

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

Лекция 22.

Тема: Магнитный поток. Закон Фарадея. Самоиндукция

Учебник:

Трофимова Т.И. Курс физики : учеб. пособ. для вузов / Т. И. Трофимова. - М.: Академия, 2007.- с. **221-233**.

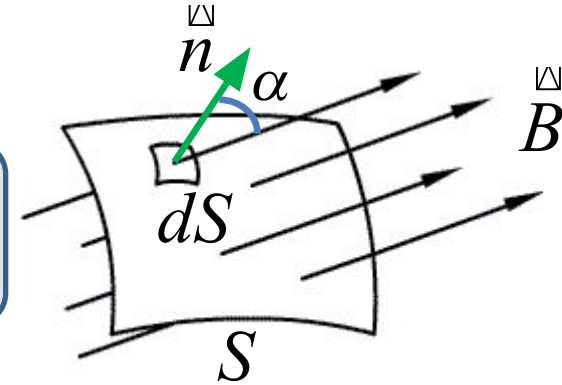
к.ф.-м.н.
Куручкин А.

Поток вектора магнитной индукции

Потоком вектора магнитной индукции \vec{B} (магнитным потоком) через малую поверхность площадью dS называется скалярная физическая величина, равная

$$\Phi_B = B dS = B dS \cos \alpha$$

$$dS = dS \cdot \vec{n}$$



Магнитный поток Φ_B через произвольную замкнутую поверхность S равен

$$\Phi_B = \int_S B dS = \int_S B dS \cos \alpha$$

$$[\Phi_B] = \text{Вб (вебер)}$$

Теорема Гаусса для вектора магнитной индукции

Отсутствие в природе магнитных зарядов приводит к тому, что линии вектора B не имеют ни начала, ни конца. Поэтому поток вектора B через замкнутую поверхность должен быть равен нулю.

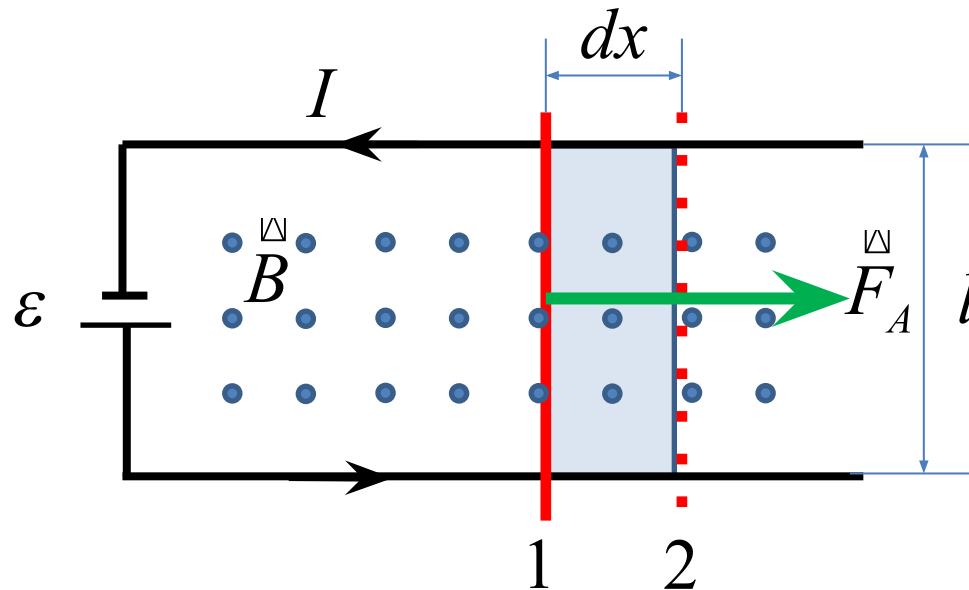
$$\oint_S B dS \equiv 0$$

Линии магнитной индукции замкнуты, поэтому число линий, входящих в некоторый объем пространства, равно числу линий, выходящих из этого объема.

Если входящие потоки брать с одним знаком, а выходящие — с другим, то суммарный поток вектора магнитной индукции через замкнутую поверхность будет равен нулю.

Работа по перемещению проводника с током в магнитном поле

В однородном магнитном поле находится проводник длиной l , который может свободно перемещаться. Поле направлено перпендикулярно плоскости рисунка – к «нам».



