

ЭДС индукции

**явление электромагнитной
индукции**

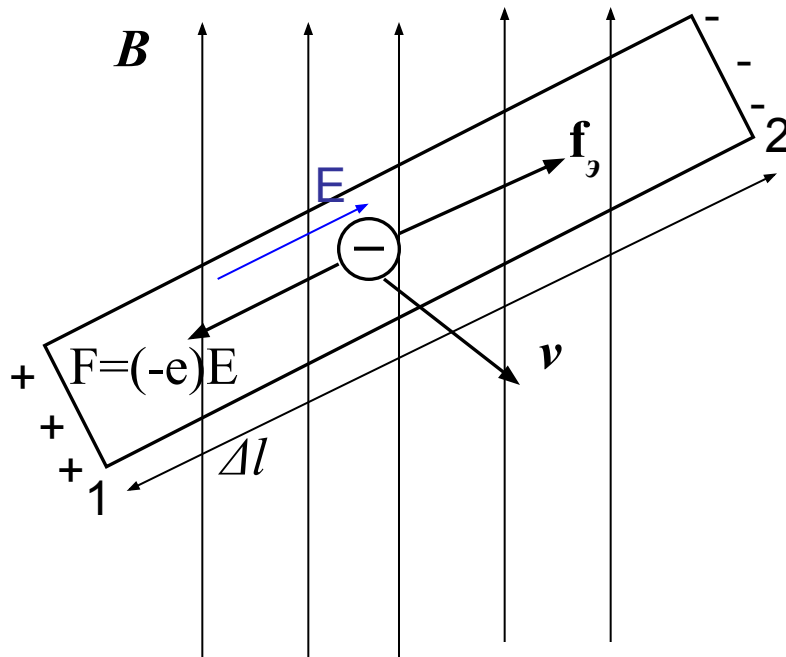
- **Электромагнитная индукция – это явление возникновения ЭДС индукции и индукционного тока в замкнутом проводнике при изменении магнитного потока, пронизывающего контур**

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 Δl 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 Δl 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 Δl 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 :

$$f_{\text{э}} = e \cdot E$$

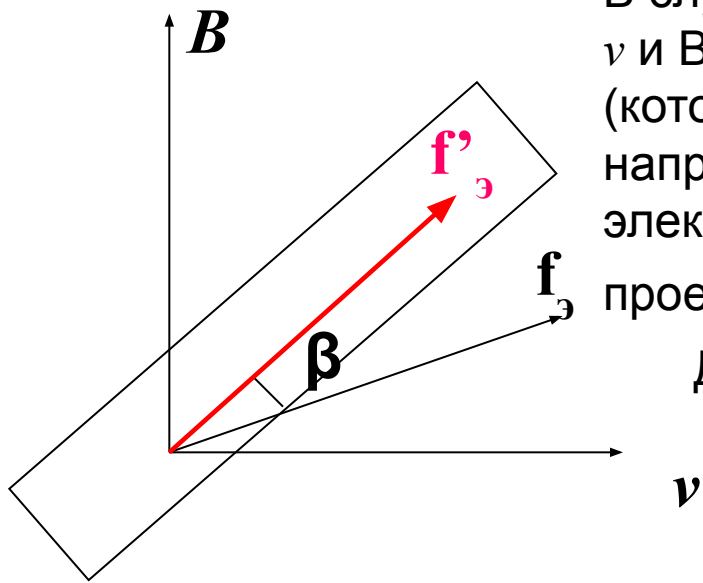
$$f_{\text{э}} = (-e) \cdot v \cdot B \cdot \sin \alpha$$

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

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

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

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

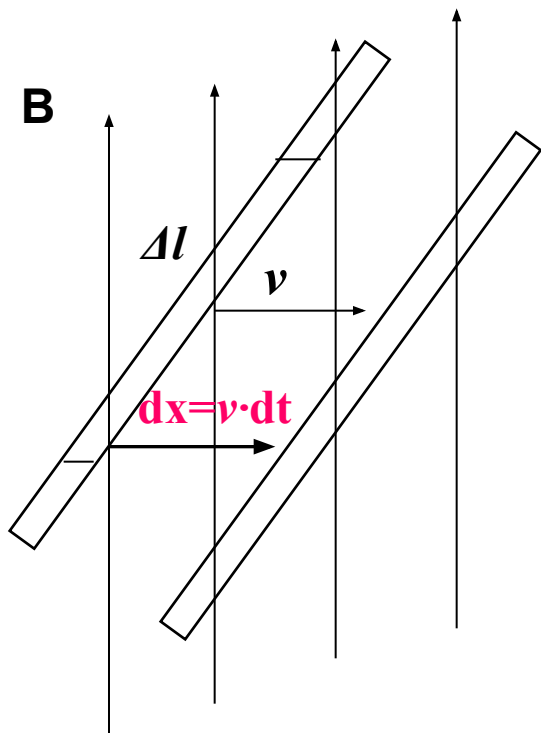
Для равновесного состояния будет справедливо:

