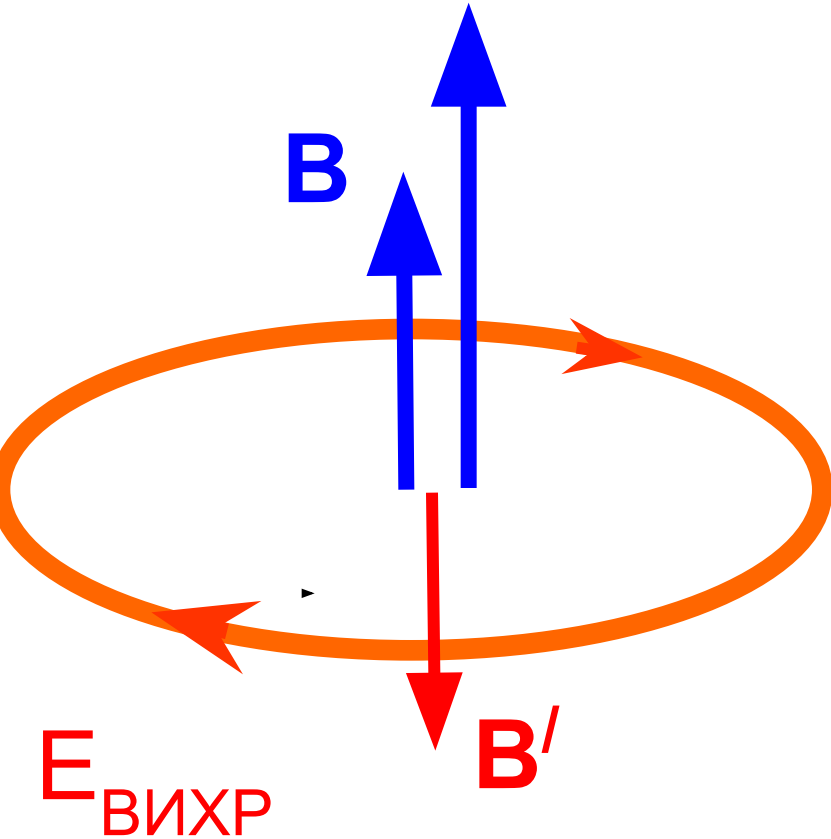
Контур неподвижный. Почему в нем возникает ЭДС, а значит и ток?

Дж. Максвелл выдвинул гипотезу:

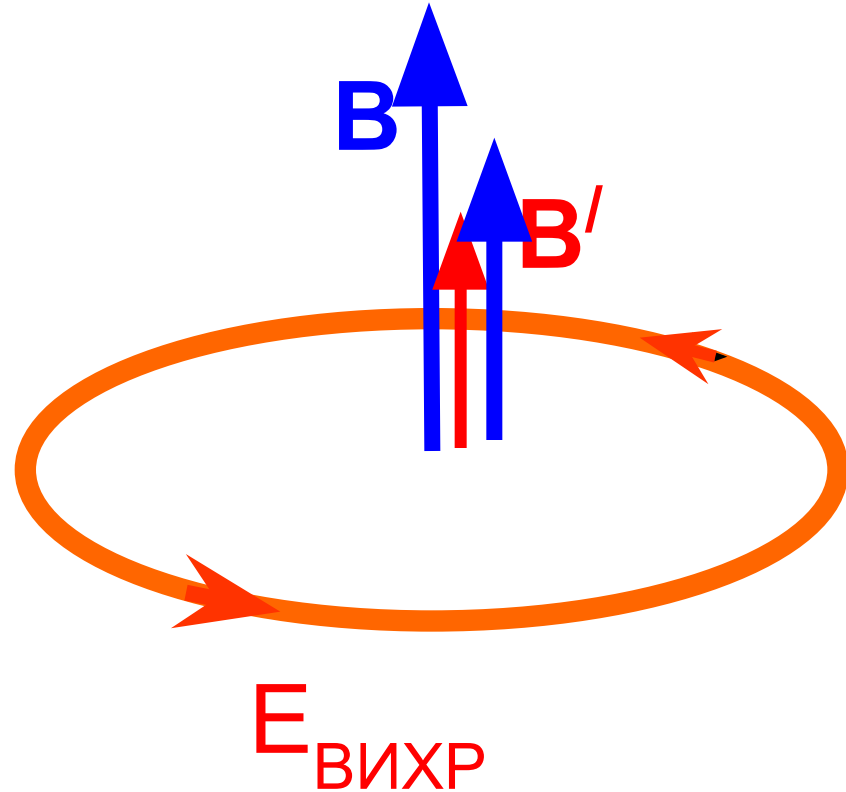
Магн. поле, **изменяясь во времени**, порождает в окружающем пр-ве **вихревое электрическое поле** $E_{\text{ВИХР}}$, которое имеет **замкнутые** силовые линии. Если в поле $E_{\text{ВИХР}}$ поместить **замкнутый** пр-к, по нему потечет ток.