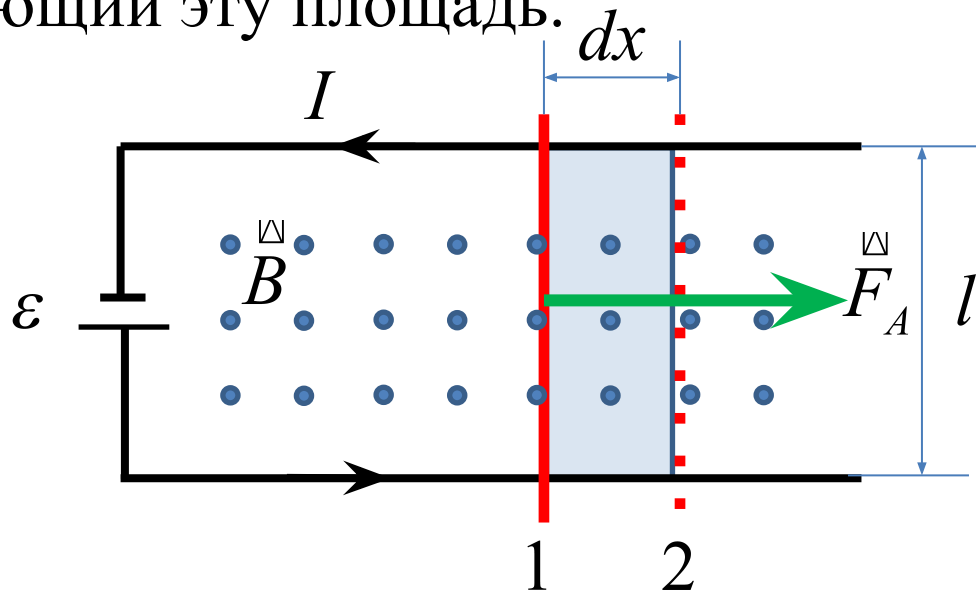
Под действием силы Ампера $F=IBl$, проводник переместился из положения 1 в положение 2 на dx .

Работа, совершаемая магнитным полем:

$$dA = F dx = I [l \times B] dx = (IlB \sin \varphi) dx \cos \alpha =$$

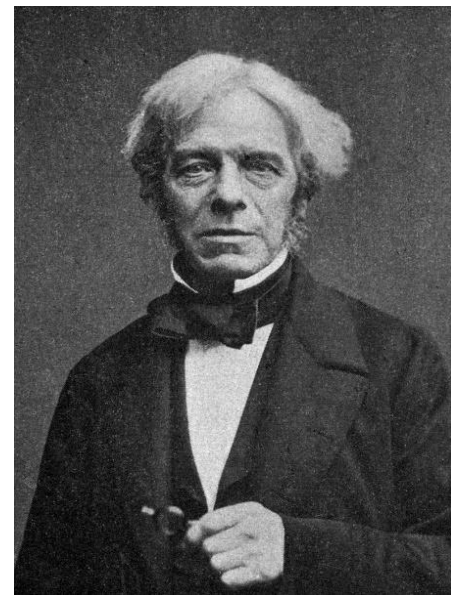
$$= (IlB \sin 90^\circ) dx \cos 0^\circ = I B dl S = Id \frac{\Phi}{B},$$

- где $dS=ldx$ – площадь, пересекаемая проводником при его перемещении в магнитном поле;
- $d\Phi=BdS$ – поток вектора магнитной индукции, пронизывающий эту площадь.



Электромагнитная индукция

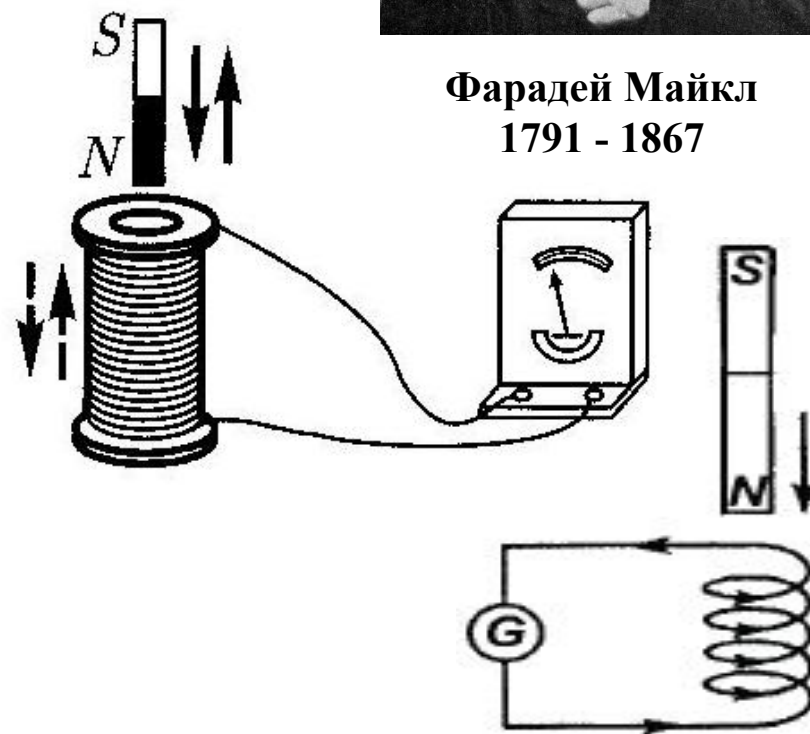
Опыты Фарадея



Фарадей Майкл
1791 - 1867

Опыт 1. Соленоид подключен к гальванометру.

Если в соленоид **вдвигать** (или **выдвигать**) постоянный магнит, то в моменты вдвигания (или выдвигания) наблюдается **отклонение** стрелки гальванометра, т.е. в соленоиде индуцируется ЭДС.