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

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

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

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

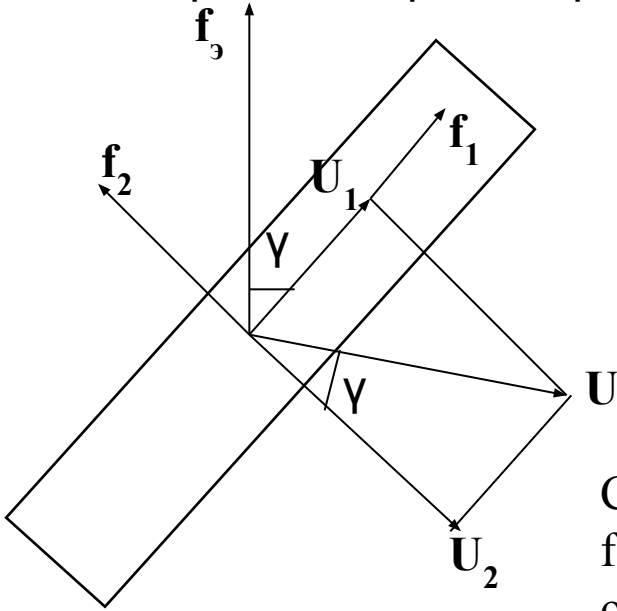
$$\mathcal{E}_i = -\frac{d\Phi}{dt}$$

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

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

γ – 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.

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

Σf_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.

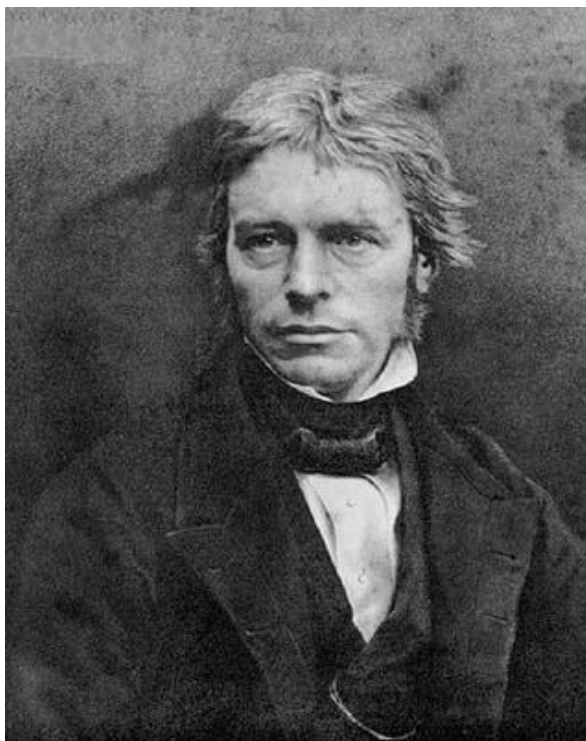
Практический интерес имеет возбуждение ЭДС индукции в проводниках, имеющих форму одного или нескольких витков.

