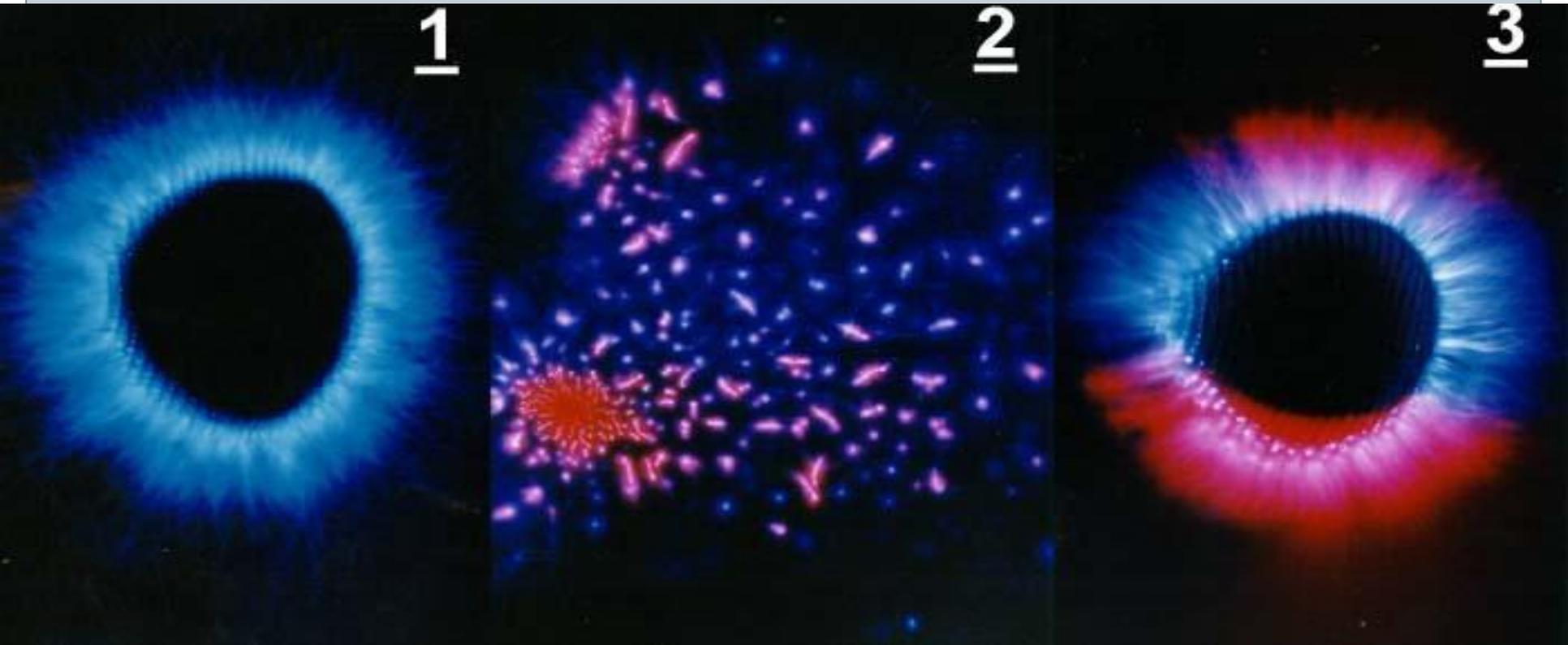


ЯВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ



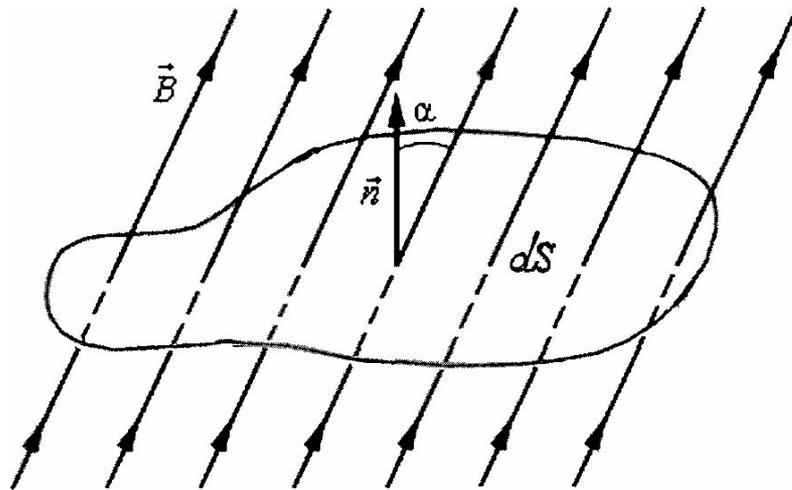


- 1- поле пальца оператора до прикосновения к фиалке.
- 2-поле фиалки после посылки сигнала «я тебя сорву».
- 3- поле пальца оператора после реакции фиалки на сигнал.