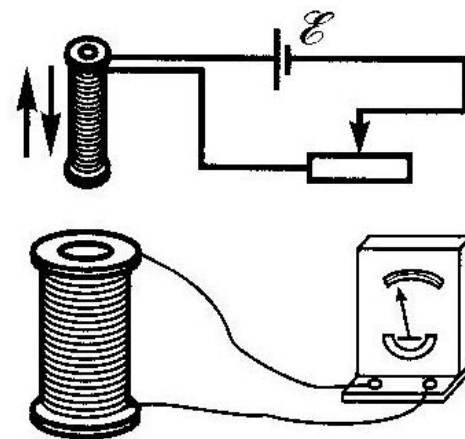


- Направление отклонения стрелки при вдвигании и выдвигании противоположны.
- Если постоянный магнит развернуть так, чтобы полюса поменялись местами, то и направление отклонения стрелки изменится на противоположное.
- Отклонение стрелки гальванометра тем больше, чем больше скорость движения магнита относительно соленоида.
- Такой же эффект будет, если постоянный магнит оставить неподвижным, а относительно его перемещать соленоид.

Опыт 2. Один соленоид подключен к источнику тока.
Другой соленоид подключен к гальванометру.

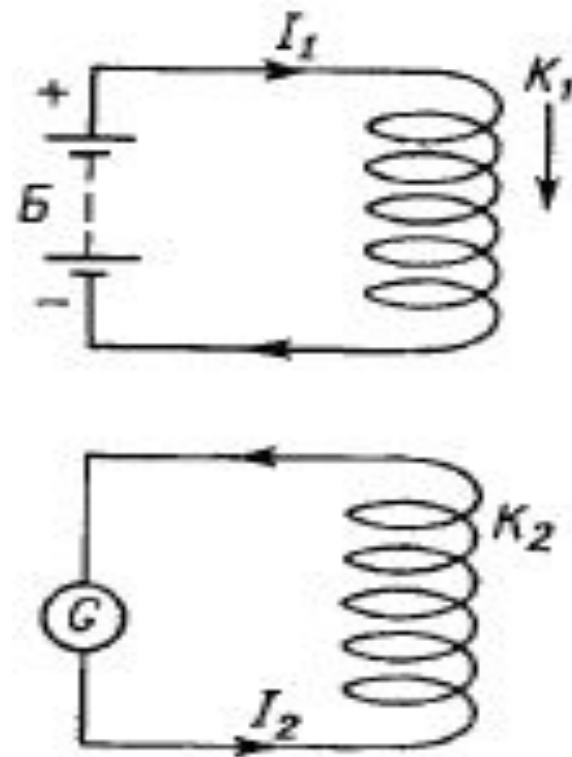
Отклонение стрелки гальванометра наблюдается:

- 1) в моменты включения или выключения тока;
- 2) в моменты его увеличения или уменьшения;
- 3) при перемещении катушек друг относительно друга.



При **включении** и **выключении** стрелка отклоняется в разные стороны, т.е. знак индуцированной ЭДС в этих случаях различен.

Такой же эффект – наведение в катушке ЭДС **различного знака** – наблюдается при увеличении или уменьшении тока в катушке, при сближении или удалении катушек.



Явление электромагнитной индукции

В опытах Фарадея было открыто явление электромагнитной индукции.

В замкнутом проводящем контуре при изменении потока магнитной индукции, охватываемого этим контуром, возникает индукционный электрический ток.

Свойства индукционного тока

1. Индукционный ток возникает всегда, когда происходит изменение сцепленного с контуром потока магнитной индукции.
2. Сила индукционного тока не зависит от способа изменения потока магнитной индукции, а определяется скоростью его изменения.

Закон Фарадея

Экспериментальные факты. В опытах Фарадея при любом изменении потока магнитной индукции, сцепленного с контуром, всегда возникал индукционный ток.

О чём это говорит? Возникновение индукционного тока указывает на наличие в цепи электродвижущей силы.

Эта ЭДС называется электродвижущей силой электромагнитной индукции \mathcal{E}_i .

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

$$\varepsilon_i = - \frac{d\Phi_B}{dt} \quad \left[B = \frac{B\delta}{\delta} \right]$$

Обсуждение знака «-». Он показывает, что **увеличение магнитного потока** $\left(\frac{d\Phi}{dt} > 0 \right)$ вызывает ЭДС $\varepsilon_i < 0$, т.е. поле индукционного тока направлено навстречу потоку;
уменьшение магнитного потока $\left(\frac{d\Phi}{dt} < 0 \right)$ вызывает $\varepsilon_i > 0$, т.е. направления потока и поля индукционного тока совпадают.