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

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

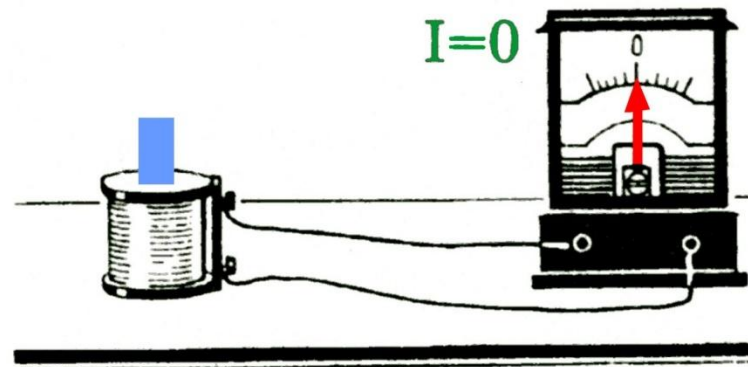
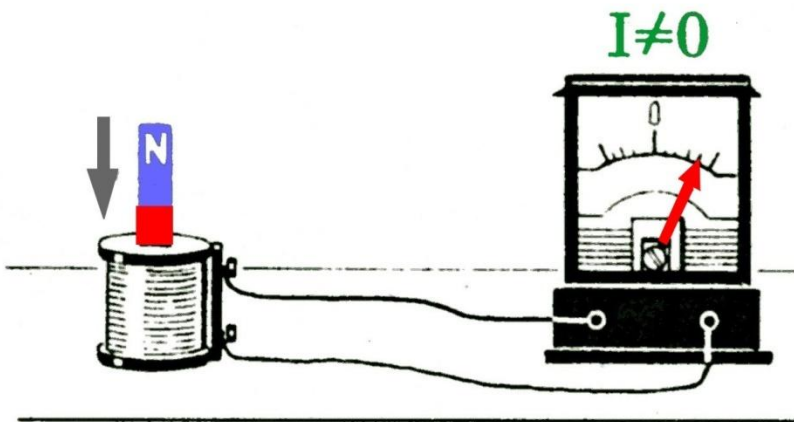
ЭДС индукции возбуждается не только при движении проводников в магнитном поле, но и в неподвижных проводниках, если только они находятся в *переменном магнитном поле*.