Магнитный поток

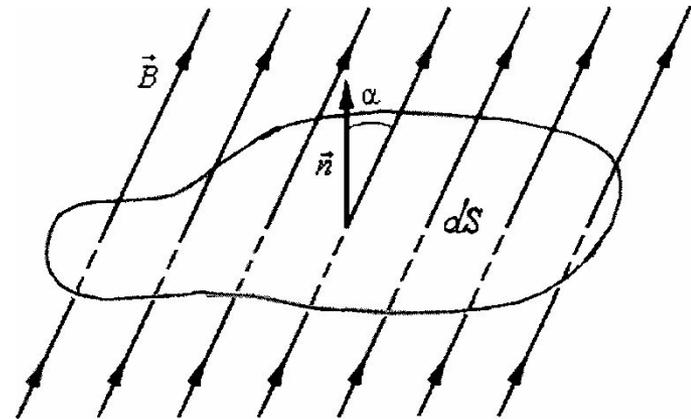


Магнитный поток $d\Phi$ через элементарную площадку dS определяется скалярным произведением $d\Phi = (\vec{B}, d\vec{S})$, где $d\vec{S} = dS \cdot \vec{n}$.



Способы изменения магнитного потока:

- изменение вектора магнитной индукции;
- изменение площади, ограниченной контуром;
- изменение ориентации контура по отношению к силовым линиям поля, т.е. изменение угла между векторами \vec{B} и $d\vec{S}$.



ЯВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ

Открыто в 1831г. Фарадеем.

В замкнутом проводящем контуре при изменении магнитного потока, охватываемого ЭТИМ контуром, возникает электрический ток, названный индукционным.

Возникновение электрического тока означает, что в контуре возникает э.д.с. индукции.

Э.д.с. индукции \mathcal{E}_i не зависит от способа изменения магнитного потока, а определяется лишь скоростью его изменения.

Правило Ленца



Направление индукционного тока, а, следовательно, и знак \mathcal{E}_i определяется правилом Ленца:

- **индукционный ток всегда направлен так, чтобы противодействовать причине, его вызывающей.**

Правило Ленца выражает существенный физический факт - стремление системы противодействовать изменению её состояния (электромагнитная индукция).

Закон электромагнитной индукции


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

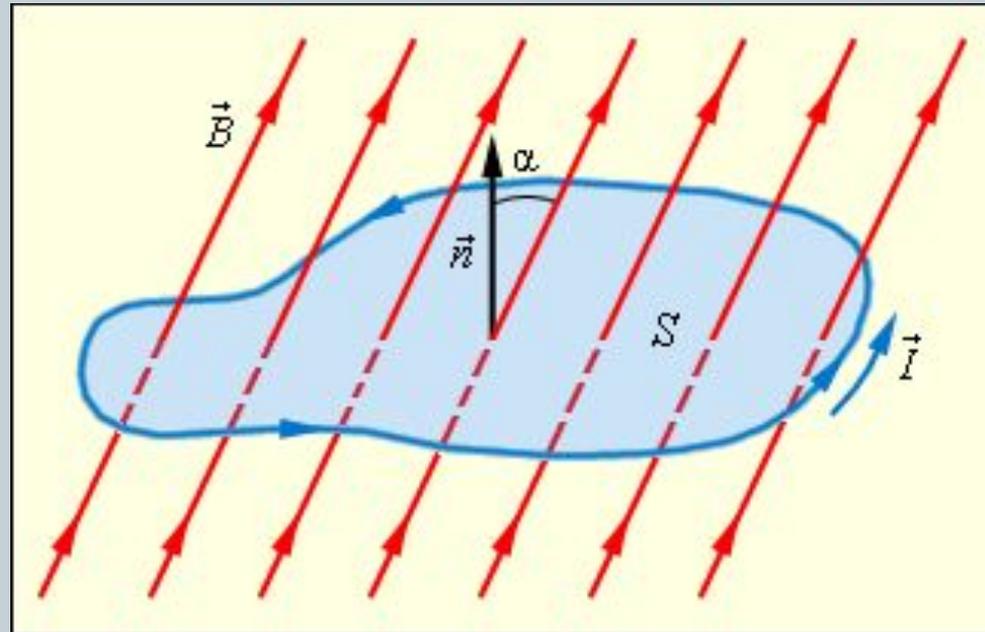
Знак минус в этой формуле связан с определенным правилом знаков.

