

# **ЭДС индукции**

**явление электромагнитной  
индукции**

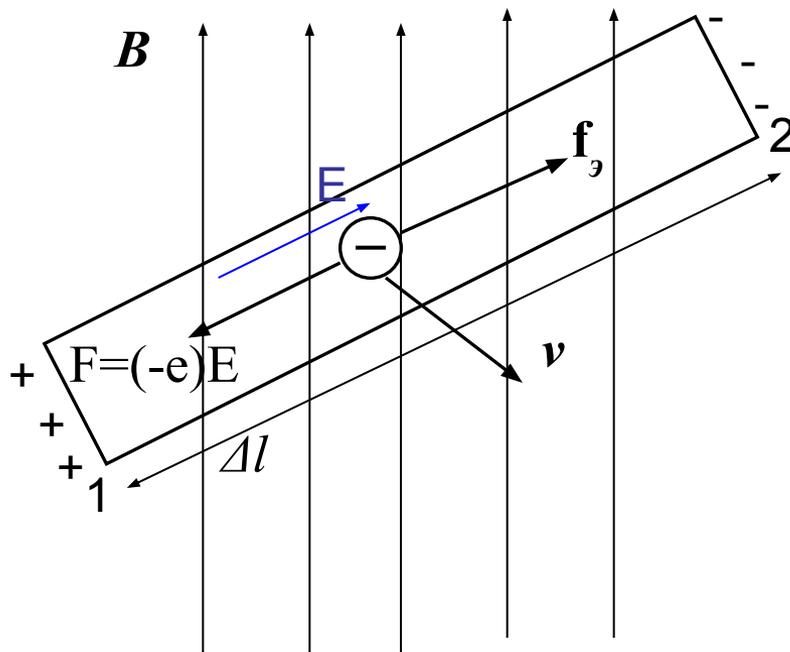
- **Электромагнитная индукция – это явление возникновения ЭДС индукции и индукционного тока в замкнутом проводнике при изменении магнитного потока, пронизывающего контур**

Предположим, что в магнитном поле находится металлический проводник. Свободные электроны в этом проводнике участвуют в тепловом движении, скорости их ориентированы беспорядочно.

На каждый электрон со стороны магнитного поля действует сила

$$\mathbf{f}_3 = (-e) \cdot \mathbf{v} \cdot \mathbf{B} \cdot \sin \alpha$$

$$\mathbf{f}_3 = (-e) \cdot [\mathbf{v} \cdot \mathbf{B}]$$



Перераспределение зарядов внутри проводника ведет к возникновению внутри объема  $\Delta l$  электрического поля. Поле действует на электроны с силой

$$\mathbf{F} = (-e) \cdot \mathbf{E}$$

Рассмотрим 2 случая:

1) Если за пределами сечений 1-2 проводников нет, то электрическое поле со временем приостановит движение зарядов в направлении силы  $f_{\text{э}}$ . Равновесное распределение зарядов в проводнике наступит при условии:

$$f_{\text{э}} = -F = -(-e) \cdot E = e \cdot E$$

Из постоянства  $v$  и  $V$  следует постоянство  $f_{\text{э}}$  и  $E$ . Электрическое поле внутри проводника однородно, поэтому разность потенциалов между сечениями 1 и 2 равна:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = E \cdot \Delta l$$

2) Если проводник замыкается за пределами магнитного поля, то сила  $f_{\text{э}}$  вызовет движение электронов через внешние участки цепи; по проводнику потечет электрический ток. Когда в цепи установится определенная скорость упорядоченного движения электронов, т.е. определенная сила тока, то работа сил  $f_{\text{э}}$  на участке  $\Delta l$  за некоторый промежуток времени будет равна суммарной энергии, выделяемой током за то же время во всех участках замкнутой цепи.

Сила  $f_{\text{э}}$ , приложенная к зарядам со стороны магнитного поля – сторонняя сила. Участки проводника, перемещающиеся в магнитном поле, можно рассматривать как «источники тока», обладающие особой ЭДС - электродвижущей силой индукции.

ЭДС индукции участка проводника  $\Delta l$  можно найти либо :  
по разности потенциалов на его концах (если проводник не замкнут)  
по работе сторонних сил (если по проводнику течет ток)

Найдем напряженность электрического поля  $E$  в проводнике в зависимости от  $v$  и  $B$ :

$$f_{\text{э}} = e \cdot E$$

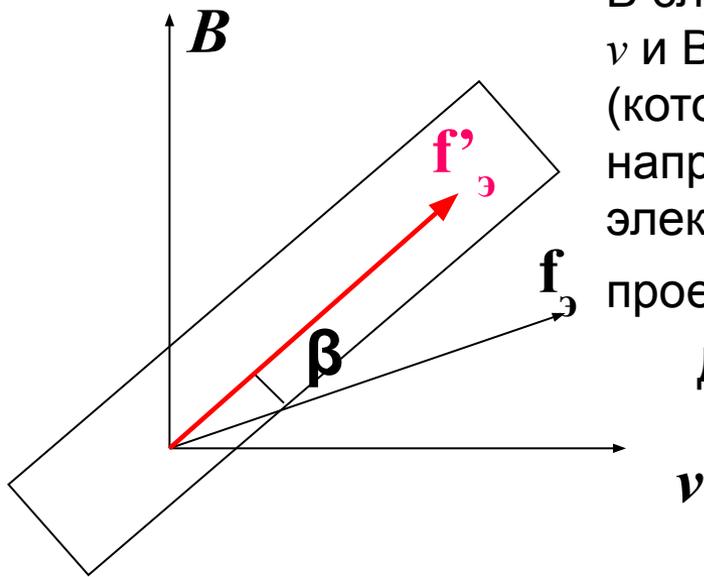
$$f_{\text{э}} = (-e) \cdot v \cdot B \cdot \sin \alpha$$

$$e \cdot E = (-e) \cdot v \cdot B \cdot \sin \alpha$$

$$E = - v \cdot B \cdot \sin \alpha$$

Тогда разность потенциалов на концах участка проводника

$$\mathcal{E}_i = E \cdot \Delta l = -v \cdot B \cdot \Delta l \cdot \sin \alpha$$