• 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



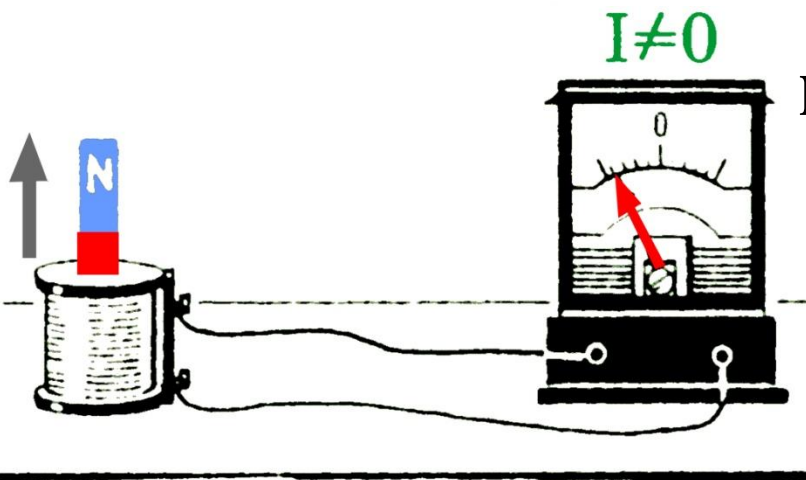
МАГНИТ НЕПОДВИЖЕН

ИНДУКЦИОННОГО ТОКА НЕТ

**при движении магнита
относительно катушки**

возникает

ИНДУКЦИОННЫЙ ТОК



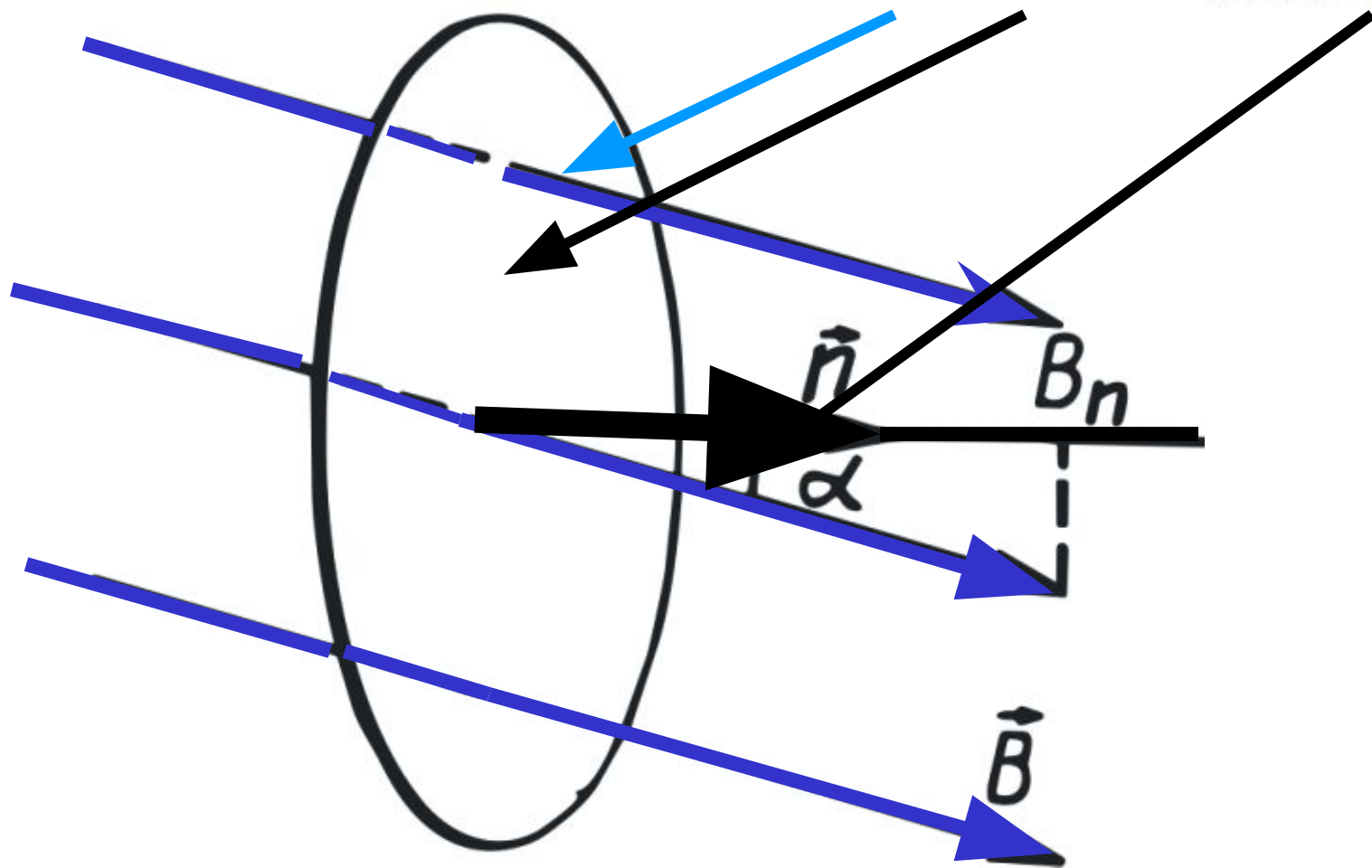
Опыт Фарадея с катушками



**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**

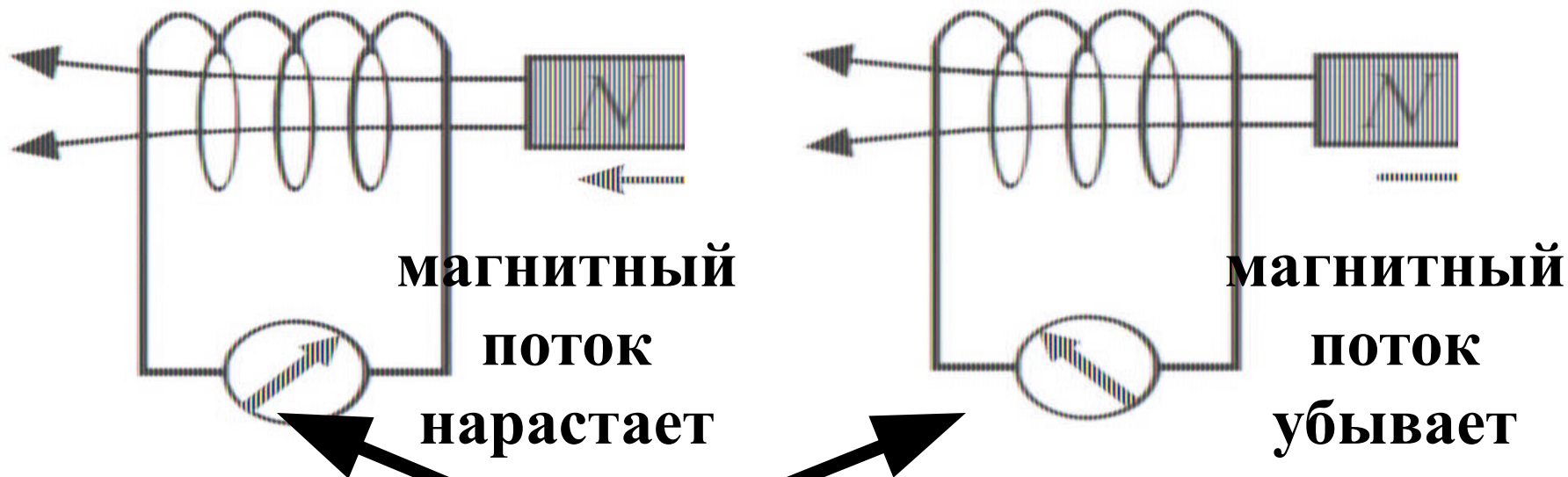
$$\left[\frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \right] = \frac{Вб}{с}$$