Вихревое эл. поле

$$d\Phi/dt > 0$$



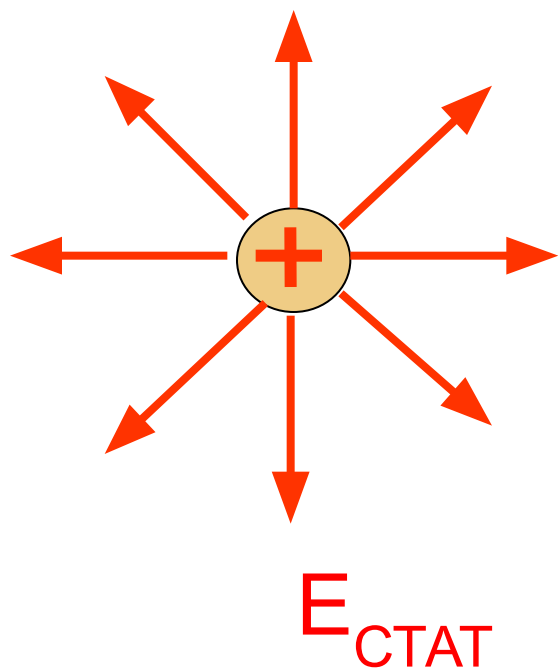
$$d\Phi/dt < 0$$



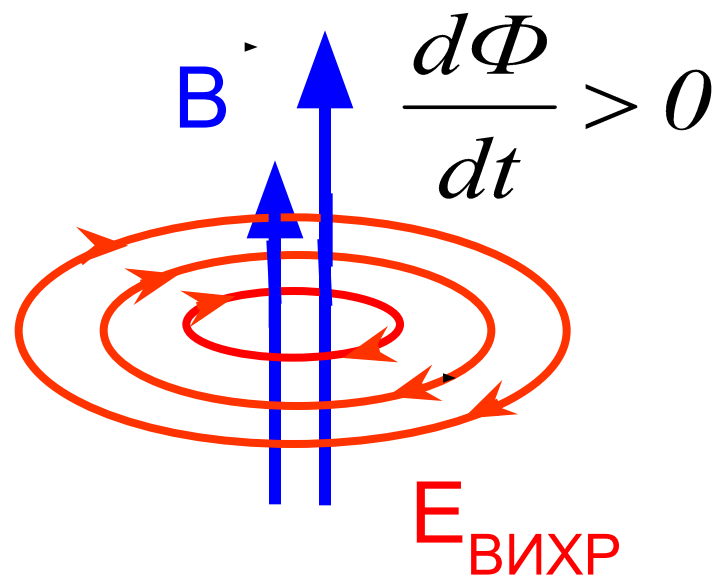
Направление $E_{\text{вихр}}$ опред. правилом Ленца

Правило правого винта для B' !

Сравнение вихревого и статического электр. полей.



Статическое
электр. поле

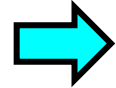


Вихревое эл. поле

Если в область **вихревого** эл. поля поместить замкн. пр-к, то под действием

$$F_k = eE_{\text{ВИХР}}$$

e перемещаются, по пр-ку течет **ИНДУКЦИОННЫЙ** эл. ток.



$E_{\text{ВИХР}}$ является полем **СТОРОННИХ** сил.

Направление индукц. тока опред-ся **правилом** Ленца.

Поскольку $\mathbf{E}_{\text{ВИХР}}$ является полем сторон. сил, то оно создает в пр-ке ЭДС индукции:

$$\mathcal{E}_i = \oint_L \mathbf{E}_{\text{ВИХР}} \cdot d\mathbf{l}.$$

По Фарадею циркуляция вектора $\mathbf{E}_{\text{ВИХР}}$ по замкнутому контуру L :

$$\mathcal{E}_i = \oint_L \mathbf{E}_{\text{ВИХР}} \cdot d\mathbf{l} = - \frac{d\Phi}{dt}.$$

ЭДС индукции равна скорости изменения магн. потока сквозь поверхность, ограниченную замкнутым контуром

Это более общая форм-ка **закона Фарадея**.

Если катушка содержит не один, а N витков, то ЭДС индукции катушки равна сумме ЭДС от каждого витка:

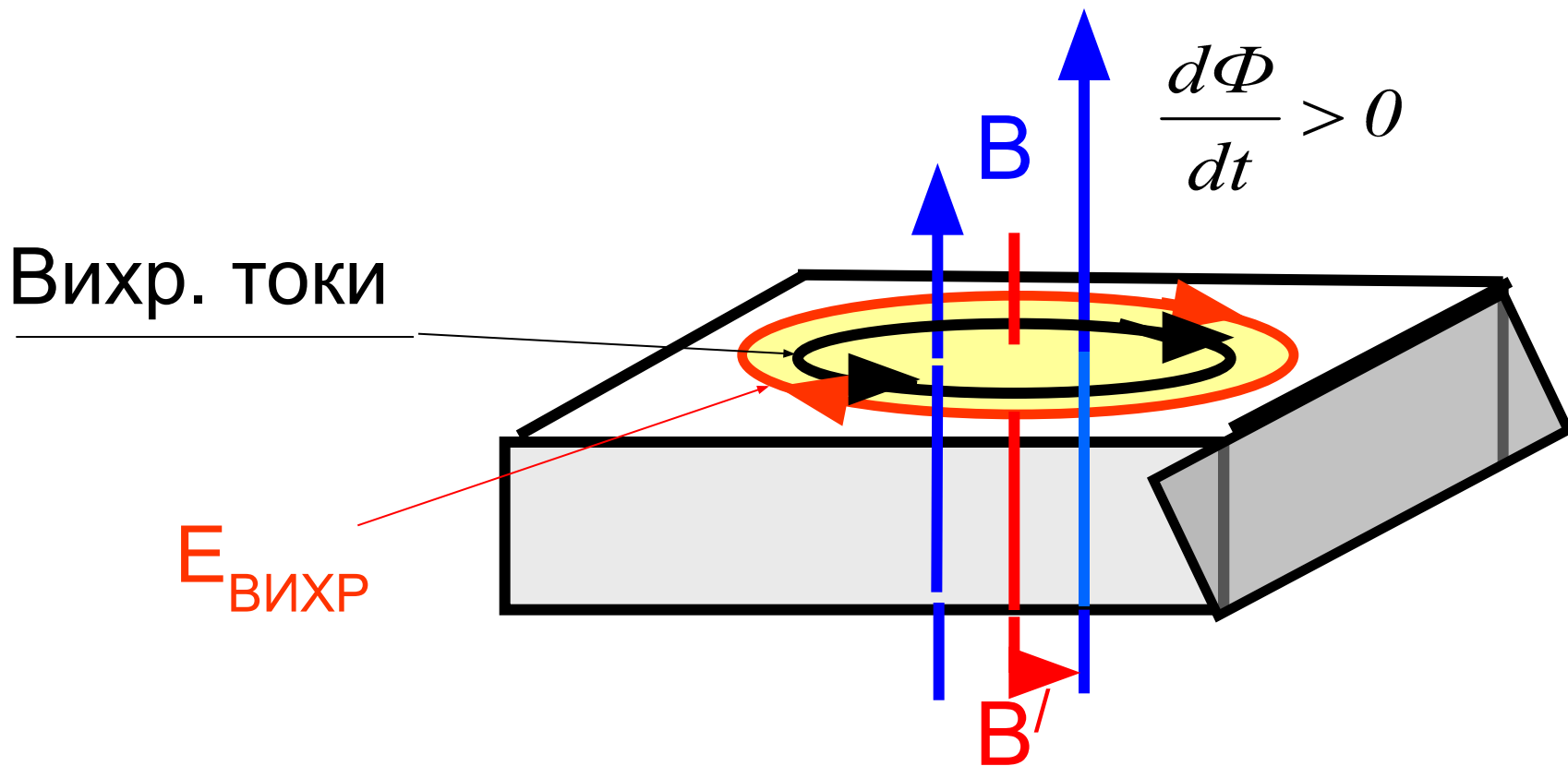
$$\varepsilon_i = -N \frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d\Psi}{dt}$$

Здесь $d\Psi = Nd\Phi$ – потокосцепление, т.е. суммарный магн. поток сквозь N витков.