В случае, когда сам проводник не перпендикулярен к  $v$  и  $B$ , а ориентирован произвольным образом, сила  $f_3$  (которая всегда перпендикулярна  $v$  и  $B$ ) не будет направлена вдоль проводника, а движение электронов будет вызывать не вся сила  $f_3$ , а только проекция силы

$$f'_3 = f_3 \cdot \cos \beta$$

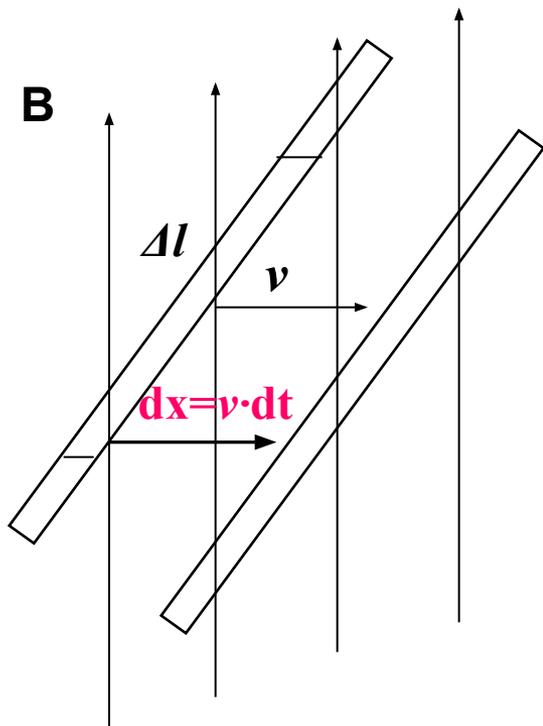
Для равновесного состояния будет справедливо:

$$f'_3 = e \cdot E$$

$$E = -v \cdot B \cdot \sin \alpha \cdot \cos \beta$$

$$\mathcal{E}_i = -v \cdot B \cdot \Delta l \cdot \sin \alpha \cdot \cos \beta$$

Будем полагать, что  $\beta=0$  а  $\cos\beta = 1$  и что векторы  $v$  и  $B$  перпендикулярны между собой  $\alpha=90^\circ$ ,  $\sin\alpha = 1$



тогда

$$\mathcal{E}_i = -v \cdot B \cdot \Delta l$$

$$v = \frac{dx}{dt}$$

скорость перемещения проводника за время  $dt$

$$\Delta l \cdot dx = S$$

площадь, описываемая проводником при движении за время  $dt$

$$B \cdot S = d\Phi$$

магнитный поток, проходящий через площадь  $S$

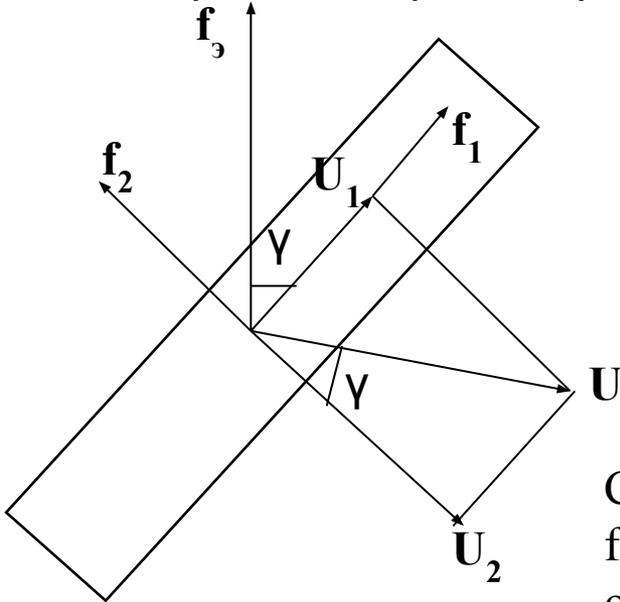
$$\mathcal{E}_i = -\frac{d\Phi}{dt}$$

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

Электродвижущая сила, возникающая при движении проводника в магнитном поле, численно равна магнитному потоку через площадь, которую этот проводник описывает в единицу времени

- Если проводник параллелен вектору  $B$ , то магнитный поток через описываемую им площадь равен нулю: в этом случае на концах проводника разности потенциалов не возникает.
- В формулах для ЭДС и напряженности поля  $E$  знак «минус» будет и в случае движения свободных положительных зарядов

В случае замкнутых контуров можно использовать полученные формулы ЭДС, однако при протекании тока по проводнику (упорядоченное движение электронов) скорость электронов относительно магнитного поля перестанет быть равно скорости проводника.



$v_1$  – скорость упорядоченного движения электронов вдоль проводника

$v_2$  – скорость перемещения электронов вместе с проводником

$\gamma$  – угол между силой со стороны магнитного поля  $f_3$  и проводником

Составляющие силы  $f_3$  совершают работу:

$f_1$  – *положительную*, сообщая электронам энергию, которую они расходуют при движении по контуру

$f_2$  – *отрицательную*, препятствуя движению проводника.

Сила  $f_3$  перпендикулярна скорости движения электронов, следовательно работы не совершает. Тогда сумма работ, совершаемых составляющими этой силы тоже равна нулю. Если к проводнику не прилагать внешней силы, то как только будет израсходована его кинетическая энергия, он остановится под действием силы  $f_2$ .

Чтобы проводник продолжил движение со скоростью  $v_2$  надо приложить внешнюю силу  $F$ , равную сумме всех сил  $f_2$ , направленную в сторону движения.

$$\Sigma f_2 = f_3 \cdot \sin\gamma = e \cdot v \cdot B \cdot \sin\gamma = e \cdot v_1 \cdot B = n \cdot e \cdot S \cdot v_1 \cdot \Delta l \cdot B = I \cdot B \cdot \Delta l$$

$\Sigma f_2$  равна силе Ампера, действующей на проводник со стороны магнитного поля

Чтобы вызвать в проводнике эл ток, перемещая его в магнитном поле, надо преодолеть силу Ампера, которая будет действовать со стороны этого поля на появившийся ток.