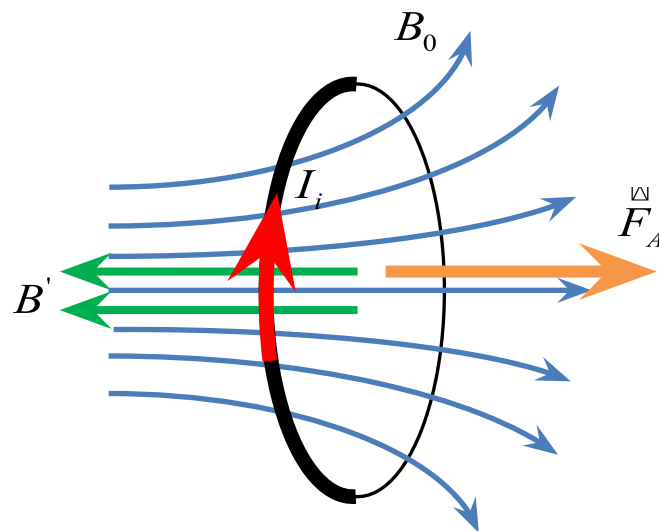
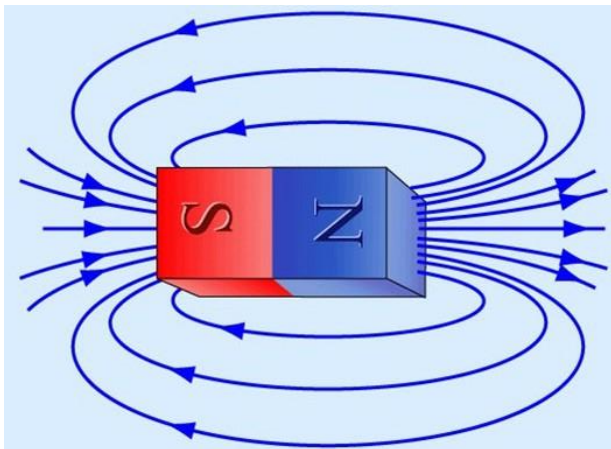
Направление индукционного тока. Правило Ленца



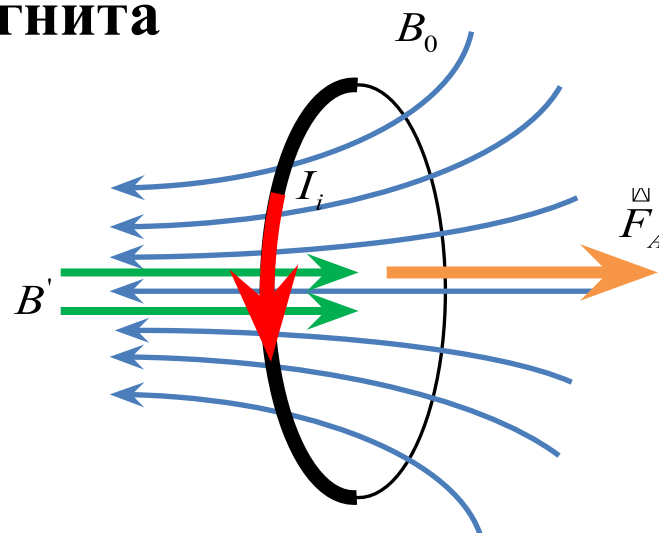
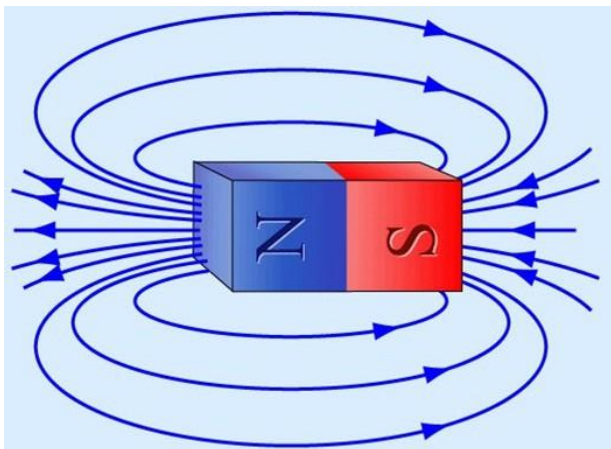
Ленц
Эмилий Христианович
1804 - 1865

Индукционный ток в контуре всегда принимает такое направление, что созданное им магнитное поле препятствует изменению магнитного потока, вызывающему данный индукционный ток.