Знак магнитного потока связан с направлением нормали к поверхности, ограниченной контуром, а знак \mathcal{E}_i - с выбором положительного направления обхода по контуру.

При сделанном выборе положительных направлений – в соответствии с правилом правого винта – величины

$\frac{d\Phi}{dt}$ и \mathcal{E}_i имеют противоположные знаки.

Правило знаков



Правило знаков



- Рассмотрим контур и выберем к нему нормаль \vec{n} , тогда положительным будет ток, текущий против часовой стрелки.

При $\frac{d\Phi}{dt} < 0$, т.е. поток через контур уменьшается, поле, созданное индукционным током, должно увеличивать поток, т.е. иметь такое же по отношению к \vec{n} направление. Определяя направление индукционного тока, видим, что он течет против часовой стрелки,

т.е. $i_{\text{инд.}} > 0$. Таким образом, знаки $\frac{d\Phi}{dt}$ и $i_{\text{инд.}}$ а, следовательно, \mathcal{E}_i разные.



Если замкнутый контур состоит не из одного витка, а из N витков, то \mathcal{E}_i , индуцируемая в контуре будет равна сумме э.д.с., индуцируемых в каждом из витков. Если магнитный поток, охватываемый каждым витком, одинаковый и равен Φ_1 , то э.д.с. индукции

$$\mathcal{E}_i = -N \frac{d\Phi_1}{dt}$$

Причины, приводящие к возникновению Э. д.с. ИНДУКЦИИ

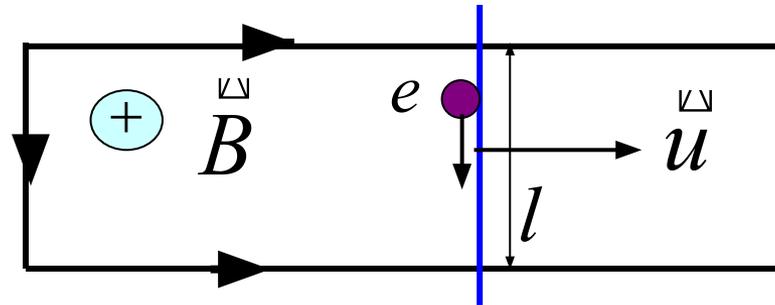
1. Контур движется в постоянном магнитном поле.

Рассмотрим П – образный контур с подвижной перемычкой. При движении перемычки с такой же скоростью движутся и заряды.

Со стороны магнитного поля на них действует сила

$$\vec{F}_M = q[\vec{u}, \vec{B}]$$

Электроны начнут двигаться вниз, вверх потечет индукционный ток.



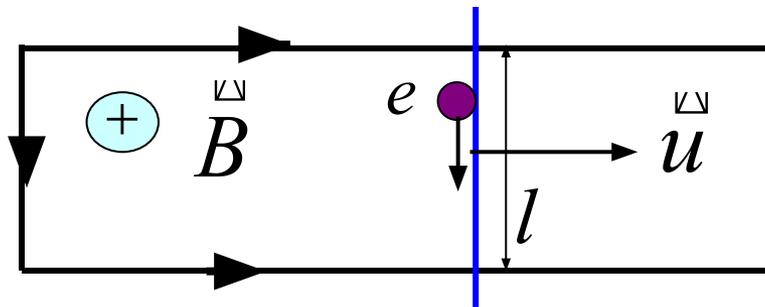
Контур движется в постоянном магнитном поле.



Перераспределившиеся заряды создадут электрическое поле, которое возбудит ток и в остальных участках контура.