5. Вихревые токи (токи Фуко)

Если массивный пр-к поместить в переменное магн. поле, то в нем возникает **вихревое** эл. поле $E_{\text{ВИХР}}$, которое вызывает в пр-ке **вихревые токи**.

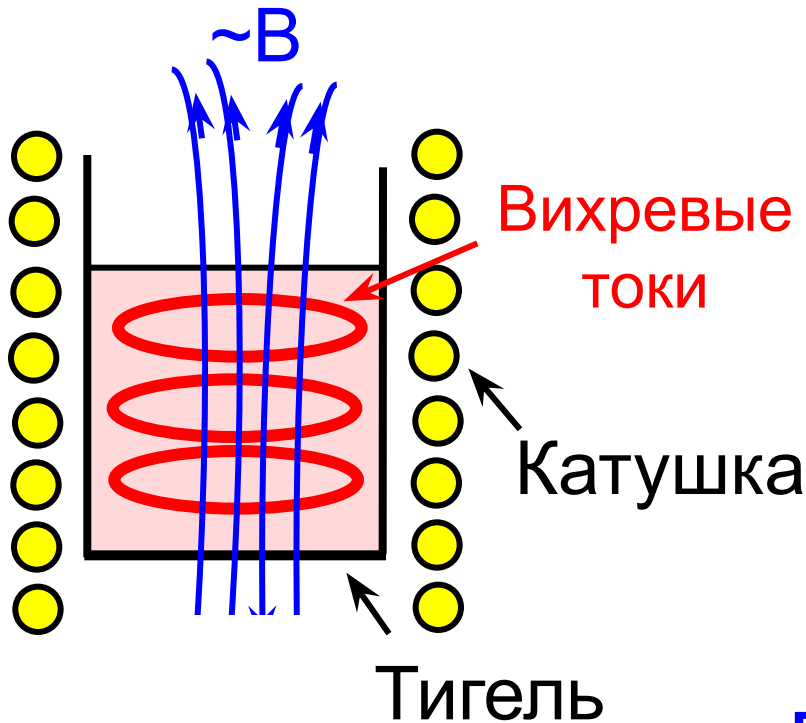
Схема возникновения вихревых токов



Опыт с кольцами, эл. плавка

R пр-ков **мало**, поэтому вихр. токи могут быть **значительными**.

Вихр. токи **высокой частоты** используют в печах для плавки металлов.



В катушке с током высокой частоты созд-ся перем. магн. поле $\sim B$. Оно вызывает вихр. токи, которые плавят металл.

Сплавы – высококачественные!

Вредные токи Фуко

В трансформаторах, эл-двигателях переменного тока для усиления магн. полей используют железные сердечники.

Для исключения потерь, связанных с вихревыми токами, сердечники делают наборными из тонких изолированных пластин.

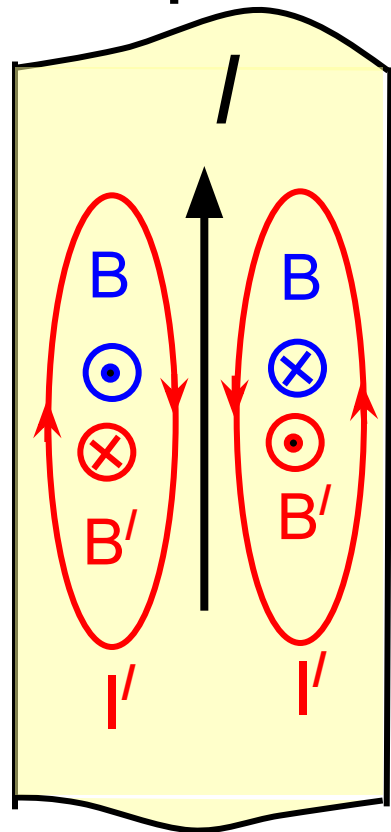
Вихревые токи возникают и в проводах, по которым течет перемен. эл. ток. В результате плотность тока по сечению провода перераспредел-ся.

$$dI/dt > 0$$
$$dB/dt > 0$$

Токи в центре провода вычитаются, у поверхности – складываются.

В результате перемен. ток вытесняется на поверхность провода (Скин-эффект).

Для высоких частот провода делают многожильными!



Ток возрастает

Лекция 15. Самоиндукция

- Индуктивность катушек,
- Явление самоиндукции,
- Экстратоки при разм. и замык-ии цепи,
- Взаимная индукция,
- Трансформаторы,
- Энергия магн. поля.

Т.И. Трофимова, Курс физики, 1988 г
§ 126 - 130, стр. 228 -235

1. Индуктивность катушки.

Индукция магн. поля B в **длинной** катушке:

$$B = \mu_0 \mu \frac{N}{\ell} I.$$

μ - магн. проницаемость

среды, I - ток, N - число

витков, ℓ - длина катушки.

Магн. поток через **1** виток катушки:

$$\Phi = BS = \mu_0 \mu S \frac{N}{\ell} I.$$

Магн. поток через N витков -

потокосцепление Ψ :

$$\Psi = N\Phi = \mu_0 \mu \frac{N^2 S}{\ell} I.$$

$$\Psi = N\Phi = \mu_0 \mu \frac{N^2 S}{l} I.$$

$$L = \frac{\mu_0 \mu N^2 S}{l}$$

Индуктивность
катушки

Размерность L : [Гн] (Генри).

Индуктивность L катушек определ-ся размерами, числом витков, μ сердеч-ка

Зная L , легко найти Ψ катушки:

$$\Psi = L \cdot I$$

Размерность Ψ : [Вб] (Вебер).

Особенно велика L катушек с железным сердечником, т.к. $\mu \approx 10^3 - 10^4$.

2. Явление самоиндукции.