Закон электромагнитной индукции

- ЭДС индукции прямо пропорциональна скорости изменения магнитного потока

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

Закон электромагнитной ИНДУКЦИИ



направление индукционного тока

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

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

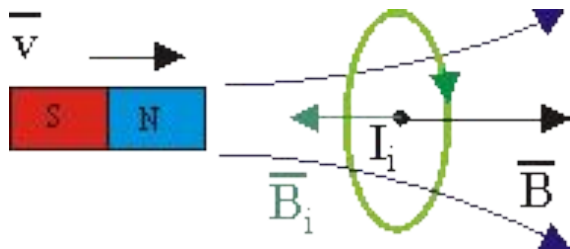
В явлениях электромагнитной индукции действует важный закон - закон Ленца.

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 $B_{\text{внеш}}$

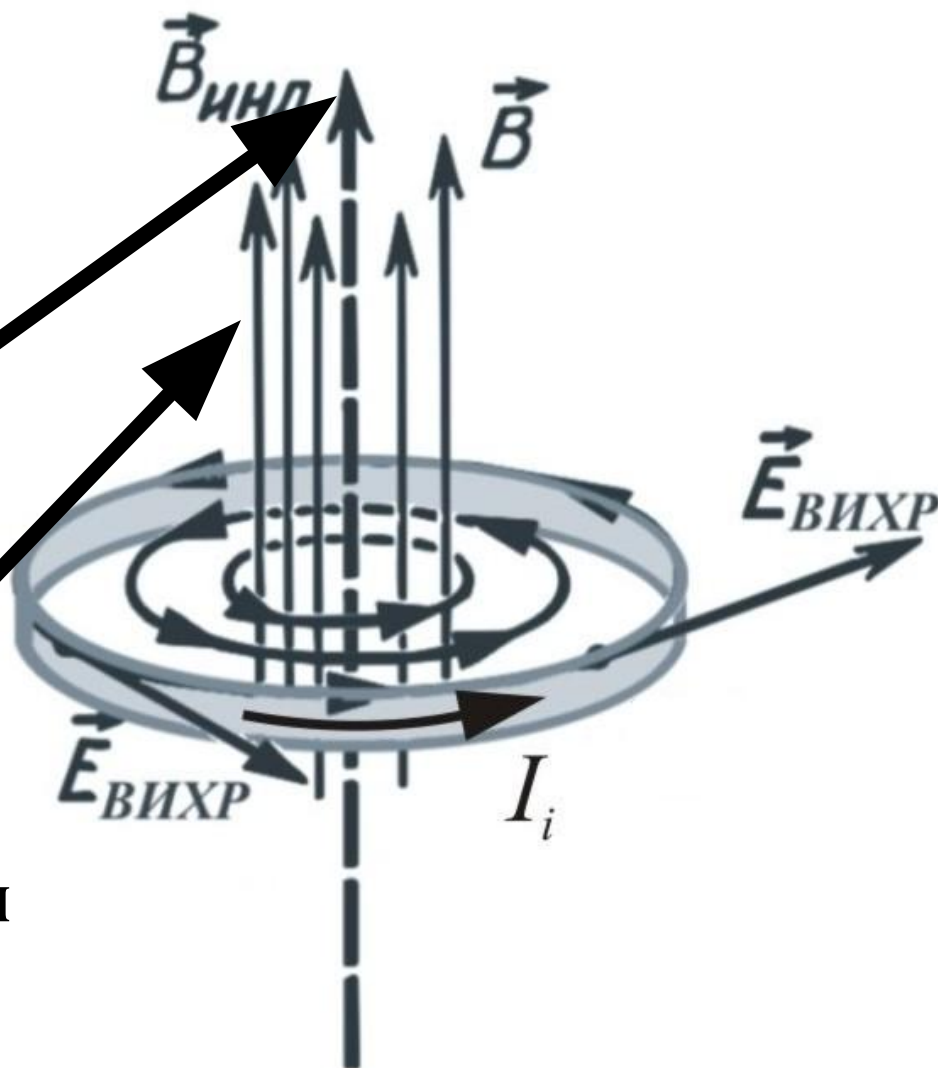
Знак ЭДС индукции

$$\varepsilon_i > 0$$

если
направления

вектора магнитной
индукции
индукционного тока

вектора магнитной
индукции внешнего поля
совпадают



Знак ЭДС индукции

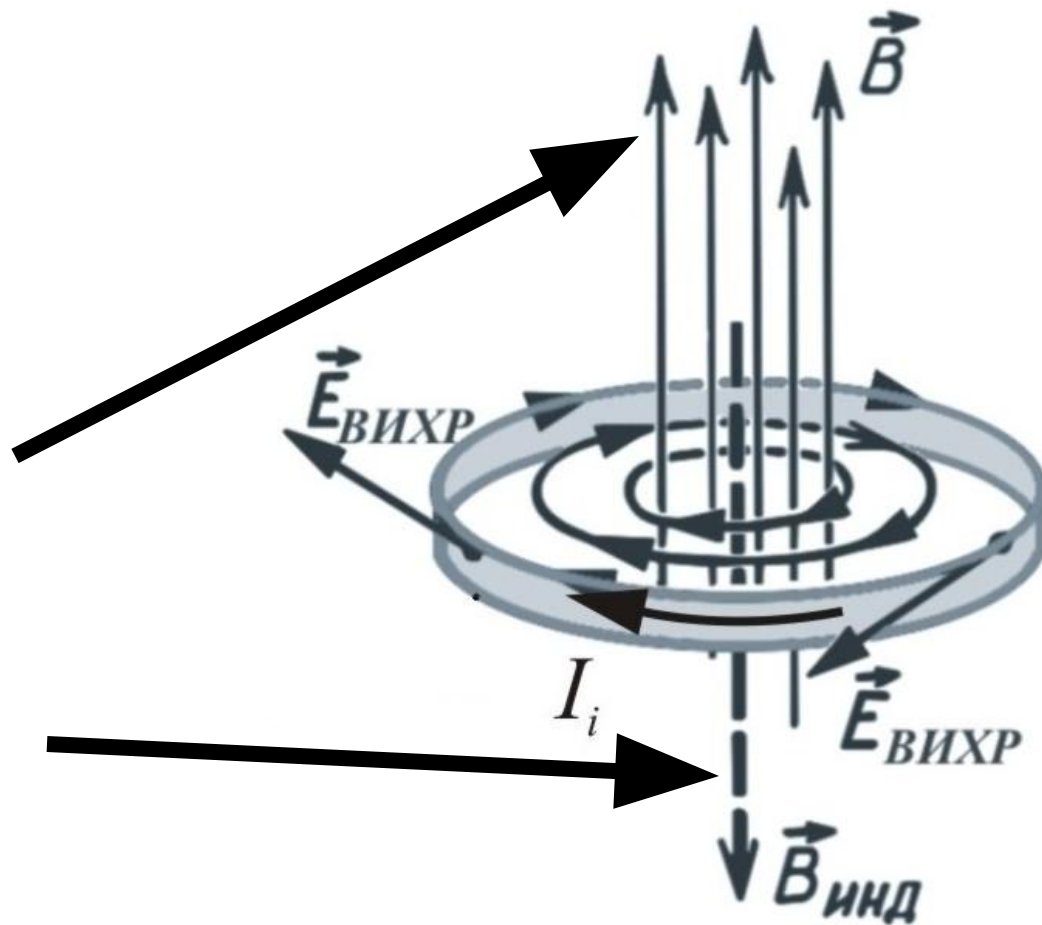
$$\varepsilon_i < 0$$

если
направления

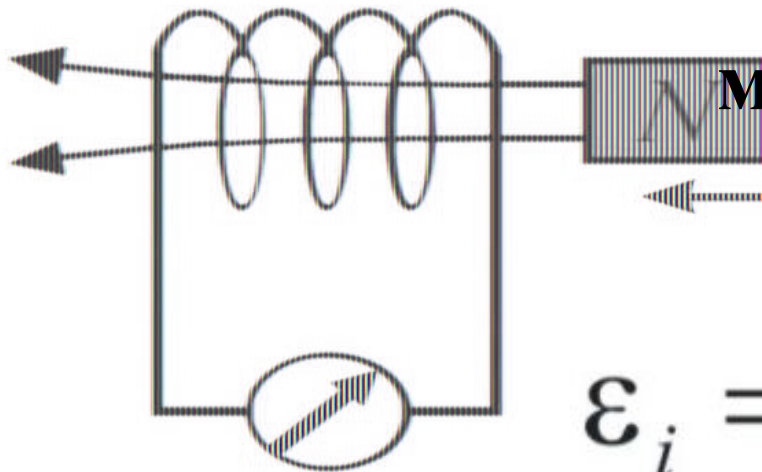
вектора магнитной
индукции внешнего
поля