\vec{F}_M играет роль сторонней силы, поэтому

$\vec{E}^* = [\vec{u}, \vec{B}]$ - напряженность поля сторонних сил.





По определению $\oint \vec{E}^* dl = \varepsilon_i$,

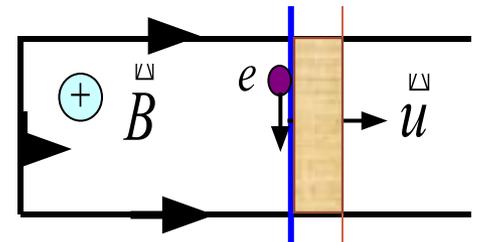
для нашего случая $\varepsilon_i = -u \cdot B \cdot l$

"—" появится в результате выбора положительной
нормали \vec{n} .

$u \cdot l$ - это приращение площади контура в единицу
времени — $\frac{ds}{dt}$.

Следовательно

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



2.Контур покоится в переменном магнитном поле.



Возникновение индукционного тока в неподвижном контуре говорит о том, что переменное магнитное поле вызывает в контуре появления сторонних сил, которые не могут быть магнитными силами, т.к. привести в движение покоящиеся заряды магнитные силы не могут.

Индукционный ток обусловлен возникающим в контуре электрическим полем E , которое не может быть электростатическим.



- **Максвелл предположил, что изменяющееся во времени магнитное поле приводит к появлению в пространстве электрического поля независимо от наличия проводящего контура.**

Контур лишь позволяет обнаружить существование этого поля.

- Закон электромагнитной индукции является одним из уравнений Максвелла. Получим его.

$$\varepsilon_i = \oint \vec{E} d\vec{l}, \quad \varepsilon_i = -\frac{d\Phi}{dt}, \quad \oint \vec{E} d\vec{l} = -\frac{\partial\Phi}{\partial t}.$$

$$\Phi = \int \vec{B} d\vec{s}, \quad \frac{\partial}{\partial t} \int \vec{B} d\vec{s} = \int \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{s}, \quad \oint \vec{E} d\vec{l} = -\int \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{S}.$$

В дифференциальной форме $\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$ или

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

- локальная связь между электрическим и

магнитным полями в данной точке пространства.

Тот факт, что $\operatorname{rot} \vec{E} \neq 0$ говорит о непотенциальности электрического поля. Оно, как и магнитное поле, является вихревым

ЯВЛЕНИЕ САМОИНДУКЦИИ



Изменение тока в контуре, а также его индуктивности ведет к возникновению Э.д.с. индукции в этом же контуре. Данное явление получило название самоиндукции.

Если в пространстве нет ферромагнетиков, то $B \sim i$.

Так как $\Phi \sim B$, то $\Phi \sim i$

и, следовательно, $\Phi = Li$

где L - коэффициент, называемый индуктивностью контура.