Напоминание. Если в катушке измен-ся магн. поток, то в ней возникает **вихревое** эл. поле $E_{\text{ВИХР}}$, которое вызывает **ЭДС** эл.-магн. индукции:

$$\varepsilon_i = \oint_L \vec{E}_{\text{ВИХР}} d\vec{l} = - \frac{d\Psi}{dt}$$

Здесь $d\Psi = Nd\Phi$ – изменение **потокосцепления**, т.е. суммарного магн. потока сквозь **N** витков.

Если изменить ток в катушке, то изменится и Ψ магн. поток, сцепленный с катушкой.

При этом в катушке возникает **вихревое** поле $E_{\text{ВИХР}}$, которое, индуцирует в витках катушки **ЭДС самоиндукции** ε_S .

$$\varepsilon_S = \oint_L \mathbf{E}_{\text{ВИХР}} \cdot d\mathbf{l} = -\frac{d\Psi}{dt} \quad \left. \begin{array}{l} \\ \Psi = L \cdot I \end{array} \right\} \rightarrow \boxed{\varepsilon_S = -L \frac{dI}{dt}}$$

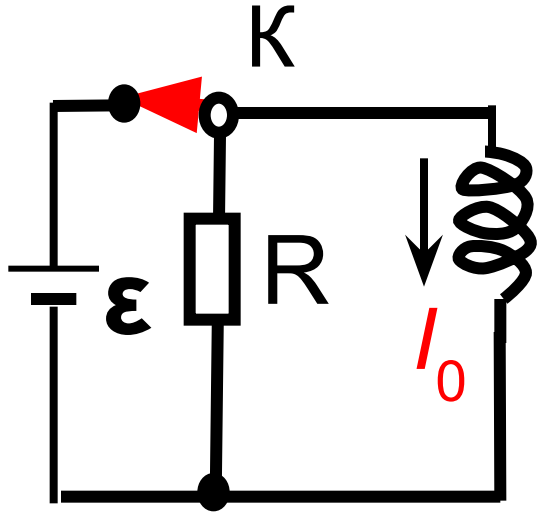
$$\varepsilon_s = -L \frac{dI}{dt}$$

ЭДС самоиндукции.

ЭДС, возникающая в проводящем замкнутом контуре при изменении в нём силы тока, есть ЭДС самоиндукции.

Знак «-» обусловлен правилом Ленца и показывает, что ток самоиндукции **направлен против изменения тока** в контуре.

3. Экстратоки при размыкании цепи с L.



Эл. цепь содержит L , R , ϵ .

При **Вкл** K через L течет I_0 .

При **Выкл** K ток через L

уменьш-ся, возникает ϵ_S ,

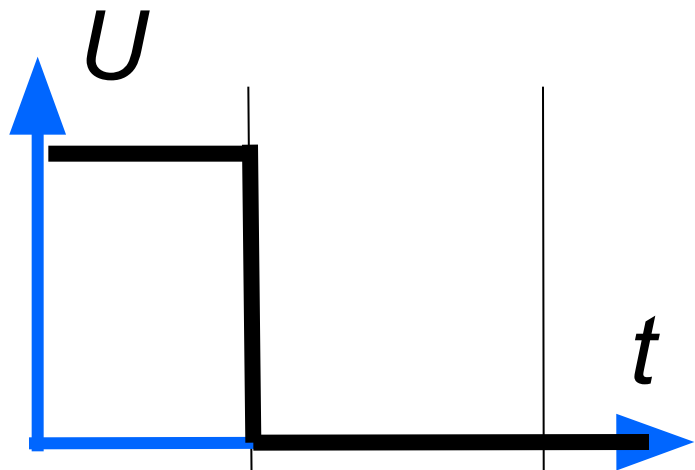
препятствует измен-ю тока, который при этом медленно уменьш-ся по закону:

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

Ток при размыкании цепи убывает по экспоненте: чем больше L , тем больше t спада

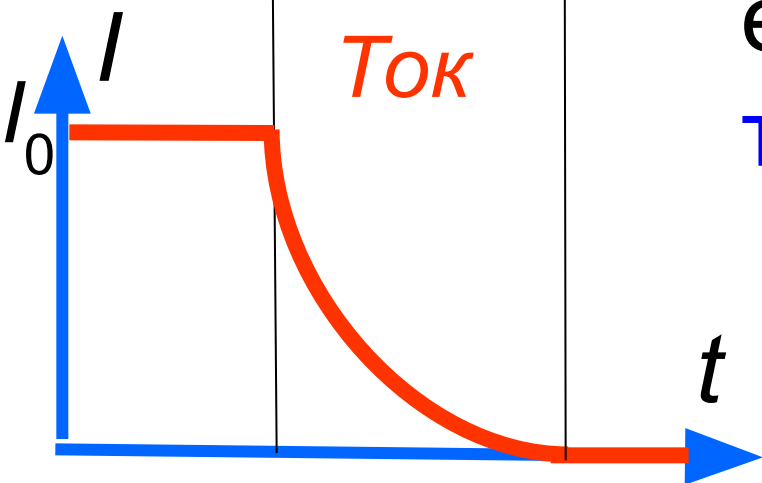
Вывод формулы – §127 учебник (Трофимова)

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



При выкл. U ток в цепи, содержащей L , уменьшается не мгновенно, а постепенно, по экспоненте.

Ток



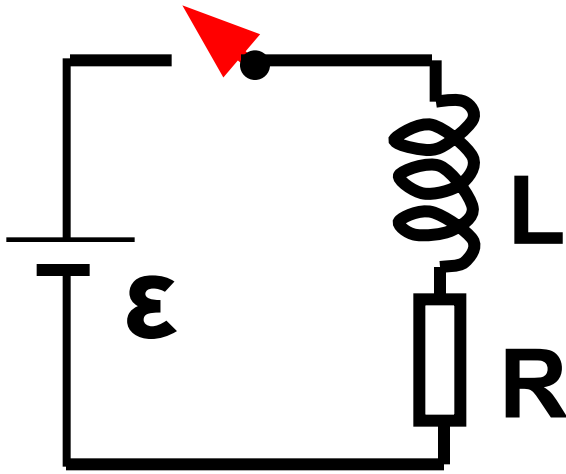
$\tau = L/R$ - время релаксации,

в течение которого сила тока уменьш-ся в e раз.