Источником энергии индукционных токов (токов, возбуждаемых ЭДС) является работа внешних сил, приложенных к движущемуся проводнику.

Если проводник не замкнут, то упорядоченное движение электронов в проводнике существует очень недолго, пока устанавливается равновесие зарядов: после наступления равновесия

$$v_1 = 0 \quad f_2 = e \cdot v_1 \cdot B = 0$$

необходимости во внешней силе нет.

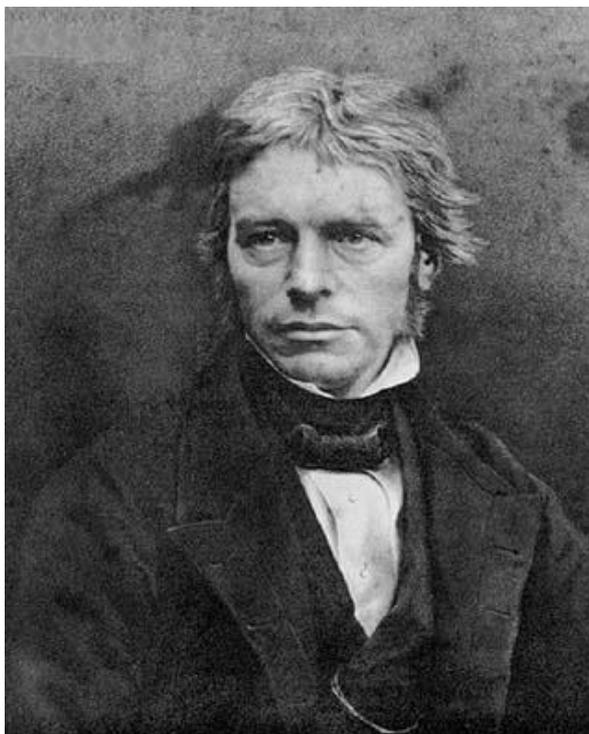
Практический интерес имеет возбуждение ЭДС индукции в проводниках, имеющих форму одного или нескольких витков.

*ЭДС индукции в витке численно равна изменению магнитного потока через площадь этого витка в единицу времени . В катушке, содержащей  $n$  витков, ЭДС каждого витка суммируются*

$$E_i = - \frac{d\Phi}{dt} n$$

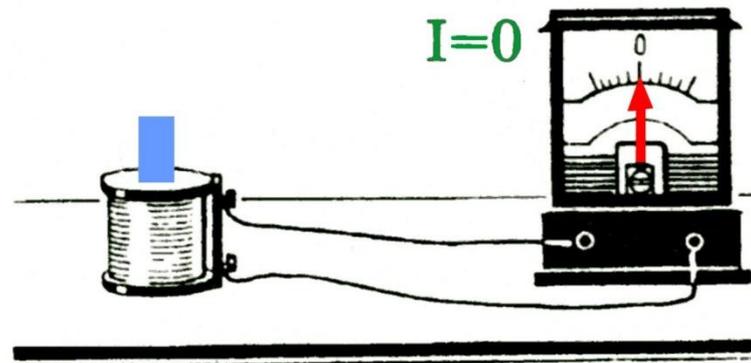
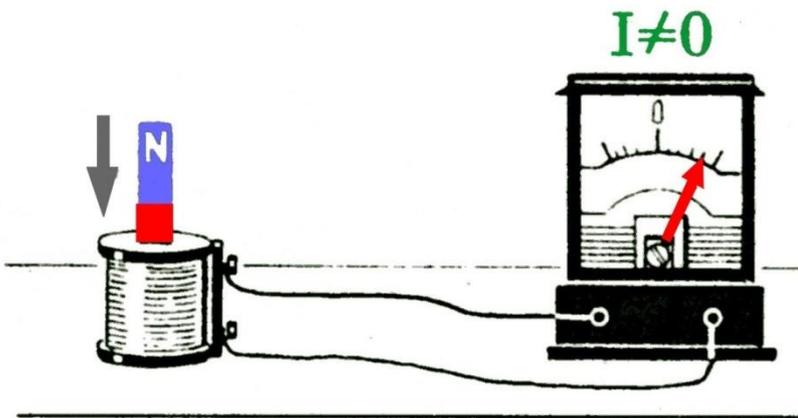
ЭДС индукции возбуждается не только при движении проводников в магнитном поле, но и в неподвижных проводниках, если только они находятся в *переменном магнитном поле*.

**• Опыты Фарадея по электромагнитной индукции объяснил Д.К.Максвелл, введя понятие вихревого электрического поля**



# Опыты Фарадея

постоянный магнит вставляют в катушку, замкнутую на гальванометр, или вынимают из нее. При движении магнита в контуре возникает электрический ток