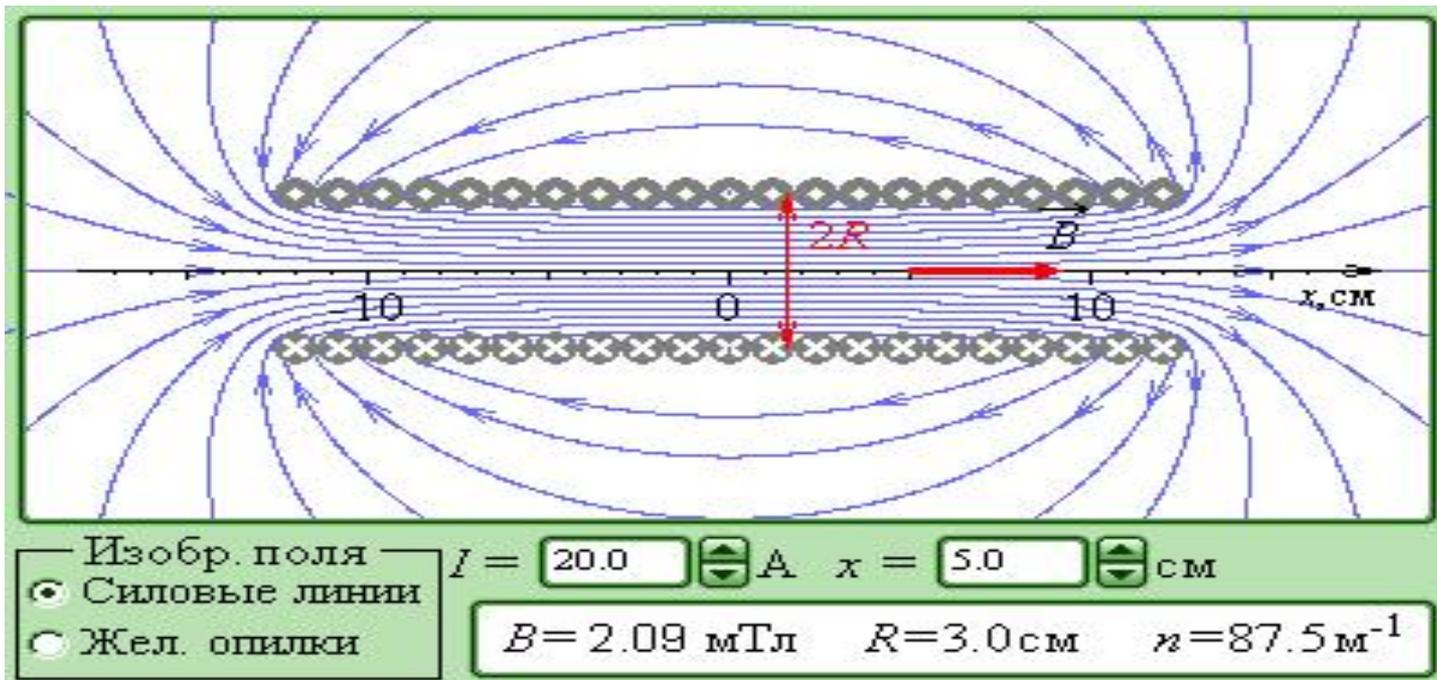
ИНДУКТИВНОСТЬ



- **Индуктивность зависит от формы и размеров контура, а также от магнитных свойств среды.**
- Если контур жесткий и поблизости нет ферромагнетиков, то

$$L = \textit{const}$$

Рассчитаем индуктивность соленоида, пренебрегая краевыми эффектами



$$L = \frac{\Phi}{i}$$

$$\Phi = N \cdot \Phi_1 = N \cdot B \cdot S = N \cdot \mu_0 n \cdot i \cdot S = n \cdot l \cdot \mu_0 \cdot n \cdot i \cdot S = \mu_0 n^2 i \cdot V$$

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

ЭДС самоиндукции



При изменении силы тока в контуре или индуктивности контура в нем возникает э.д.с.

самоиндукции

$$\varepsilon_i = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d}{dt}(Li) = -L\frac{di}{dt} - i\frac{dL}{dt}$$

$$L = \text{const} \quad \varepsilon_{si} = -L\frac{di}{dt}.$$

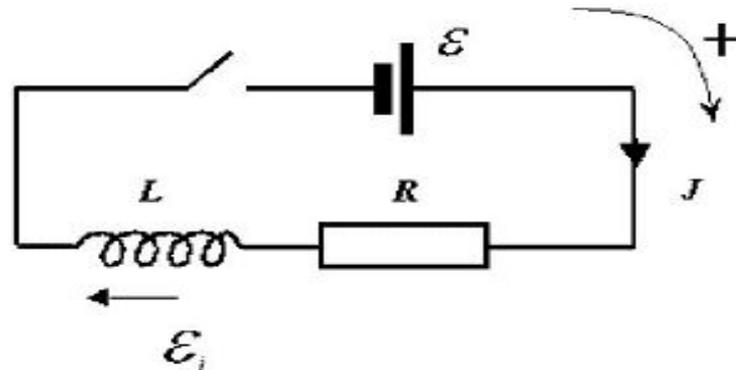
Если , то

Таким образом, э.д.с. самоиндукции стремится сохранить ток в контуре постоянным. Характерным проявлением самоиндукции являются явления при размыкании и замыкании цепи.

Явления при размыкании и замыкании цепи



Рассмотрим цепь. Цепь замкнута, течет ток .
Разомкнем цепь. Ток через индуктивность начнет убывать, возникнет э.д.с. , противодействующая изменению тока.