Металлическое кольцо приближается к северному полюсу постоянного магнита



Металлическое кольцо приближается к южному полюсу постоянного магнита



Магнитное поле возрастает

1. Возрастает магнитная индукция
2. Возрастает магнитный поток

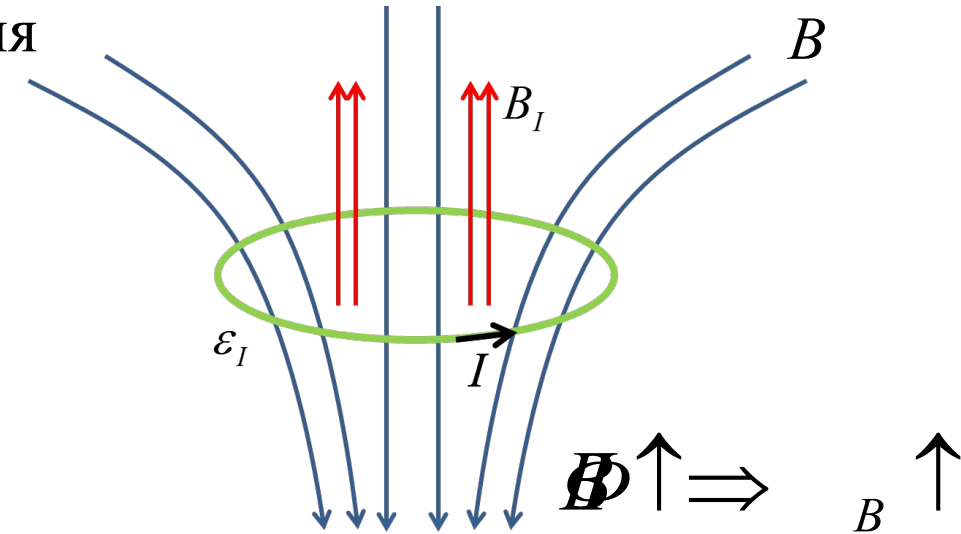
$$\Phi_B = \int_S \vec{B} d\vec{S}$$

3. Согласно закону Фарадея

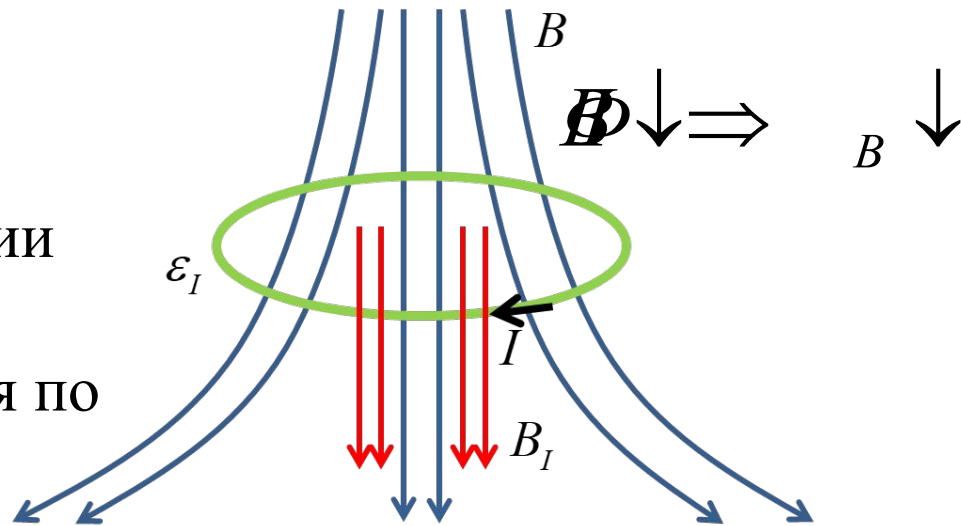
$$\mathcal{E}_i = - \frac{d\Phi_B}{dt},$$

в контуре возникает ЭДС индукции

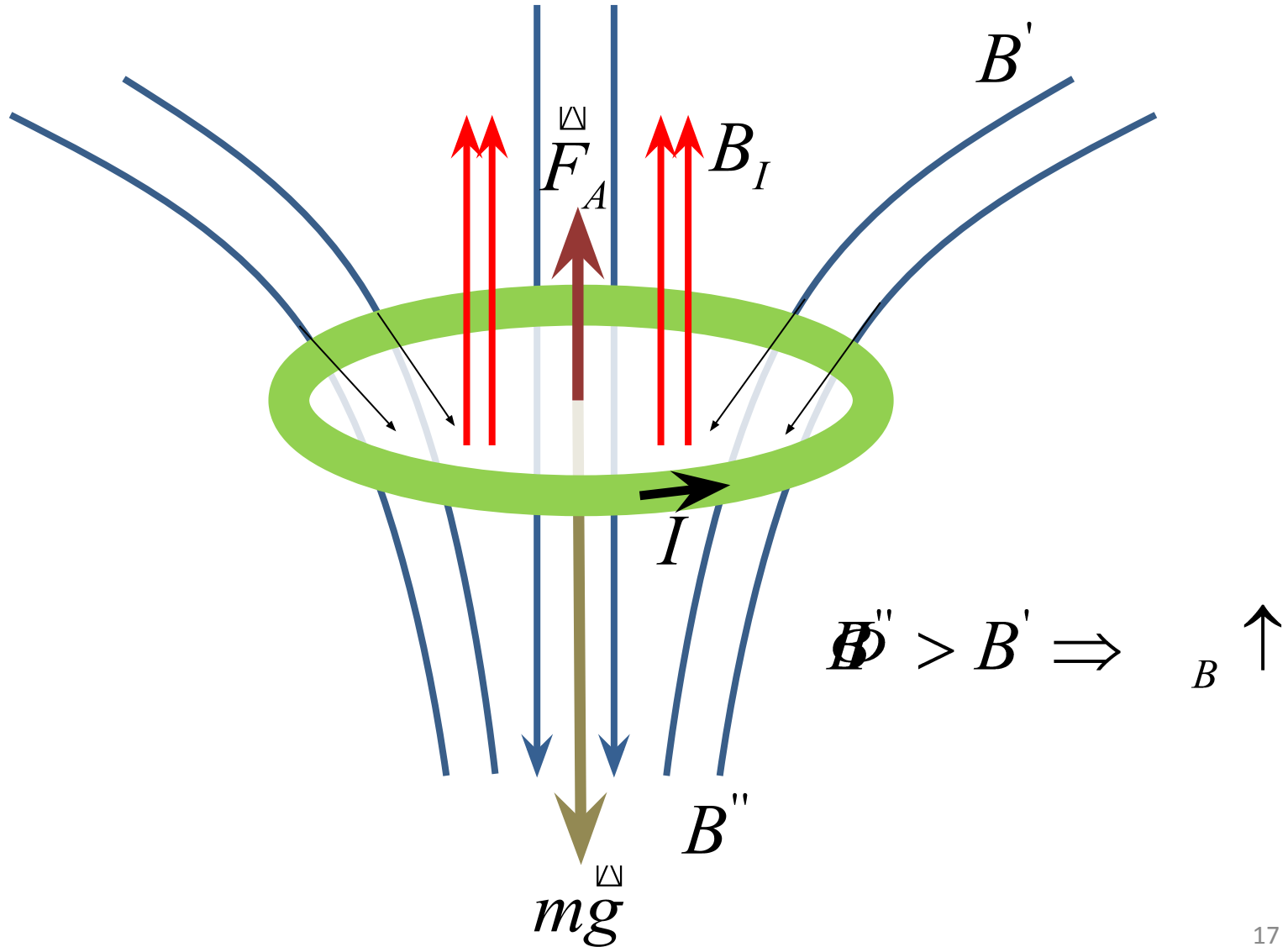
4. Возникает индукционный ток
5. Направление тока определяется по правилу Ленца