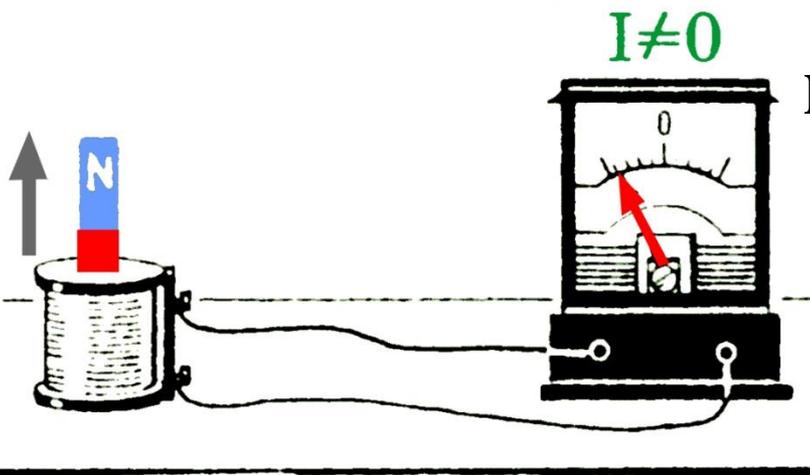
**МАГНИТ НЕПОДВИЖЕН**

**ИНДУКЦИОННОГО ТОКА НЕТ**

**при движении магнита  
относительно катушки**

**возникает**

**ИНДУКЦИОННЫЙ ТОК**



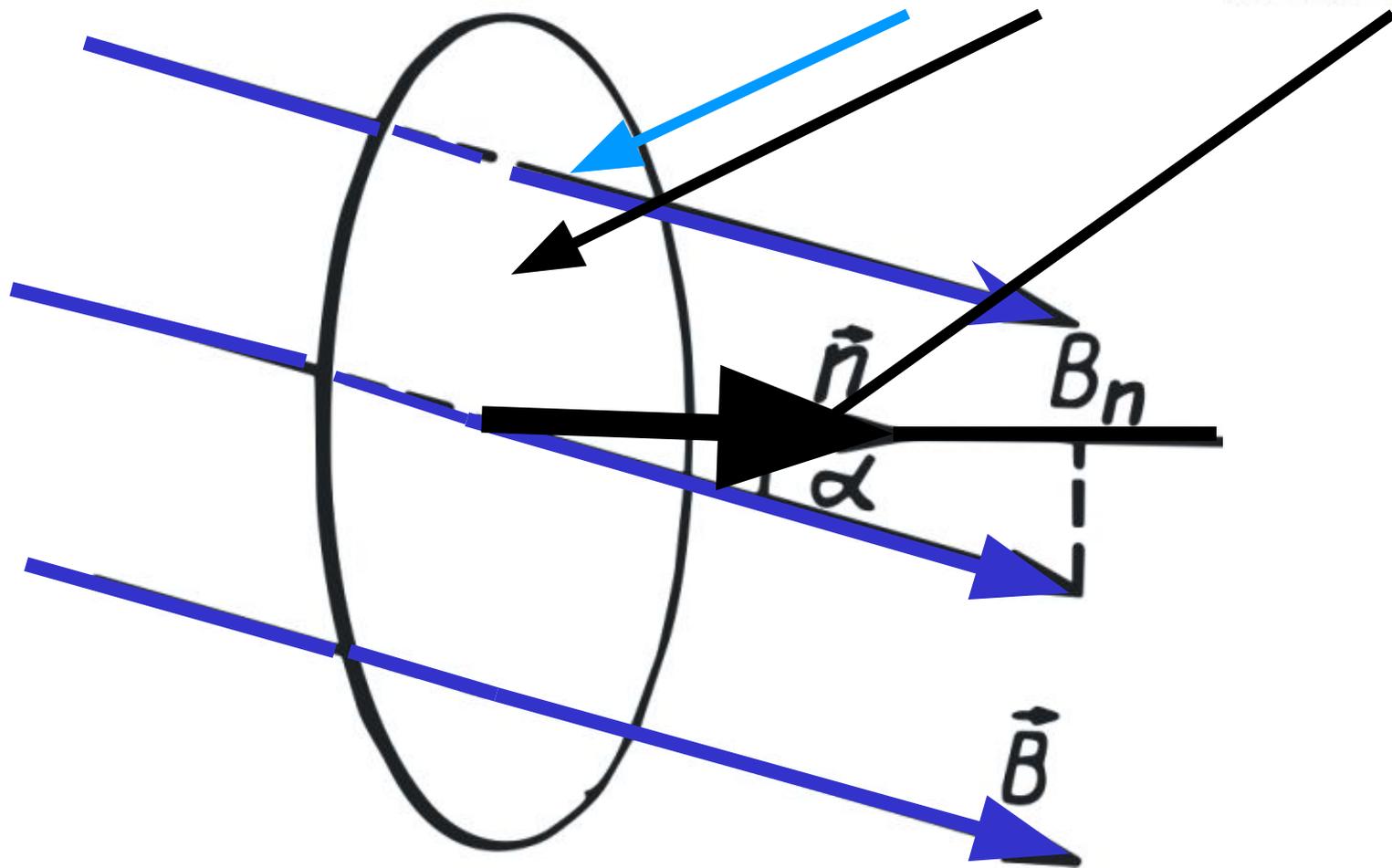
# Опыт Фарадея с катушками



**электрический ток в катушке 2  
возникает в моменты замыкания  
и размыкания ключа катушки 1**

# Магнитный поток

$$\Phi = BS \cos \alpha$$



# Закон электромагнитной индукции

**изменение  
магнитного  
потока**

$$(\Phi_2 - \Phi_1)$$

$$\varepsilon_i = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = - \Phi'$$

**время**

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

**скорость  
изменения  
магнитного  
потока**

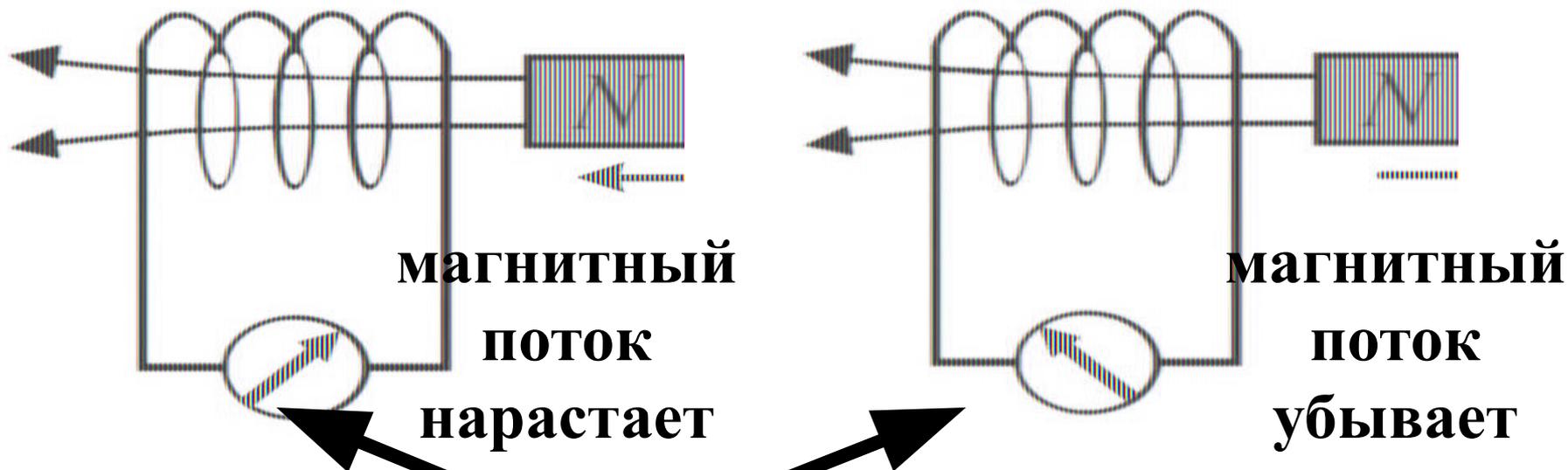
$$\left[ \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \right] = \frac{Вб}{с}$$