При резком выкл. цепи с большой L ЭДС самоиндукции $\epsilon_S \gg \epsilon$, что опасно, возможен пробой изоляции потребителей! Опыт

Токи при замыкании

4. Экстратоки при замыкании цепи с L.



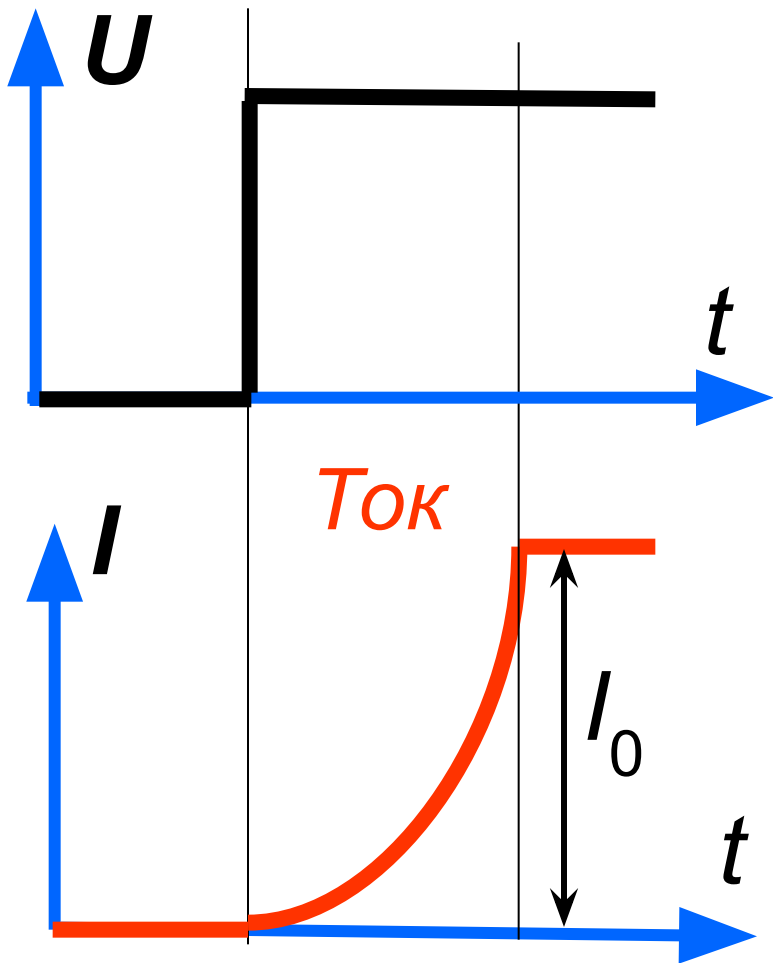
Эл. цепь содержит L , R , ε .
При замыкании цепи кроме ε возникает ε_S , препятствующая возрастанию тока.

При этом ток возрастает по закону:

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

где $I_0 = \varepsilon/R$ – установившееся значение тока.

Вывод формулы – §127 (Трофимова)



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

При вкл. **U** ток в цепи, с **L**, устанав-ся **не мгнов-венно**, а **постепенно**

Из фор-лы: время нарастания тока **t**

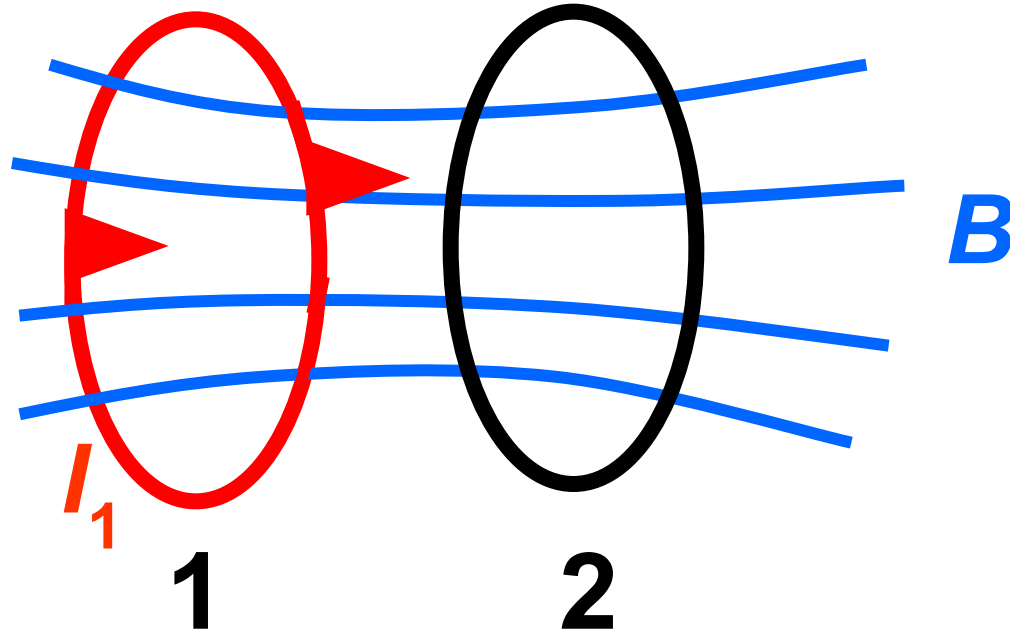
опред-ся отношением **R/L**, чем больше **L**, тем больше **t**.

5. Взаимная индукция

Опыт

Взаимная индукция - явление возникновения ЭДС в одном из контуров при изменении силы тока в другом, расположенном вблизи, контуре.

Имеем два близко расположенных контура



По контуру 1 течет ток I_1 , тогда контур 2 пронизывает поток $\Phi_{21} = L_{21} \cdot I_1$.