Магнитное поле убывает



Падение тел (проводящего кольца) в неоднородном магнитном поле

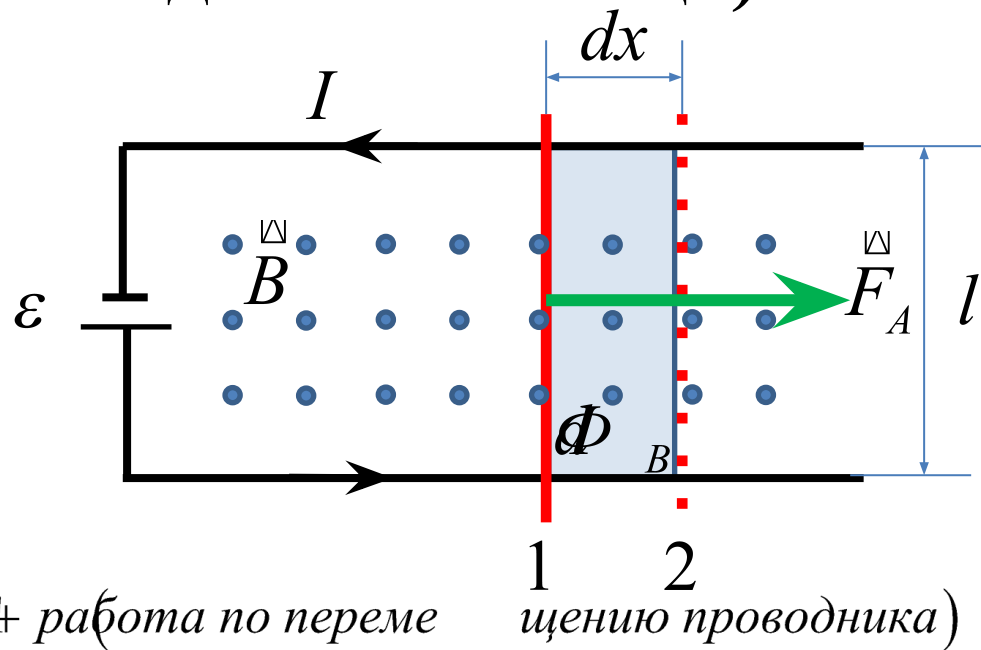


Закон Фарадея (вывод Гельмгольца)

1. Под действием F_A проводник переместится на dx
2. Сила Ампера совершит работу

$$dA = Id \ B$$

3. Воспользуемся законом сохранения энергии



dA (точника тока) dQ (теплота) dA (работа по переме- щению проводника)



$$\varepsilon = \frac{dA_{cm.cул}}{dq} = \frac{dA_{cm.cул}}{Idt}$$

$$\mathcal{E} dt = I^2 R dt + Id$$

$$\mathcal{E} dt - R Idt = Id^2 \quad | \div$$

$$\boxed{\varepsilon - \frac{\Phi}{dt}} = \boxed{IR} \quad \text{- закон Ома}$$

Сумма действующих ЭДС в цепи

Падение напряжения на сопротивлении

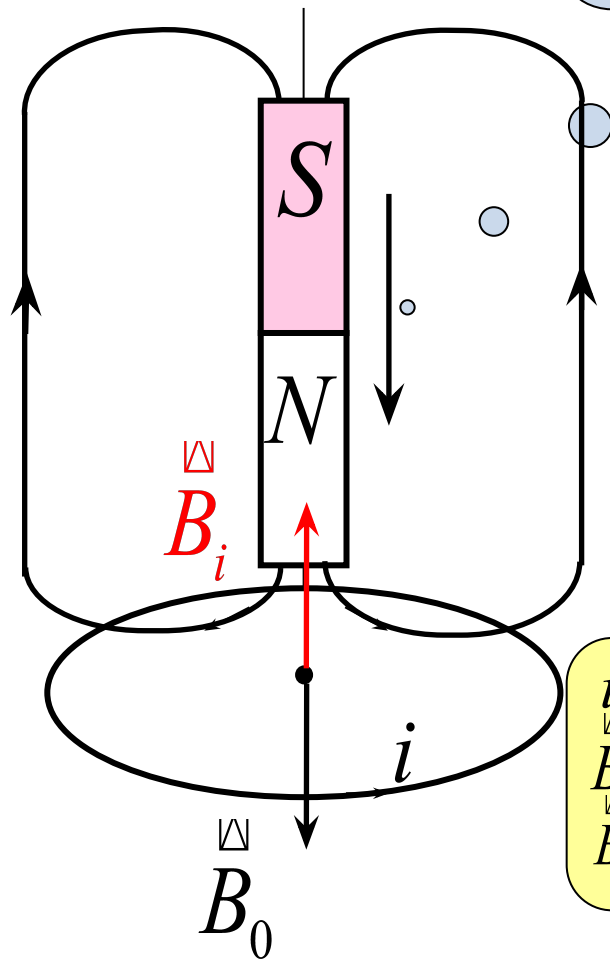
$$\varepsilon_i = - \frac{\Phi}{dt} \quad \text{- закон Фарадея}$$