# Закон электромагнитной индукции

- ЭДС индукции прямо пропорциональна скорости изменения магнитного потока

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

# Закон электромагнитной ИНДУКЦИИ



направление индукционного тока

$$I_i = \frac{\varepsilon_i}{R}$$

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

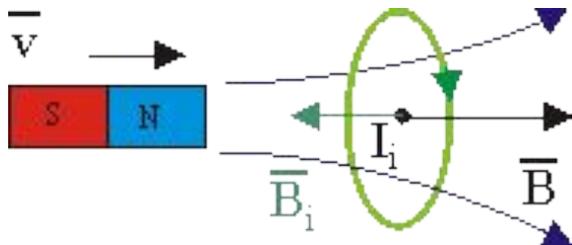
В явлениях электромагнитной индукции действует важный закон - закон Ленца.

**Индукционный ток направлен так, чтобы своим магнитным полем противодействовать изменению магнитного потока, которым он вызван.**

Направление индукционного тока в контуре определяется правилом Ленца:

Направление индукционного тока определяется следующим образом:

1. установить направление внешнего магнитного поля  $\mathbf{B}$ .
2. определить увеличивается или уменьшается поток вектора магнитной индукции внешнего поля.
3. по правилу Ленца указать направление вектора магнитной индукции индукционного тока  $\mathbf{B}_i$ .
4. по правилу правого винта определить направление индукционного тока в контуре.



Виток проводника помещен в неоднородное магнитное поле, созданное движущимся постоянным магнитом. Т.к.  $\mathbf{B}$  нарастает, то вектора  $\mathbf{B}_i$  и  $\mathbf{B}$  антипараллельны.

При движении проводника с магнитном поле в нем появляется индукционный ток такого направления, что сила Ампера, действующая на этот ток со стороны магнитного поля, противодействует движению проводника

При вращении контура в магнитном поле в нем индуцируется ток такого направления, что механический момент, действующий на этот контур с током со стороны магнитного поля противодействует вращению контура.

Если неподвижный контур находится в переменном магнитном поле, то в нем индуцируется ток такого направления, что собственное магнитное поле этого тока противодействует изменению внешнего магнитного поля:

если магнитный поток через площадь контура увеличивается, то собственное магнитное поле индукционного тока уменьшает его -  $B_i$  направлено против  $B_{\text{внеш}}$

если магнитный поток через площадь контура уменьшается, то собственное магнитное поле индукционного тока не дает ему резко уменьшиться -  $B_i$  сонаправлено с  $B_{\text{внеш}}$