В каждый момент времени ток в цепи определяется законом Ома

$$i = \varepsilon_s / R$$

или

$$Ri = -L \frac{di}{dt},$$

$$\frac{di}{dt} + \frac{R}{L}i = 0$$

$$\frac{di}{i} = -\frac{R}{L} \cdot dt,$$

$$\ln\left(\frac{i}{i_0}\right) = -\frac{Rt}{L},$$

$$i = i_0 e^{-t/\tau}.$$

$$i_0 = \varepsilon / R,$$

$$\tau = \frac{L}{R}.$$

τ - время релаксации, время, в течение которого сила тока уменьшается в e раз.

Цепь разомкнута. Замкнем ее. Ток начинает нарастать, возникает э.д.с. самоиндукции. Согласно закону Ома:

$$Ri = \varepsilon + \varepsilon_s \quad \text{или} \quad Ri = \varepsilon - L \frac{di}{dt},$$

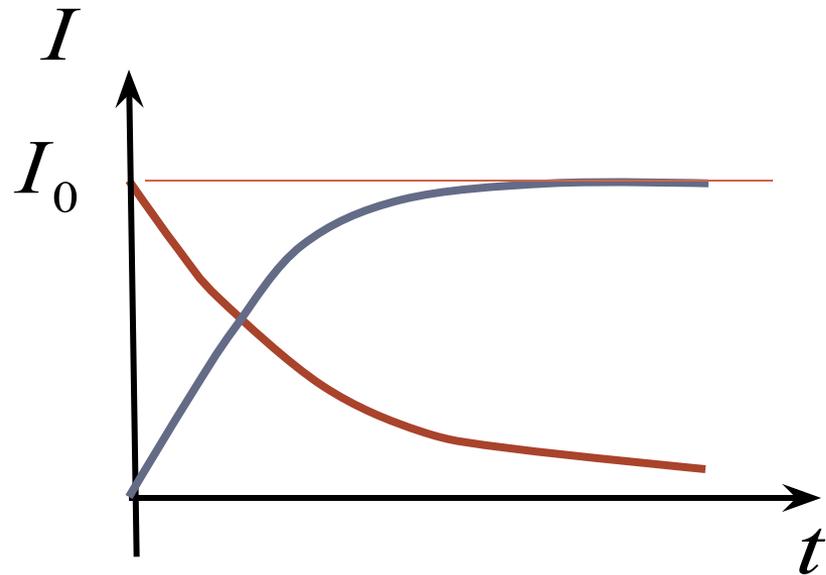
$$Ri - \varepsilon = -L \frac{di}{dt}$$

$$Ri - \varepsilon = u \quad du = R di \quad u = -\frac{L}{R} \frac{du}{dt} \quad \frac{du}{u} = -\frac{dt}{\tau}$$

$$\int_{-\varepsilon}^{Ri-\varepsilon} \frac{du}{u} = -\int_0^t \frac{dt}{\tau}$$