Гельмгольц
Герман Людвиг
Фердинанд

Иллюстрация правила Ленца.

Движение
магнита

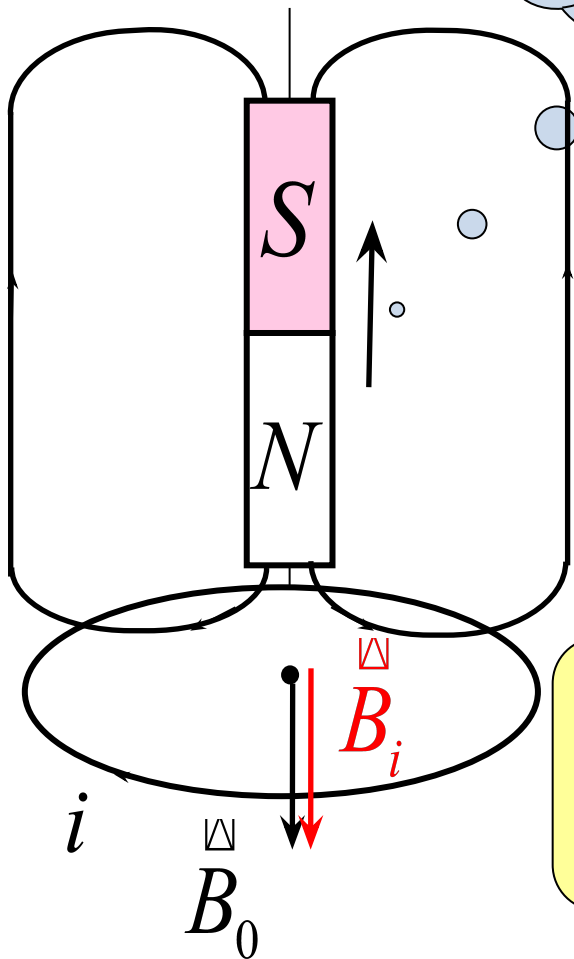


**Магнитное поле
индукционного тока**
направлено **навстречу**
внешнему полю,
если поток вектора индукции
внешнего **магнитного поля**
возрастает со временем
(препятствует возрастанию).

i – **индукционный ток**;
 B_i – **магнитное поле индукционного тока**;
 B_0 – **внешнее магнитное поле**.

Иллюстрация правила Ленца.

Движение
магнита



**Магнитное поле
индукционного тока**
направлено **по**
внешнему полю,
если поток вектора индукции
внешнего **магнитного поля**
убывает со временем
(препятствует убыванию).

i — **индукционный ток**;
 B_i — **магнитное поле индукционного тока**;
 B_0 — **внешнее магнитное поле**.

Вихревые токи (токи Фуко)

Вихревой ток - это индукционный ток, возникающий в массивных сплошных проводниках, помещенных в переменное магнитное поле.

Они оказываются замкнутыми в толще проводника и поэтому называются вихревыми.



Фуко Леон
(1819 – 1868)

Тепловое действие токов Фуко используется в **ИНДУКЦИОННЫХ печах** при плавке металла или приготовлении пищи.

Такая печь является большой катушкой, питаемой высокочастотным током большой силы.

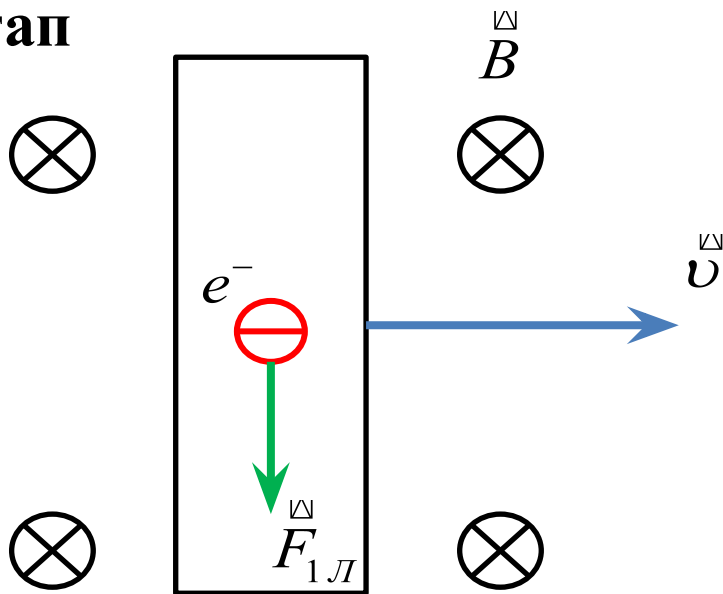
Катушка создает переменный магнитный поток через помещенный в печь образец, а возникающие токи Фуко разогревают последний.