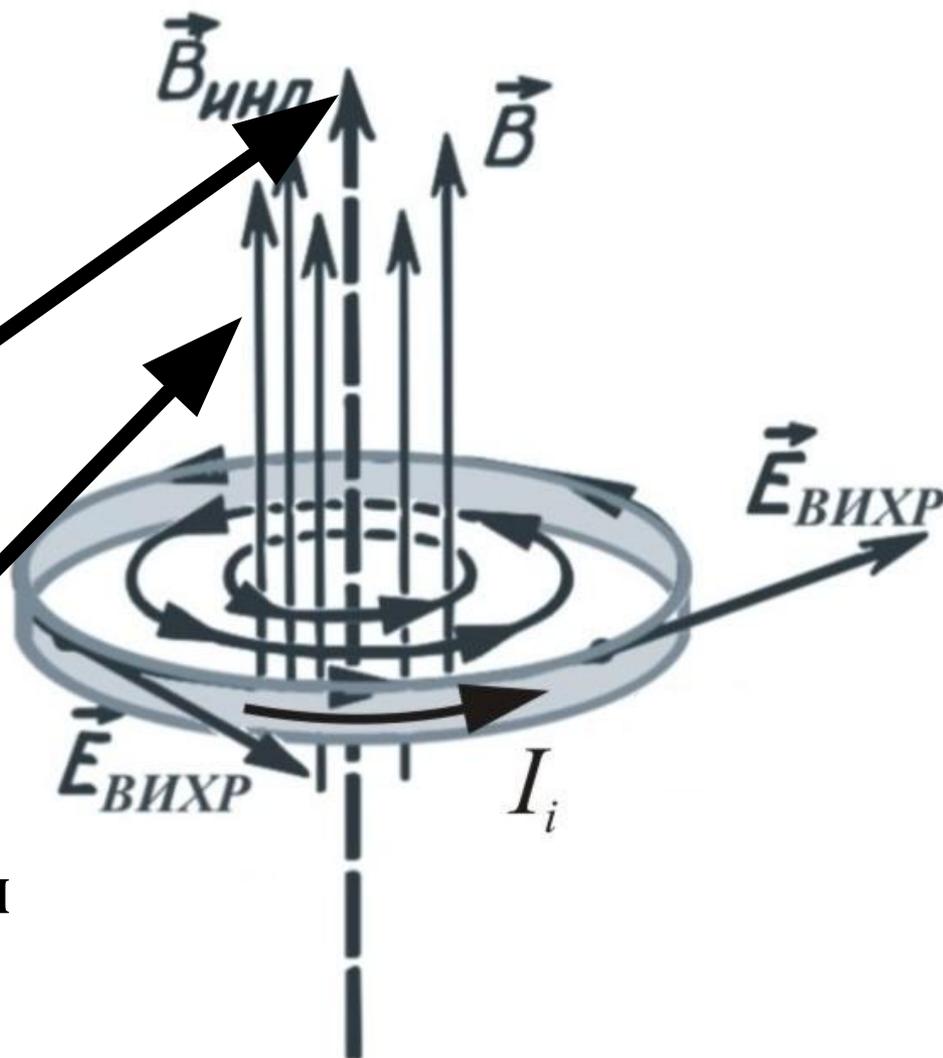
# Знак ЭДС индукции

$$\varepsilon_i > 0$$

если  
направления

вектора магнитной  
индукции  
индукционного тока

вектора магнитной  
индукции внешнего поля  
совпадают



# Знак ЭДС индукции

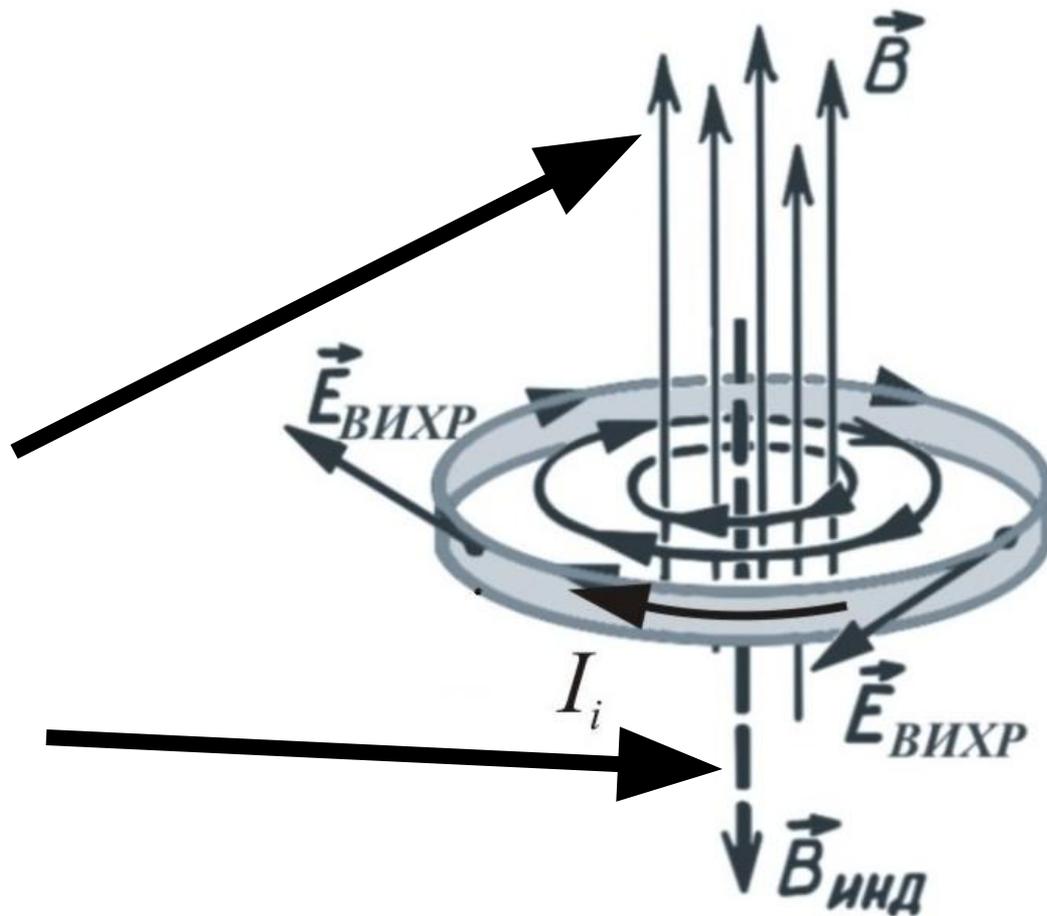
$$\varepsilon_i < 0$$

если  
направления

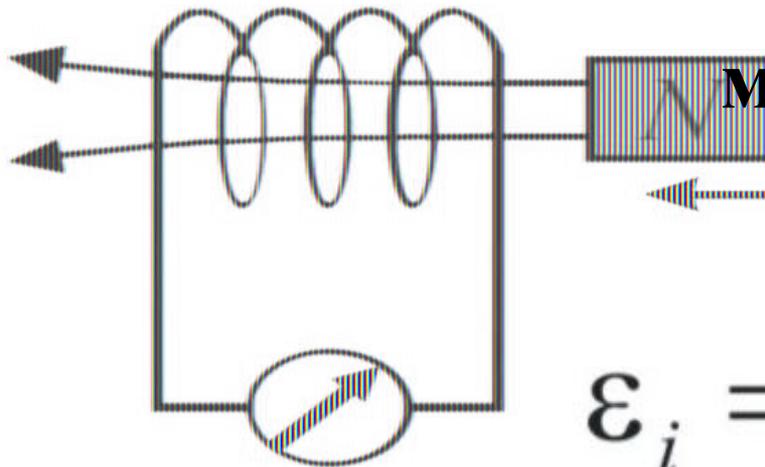
вектора магнитной  
индукции внешнего  
поля

вектора магнитной  
индукции  
индукционного тока

**противоположны**



# Знак ЭДС индукции



магнитный поток нарастает

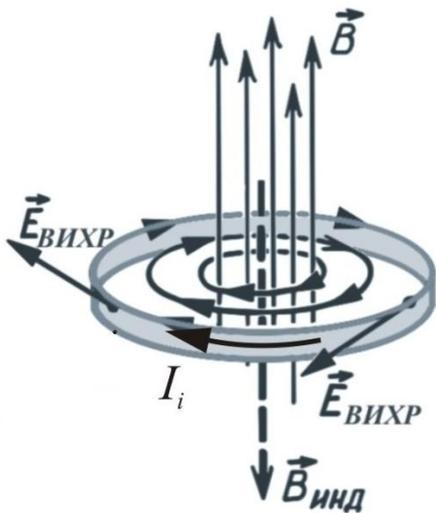
$$\varepsilon_i = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