Здесь L_{21} - **взаимная индуктивность контуров.**

Если в контуре **1** изменить ток I_1 , в контуре **2** наводится ЭДС:

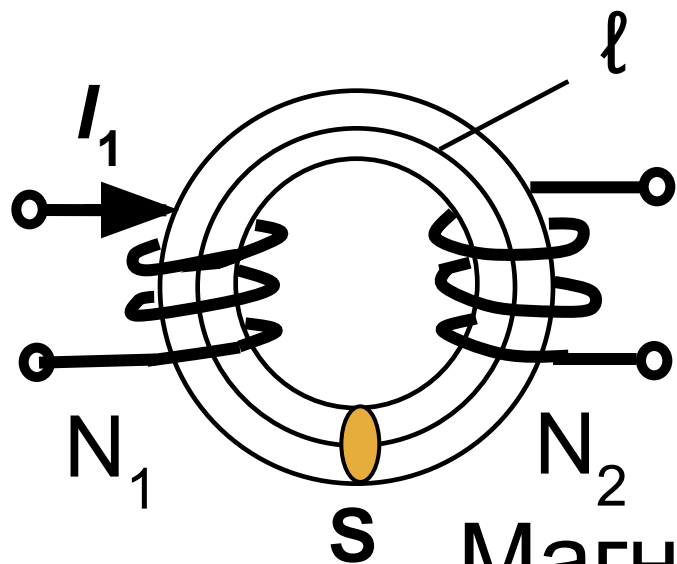
$$\varepsilon_{i2} = -\frac{d\Phi_{21}}{dt} = -L_{21} \frac{dI_1}{dt}$$

Если в контуре **2** изменить ток I_2 , в контуре **1** наводится ЭДС: $\varepsilon_{i1} = -L_{12} \frac{dI_2}{dt}$

Опыт показал: $L_{12} = L_{21}$.

Взаимная индуктивность контуров.

Найдем L_{12} для 2-х катушек, намотанных на тороидальный сердечник.



B от 1-ой обмотки:

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

l - длина средн. линии тор-а

Магн. поток сквозь **1 виток** 2-ой обмотки: $\Phi_2 = BS = \frac{\mu_0 \mu N_1 I_1 S}{\boxtimes}$.

Потокоцепление сквозь **ВСЮ** 2-ую обмотку:

$$\Psi_2 = \Phi_2 N_2 = \frac{\mu_0 \mu N_1 N_2 I_1 S}{\boxtimes} \cdot \rightarrow L_{21}$$

$$L_{21} = \frac{\Psi_2}{I_1} =$$



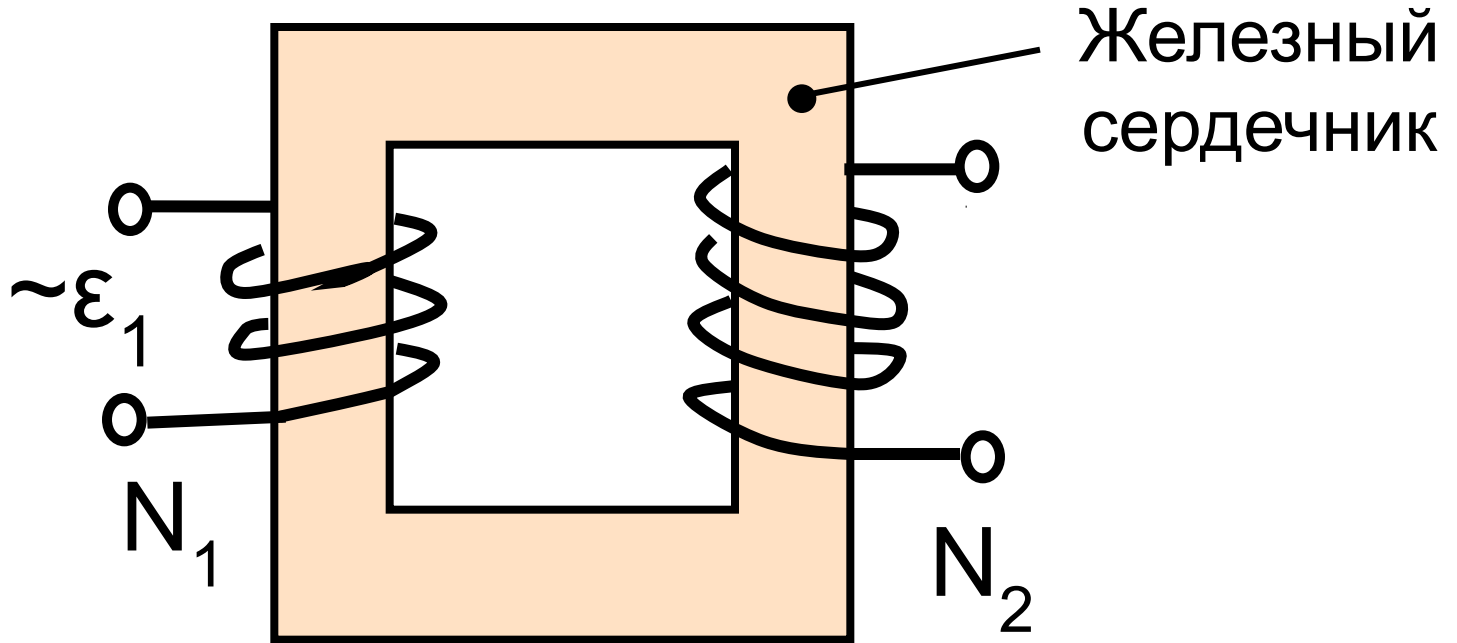
$$L_{21} = L_{12} = \frac{\mu_0 \mu N_1 N_2 S}{\boxtimes}$$

$$L_{21} = L_{12} = \frac{\mu_0 \mu N_1 N_2 S}{\square} \quad [\text{Гн}]$$

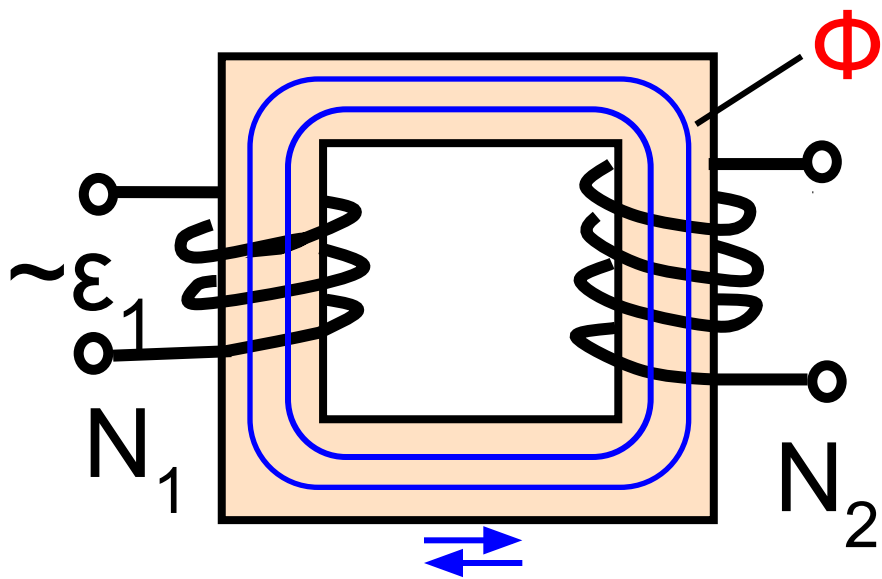
Взаимная индуктивность катушек.