вектора магнитной
индукции
индукционного тока

противоположны



Знак ЭДС индукции



магнитный поток нарастает

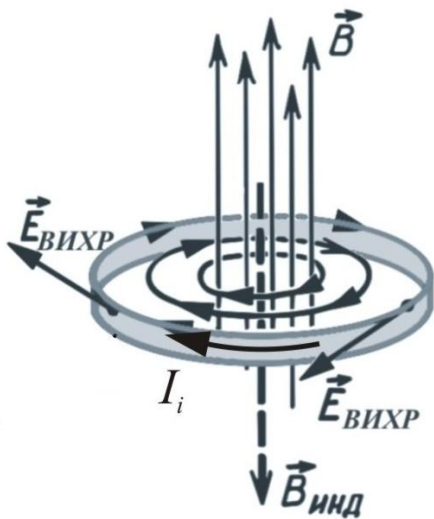
$$\varepsilon_i = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

$$\Phi_2 > \Phi_1$$

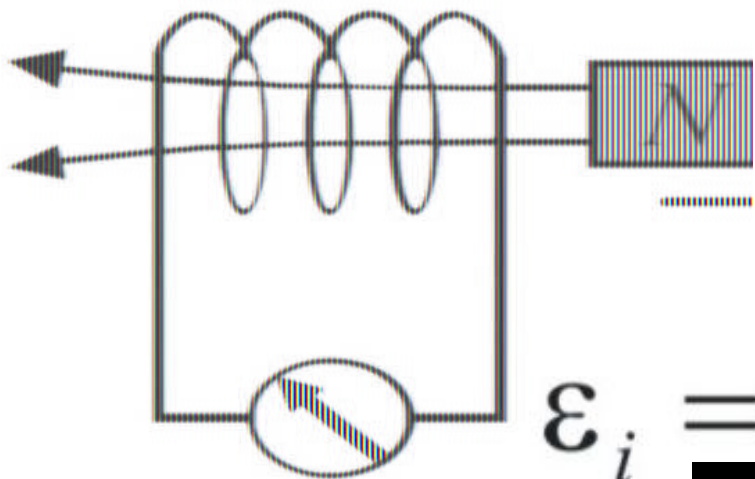
$$\Delta \Phi > 0$$

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

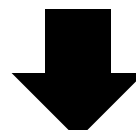
$$\varepsilon_i < 0$$



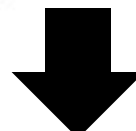
Знак ЭДС индукции



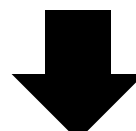
магнитный поток убывает



$$\Phi_2 < \Phi_1$$

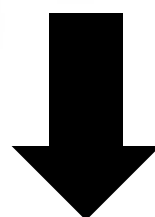


$$\Delta\Phi < 0$$

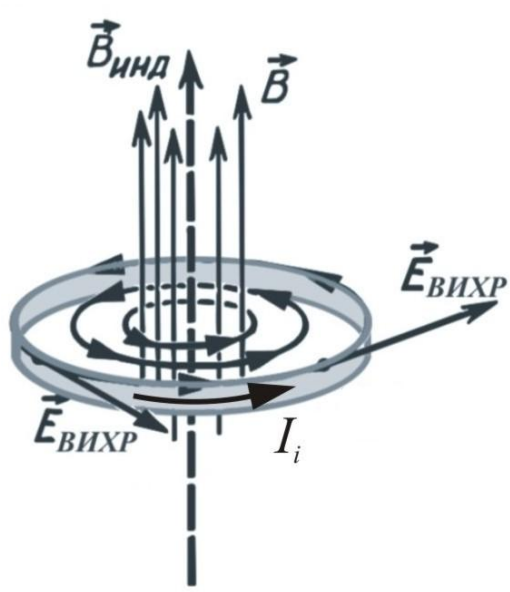