$$\Phi_2 > \Phi_1$$

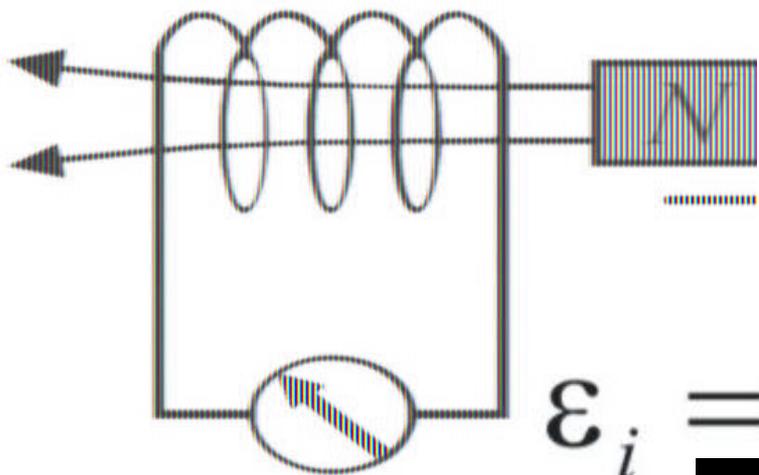
$$\Delta \Phi > 0$$

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

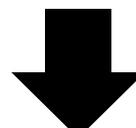
$$\varepsilon_i < 0$$



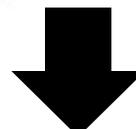
# Знак ЭДС индукции



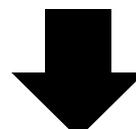
магнитный поток убывает



$$\Phi_2 < \Phi_1$$

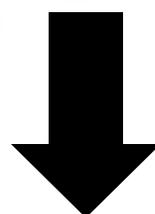


$$\Delta\Phi < 0$$

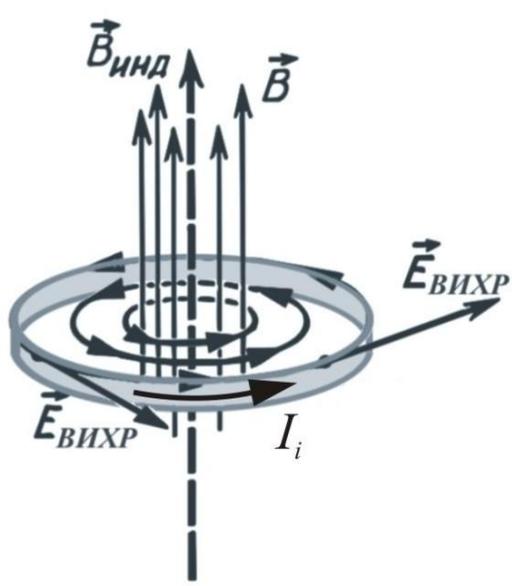


$$\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} < 0$$

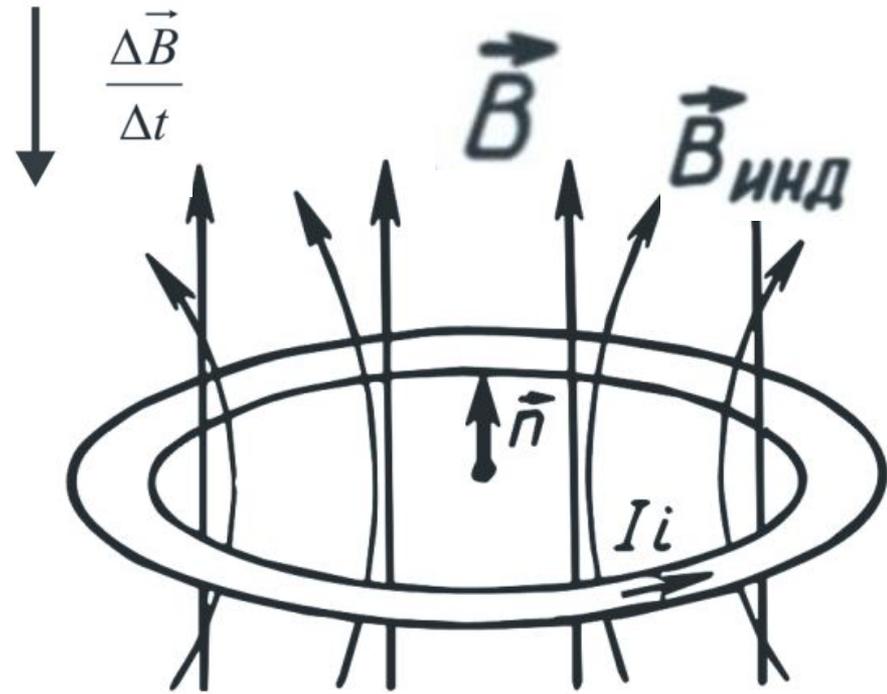
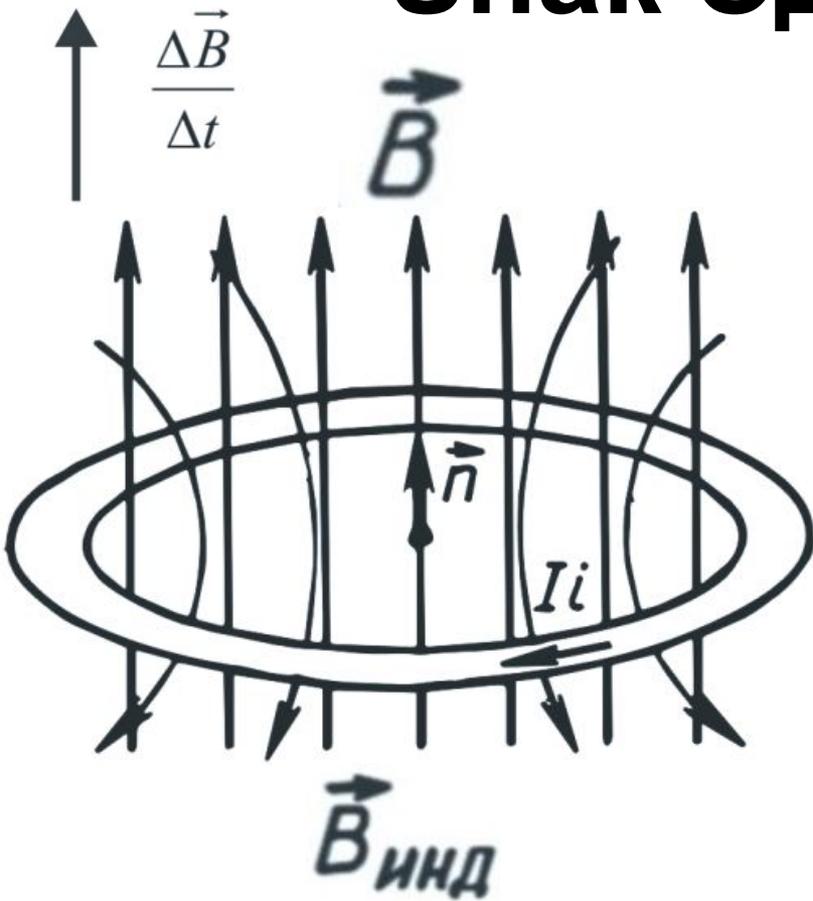
$$\varepsilon_i = - \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$