На явлении взаимной индукции основана работа трансформатора переменного тока.

7. Трансформатор



N_1 и N_2 – число витков первичной и вторичной обмоток. Первичная обмотка соединена к источнику **перем. тока** с $\sim \varepsilon_1$.



Перем. ток I_1 первичной обмотки создает в сердечнике перем. магн. поток Φ .

Поток Φ локализован в железном сердечнике и пронизывает витки вторичной обмотки.

Изменение магн. потока $d\Phi/dt$ вызывает во вторичной обмотке ЭДС взаимной индукции ε_2 , а в первичной – ЭДС самоиндукции ε_S .

Закон Ома для первичной обмотки:

$$\varepsilon_1 + \varepsilon_s = I_1 R_1 \quad \text{или} \quad \varepsilon_1 - \frac{d}{dt}(N_1 \Phi) = I_1 R_1$$

где R_1 – сопротивление первичной обмотки.

Обычно R_1 мало (≈ 0). Тогда:

Ток холостого хода ($I_1 \approx 0$)

$$\varepsilon_1 \approx N_1 \frac{d\Phi}{dt} \approx -\varepsilon_s \quad \text{тр-ра мал, т.к. } \boxed{\varepsilon_1 \approx -\varepsilon_s}$$

и наход-ся в противофазе.

ЭДС взаимной индукции во втор. обмотке:

$$\varepsilon_2 = -\frac{d(N_2 \Phi)}{dt} = -N_2 \frac{d\Phi}{dt}$$

Сравним ε_1 и ε_2

Из сравнивая ЭДС ε_1 и ε_2 :

$$\varepsilon_2 = -\frac{N_2}{N_1} \varepsilon_1$$

Знак «-» показывает, что ЭДС в первичной и вторичной обмотках противоположны по фазе.

Отношение N_2/N_1 – коэффициент трансформации тр-ра.

Если $N_2 > N_1$, тр-р повышающий.

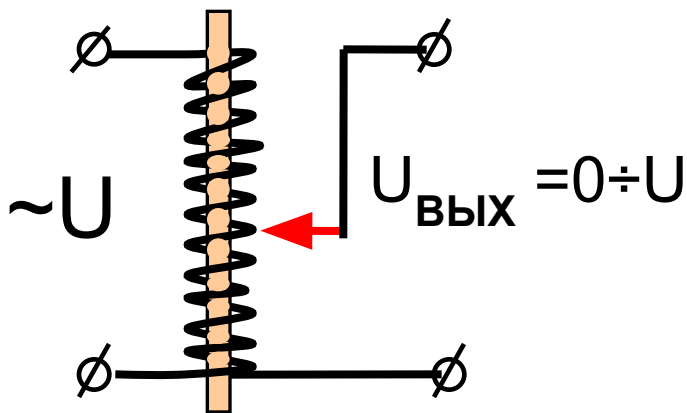
Если $N_2 < N_1$, то - понижающий.

Потери энергии в тр-рах малы ($\approx 2\%$), мощность тока в обмотках **практически** одинакова: $\varepsilon_2 I_2 \approx \varepsilon_1 I_1$.

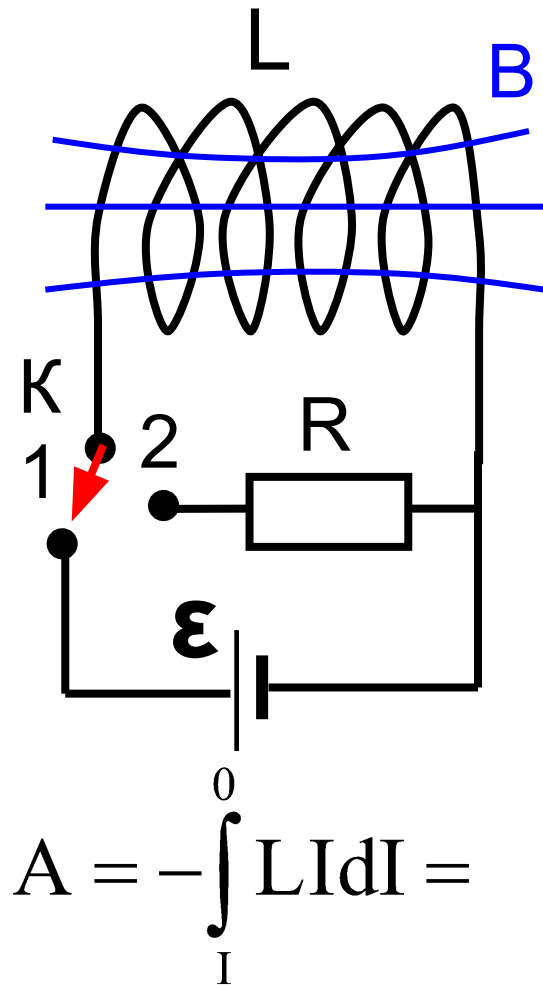
Поэтому понижающая обмотка тр-ра намотана более толстым проводом, т.к. по ней течет ток большой силы.

Разновидность тр-ра – **автотрансформатор**.

В автотр-ре 1 обмотка и **ПОДВИЖНЫЙ КОНТАКТ** к виткам. Перемещая подв. **КОНТАКТ**, можно снимать напряжение от **0** до **U**.



8. Энергия магнитного поля



В При $K1$ ток I создает в L поле B , энергия которого W .

При $K2$ за счет ЭДС самоиндукции через R течет убыв. ток.

$$dA = \varepsilon_s I dt$$

$$dA = -L I dI; \quad \varepsilon_s = -L \frac{dI}{dt}$$

$$A = -\int_I^0 L I dI =$$

. Работа за счет энергии поля B

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

Энергия магн. поля в катушке L .