$$\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} < 0$$

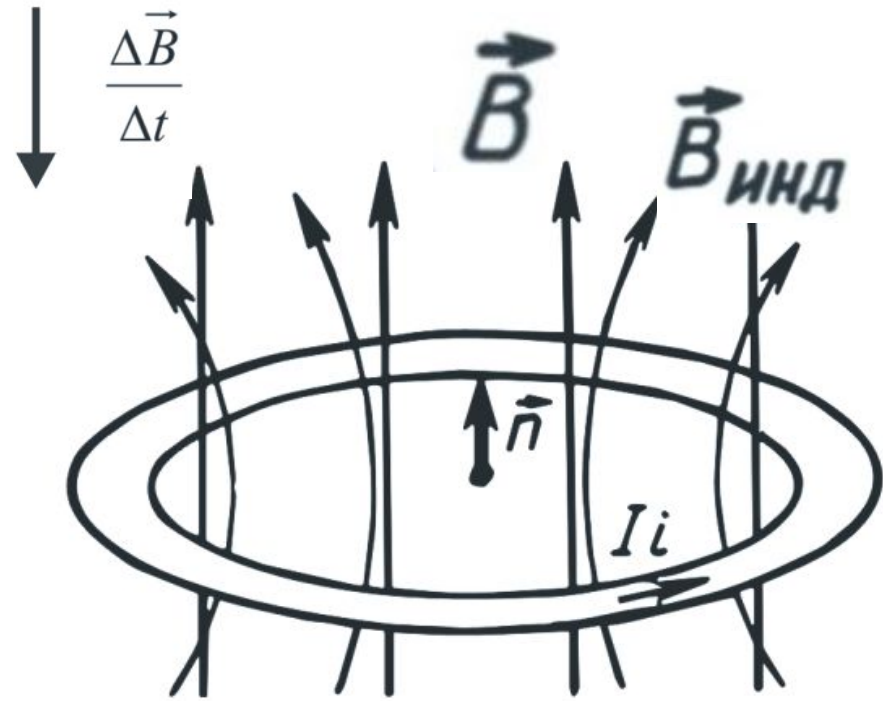
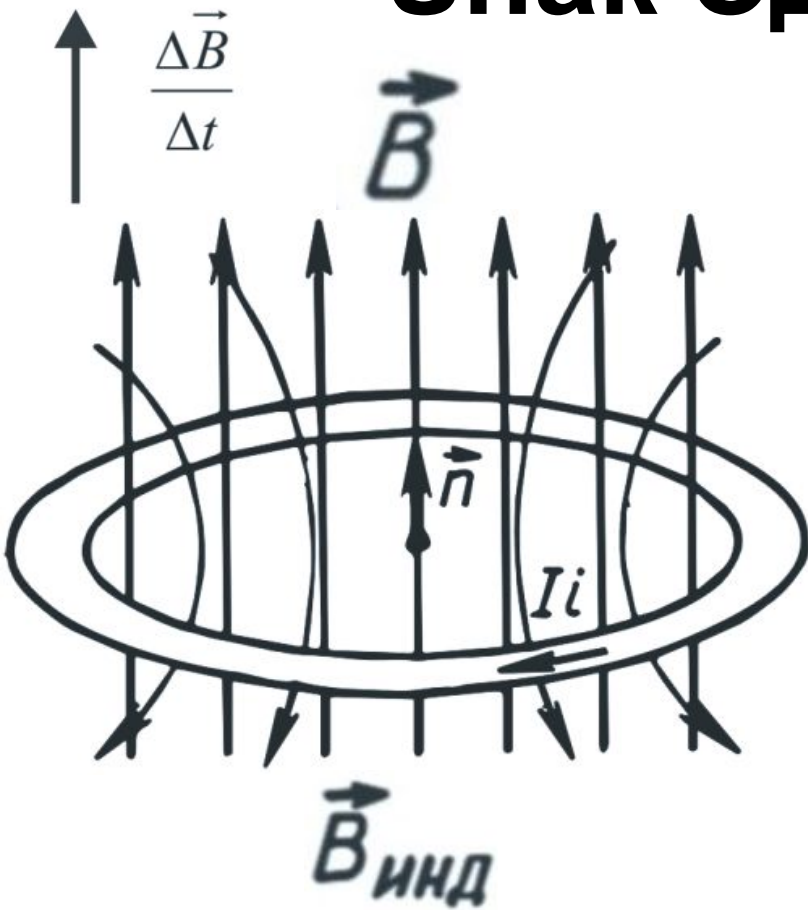
$$\varepsilon_i = - \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$



$$\varepsilon_i > 0$$



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

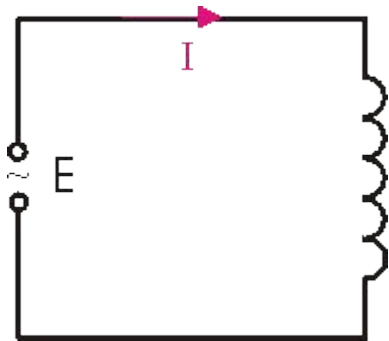
характера изменения магнитного

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 Φ . 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 Φ_c . Изменение величины Φ_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 μ .

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 Φ_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:

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