$$\ln \left[\frac{Ri - \varepsilon}{-\varepsilon} \right] = -\frac{t}{\tau}$$

$$i = i_0 \left(1 - e^{-t/\tau} \right)$$



$$i_0 = \frac{\varepsilon}{R} \quad \text{- установившийся ток.}$$

ВЗАИМНАЯ ИНДУКЦИЯ

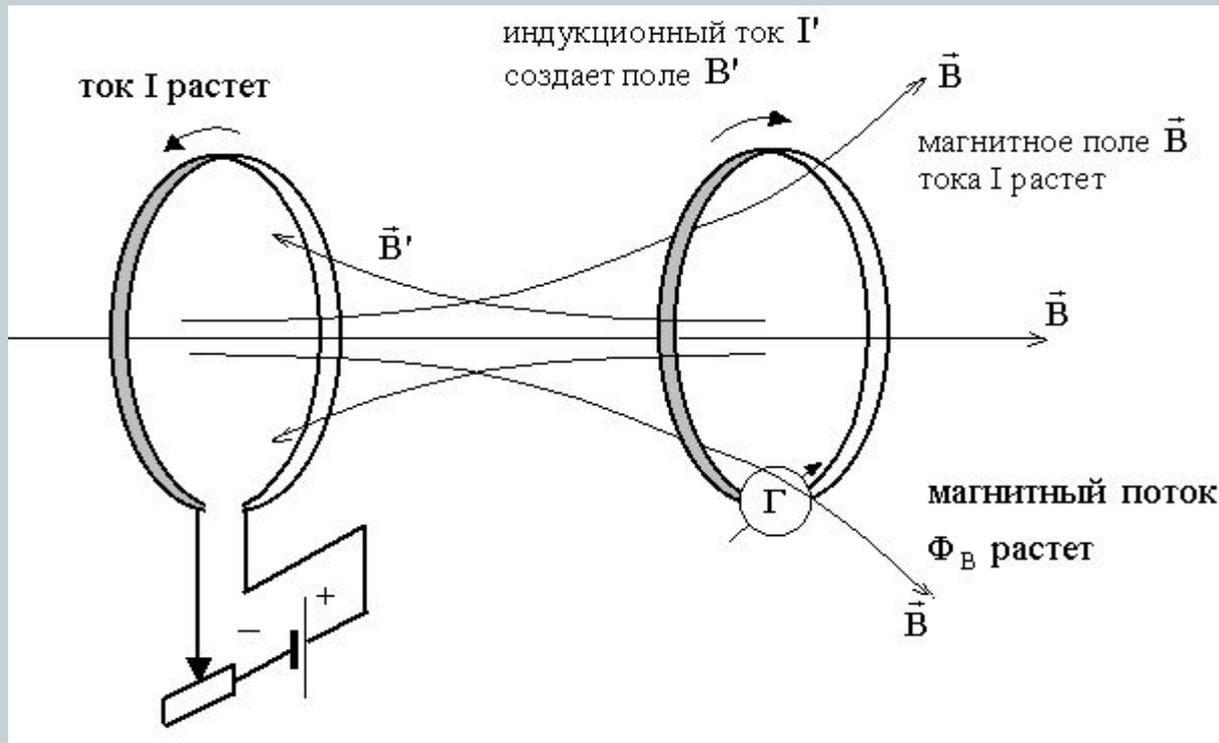
Рассмотрим два неподвижных контура, расположенных достаточно близко друг от друга. Если в контуре 1 течет ток, то он создает через контур 2 поток $\Phi_2 = L_{21}i_1$.

Аналогично, если в контуре 2 течет ток, то он создает через контур 1 поток $\Phi_1 = L_{12}i_2$.

L_{12}, L_{21} - коэффициенты называются взаимной индуктивностью контуров.

Взаимная индуктивность численно равна магнитному потоку сквозь один из контуров, создаваемому единичным током в другом контуре.

Взаимная индукция



Коэффициенты L_{12}, L_{21} зависят от формы, размеров и взаимного расположения контуров, а также от магнитных свойств среды.

При отсутствии ферромагнетиков $L_{12} = L_{21}$ - это свойство называют теоремой взаимности.

Смысл равенства состоит в том, что в любом случае магнитный поток через контур 1, созданный током в контуре 2, равен магнитному потоку сквозь контур 2, созданному таким же током в контуре 1.

Магнитная связь между контурами проявляется в том, что при всяком изменении тока в одном контуре, в другом возникает э.д. с. индукции. Это явление получило название взаимной индукции.

Согласно закону электромагнитной индукции э.д.с., возникающие в контурах 1,2 соответственно равны:

$$\varepsilon_{13} = -\frac{d\Phi_1}{dt} = -L_{12} \frac{di_2}{dt} \quad \varepsilon_{23} = -\frac{d\Phi_2}{dt} = -L_{21} \frac{di_1}{dt}$$

С учетом явления самоиндукции ток, например в контуре 1 при изменении токов в обоих контурах определяется по закону Ома как

$$R_1 i_1 = \varepsilon_1 - L_1 \frac{di_1}{dt} - L_{12} \frac{di_2}{dt}, \quad R_2 i_2 = \varepsilon_2 - L_2 \frac{di_2}{dt} - L_{21} \frac{di_1}{dt}.$$

В отличие от L , которая всегда >0 , L_{12} величина алгебраическая.

Знак магнитного потока будет зависеть от выбора нормали к поверхности, ограниченной контуром 2.

Положительные направления для токов в контурах всегда можно выбрать произвольно. Раз эти направления выбраны, то величину L_{12} мы должны считать положительной, когда при положительных токах потоки взаимной индукции через контуры оказываются также положительными, т.е. совпадают по знаку с потоками самоиндукции положительных токов в обоих контурах. Контур «подмагничивают» друг друга, в противном случае $L_{12} < 0$.