Найдем W через магн. харак-ки.

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

Для катушки:

$$B = \frac{\mu_0 \mu IN}{\ell} \Rightarrow I = \frac{B \ell}{\mu_0 \mu N}$$

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

$$L = \frac{\mu_0 \mu N^2 S}{\ell}$$

$$I = \frac{B \ell}{\mu_0 \mu N}$$

$$W = \frac{\cancel{\mu_0 \mu N^2 S}}{\cancel{\ell}} \cdot \frac{B^2 \cancel{\ell^2}}{2(\mu_0 \mu)^2 \cancel{N^2}} = \dots$$

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

Энергия магн.
поля в объеме V .

Введем: $\omega = \frac{W}{V}$ - **объемная плотность энергии**

С учетом:

$$B = \mu_0 \mu H$$

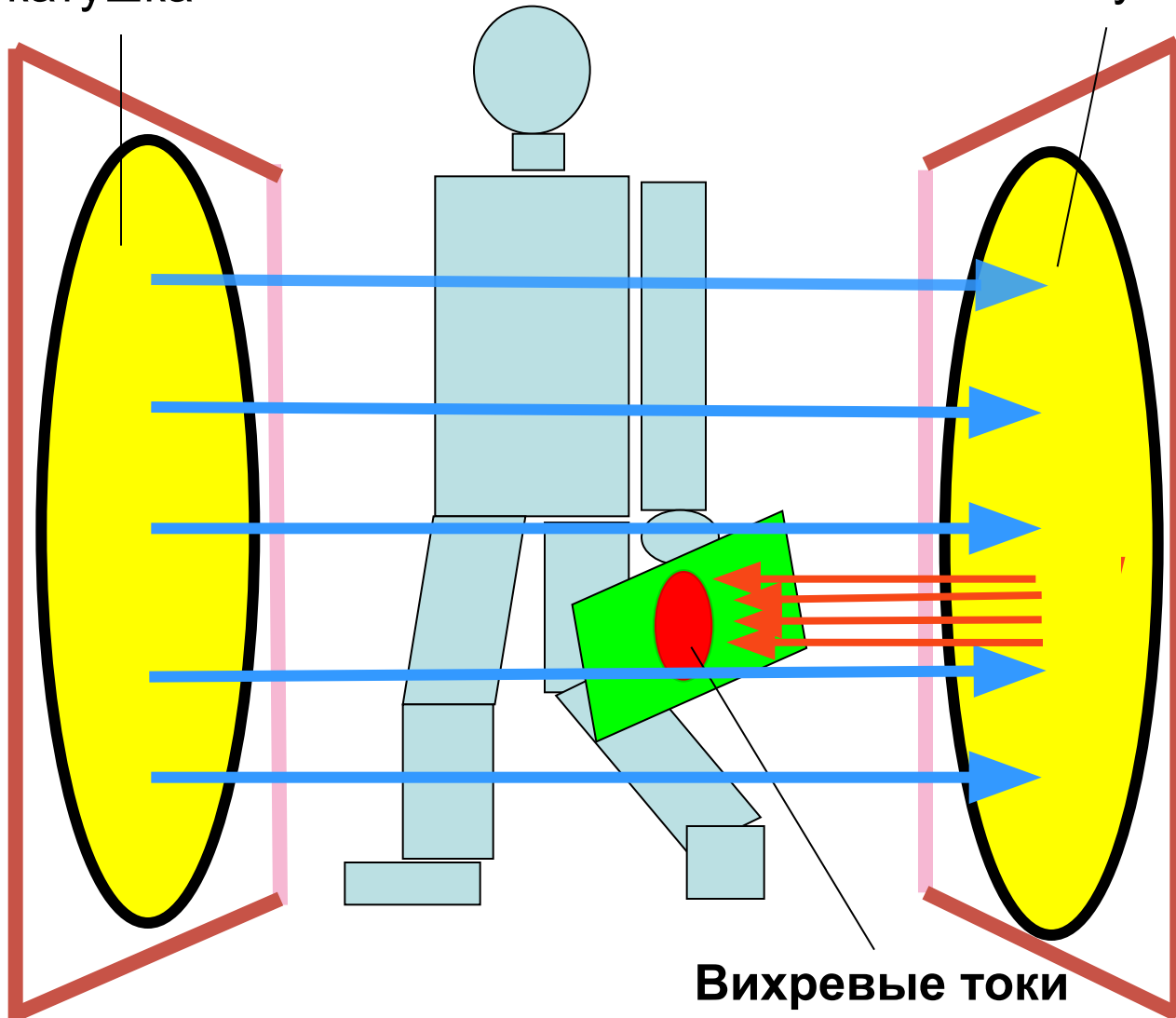
$$\omega = \frac{B^2}{2\mu_0 \mu} = \frac{BH}{2} = \frac{\mu_0 \mu H^2}{2}$$

**магн.
поля.**

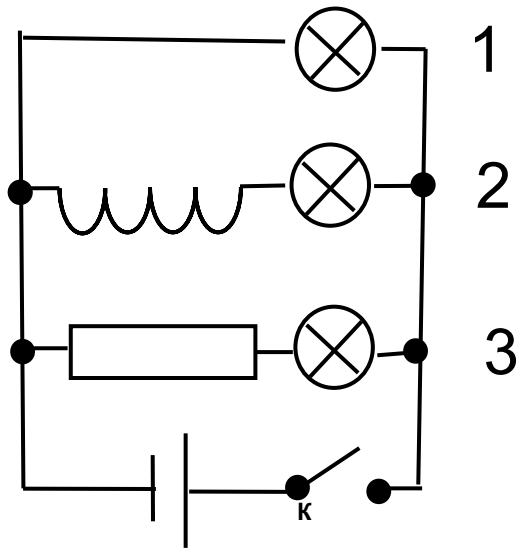
Металлоискатель

Возбуждающая
катушка

Приемная
катушка



Тест 1. Эл. схема, составлена из источника тока, резистора, катушки и трех ламп. После замыкания ключа позже всех загорится лампа номер?



Тест 2. Сила тока, протекающего по катушке с индуктивностью 0,5 Гн, изменяется по закону $I = 2 - 4t$ (А). ЭДС самоиндукции, наведенная на концах катушки, равна -?...

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