$$\varepsilon_i > 0$$



# Знак ЭДС индукции



$$\varepsilon_i < 0$$

$$\varepsilon_i > 0$$

# Формула для ЭДС индукции

$$\varepsilon_i = \frac{A_{\text{вих.эл.поля}}}{q}$$

ЭДС индукции равна работе по перемещению единичного заряда вдоль замкнутого контура, совершаемой силами вихревого электрического поля

**ЭДС индукции не зависит от:**

**материала проводника**

**рода носителей тока**

**сопротивления проводника**

**температуры проводника**

**ЭДС индукции зависит только от**

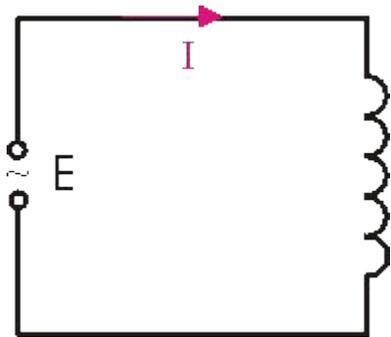
**характера изменения магнитного**

**поля**

# ЭДС самоиндукции

Самоиндукция является частным случаем разнообразных проявлений электромагнитной индукции. Рассмотрим контур, подключенный к источнику тока. По контуру протекает электрический ток  $I$ . Этот ток создает в окружающем пространстве магнитное поле. В результате контур пронизывается собственным магнитным потоком  $\Phi$ . Очевидно, что собственный магнитный поток пропорционален току в контуре, создавшему магнитной поле:

$$\Phi = L \cdot I.$$



Коэффициент пропорциональности  $L$  называется **индуктивностью контура**. Индуктивность зависит от размеров, формы проводника, магнитных свойств среды. Единица измерения индуктивности в системе СИ - 1 Генри (Гн).

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

Если ток  $i_c$  в контуре изменяется, то изменяется и собственный магнитный поток  $\Phi_c$ . Изменение величины  $\Phi_c$  приводит к возникновению в контуре ЭДС индукции. Данное явление называется самоиндукцией, а соответствующее значение - ЭДС самоиндукции  $E_{is}$

Рассмотрим соленоид весь объем которого заполнен однородным веществом с магнитной проницаемостью  $\mu$ .

Для одного витка  $\Phi_1 = B \cdot S = \mu_0 \cdot \mu \cdot H \cdot S = \mu_0 \cdot \mu \cdot \frac{I \cdot n}{l} S$

При изменении силы тока в соленоиде со временем будет меняться и магнитный поток  $\Phi_1$ , в каждом витке появится ЭДС, равная

$$\Delta \mathcal{E}_1 = - \frac{d\Phi_1}{dt} = - \frac{d}{dt} \left( \mu_0 \cdot \mu \cdot \frac{I \cdot n}{l} S \right)$$

В  $n$  последовательно соединенных витках возбуждается суммарная ЭДС:

$$\Delta \mathcal{E}_c = \sum \Delta \mathcal{E}_1 = n \Delta \mathcal{E}_1 = - \frac{d}{dt} \left( \mu_0 \cdot \mu \cdot \frac{I \cdot n^2}{l} S \right)$$

Из закона электромагнитной индукции следует, что

$$\mathcal{E}_{ic} = -\frac{d\Phi_c}{dt}$$

Если  $L = \text{const}$ , (соленоид без сердечника) то

$$\mathcal{E}_{ic} = -L \frac{dI}{dt}$$

ЭДС самоиндукции прямо пропорциональна скорости изменения силы тока в проводнике

$$\mathcal{E}_{ic} = -\frac{d}{dt}(LI) = -L \frac{dI}{dt} - I \frac{dL}{dt}$$

Следовательно ЭДС самоиндукции может возникнуть и при постоянной силе тока, если только изменяется индуктивность  $L$ .

В проводнике, по которому течет переменный ток, действуют две электродвижущие силы:

- 1) ЭДС источника тока, создающая ток  $I$
- 2) ЭДС самоиндукции, пропорциональная скорости изменения этого тока.

Если ток  $I$  в контуре возрастает, то производная  $dI/dt$  имеет положительный знак, а ЭДС самоиндукции – отрицательный. ЭДС тормозит движение зарядов и тем уменьшает силу тока в контуре.

$$\mathcal{E}_{ic} = -L \frac{dI}{dt}$$

Если ток  $I$  в проводнике убывает, то производная  $dI/dt$  имеет отрицательный знак, а ЭДС самоиндукции – положительный. Возбуждаемый ЭДС индукционный ток имеет одно направление с основным током.

При возрастании и убывании тока ЭДС самоиндукции противодействует той причине, которая вызвала ее, именно, препятствует изменению основного тока.

# Взаимоиндукция

$$\Phi_2 = L_{12} \cdot I_1$$

По закону электромагнитной индукции ЭДС взаимной индукции, возбуждаемая во втором контуре переменным магнитным полем первого контура равна:

$$\mathcal{E}_2 = -\frac{d\Phi_2}{dt} = -\frac{d}{dt}(L_{12} \cdot I)$$

Если форма, размеры и относительное расположение проводников остаются постоянными ( $L_{12} = \text{const}$ ), то:

$$\mathcal{E}_2 = -L_{12} \frac{dI_1}{dt}$$