Природа ЭДС электромагнитной индукции

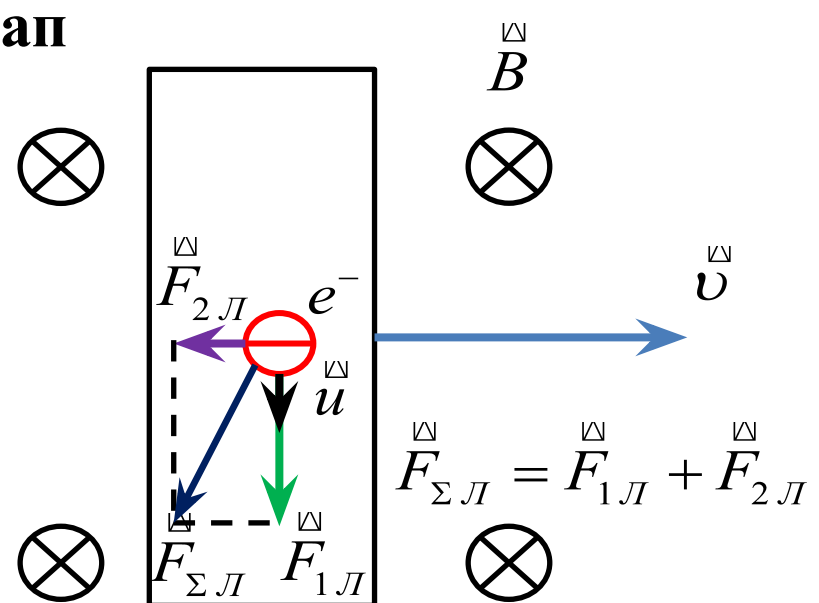
1. Движущийся проводник

При движении проводника в постоянном магнитном поле на электроны внутри проводника действует сила Лоренца.

1 этап



2 этап



Возбуждение ЭДС индукции при движении контура в постоянном магнитном поле объясняется действием силы Лоренца, возникающей при движении проводника.

2. **Неподвижный проводник.**

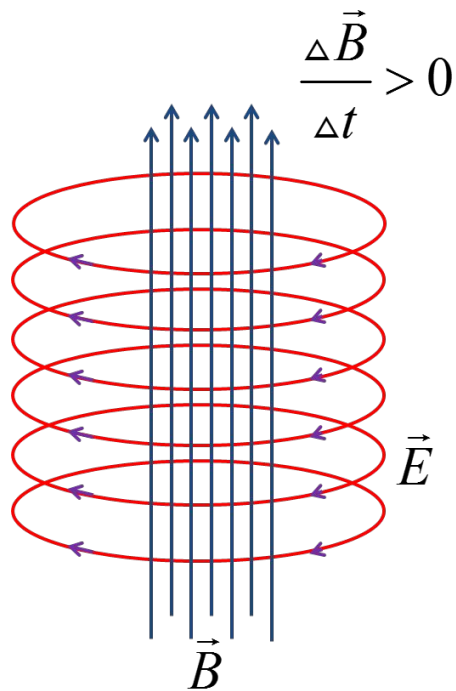
Мы знаем, что сила Лоренца на неподвижные заряды не действует.



**Максвелл
Джеймс Клерк**

Предположение Максвелла

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



Вихревое электрическое поле:

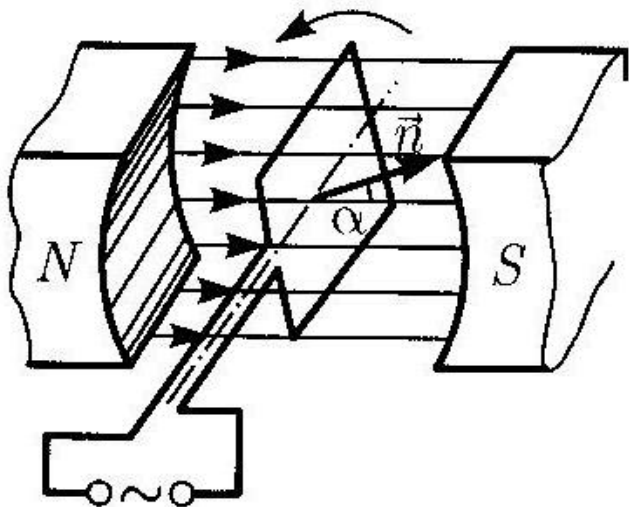
1. **не** является электростатическим;
2. возбуждается изменениями магнитного поля;
3. имеет непрерывные силовые линии.

Циркуляция $\oint_L \vec{E}_B$ вихревого электрического поля по любому контуру L проводника представляет собой ЭДС электромагнитной индукции:

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

Вращение рамки в магнитном поле

Рамка вращается равномерно с угловой скоростью $\omega = \frac{\alpha}{t} = const$



Магнитный поток, сцепленный с рамкой площадью S , в любой момент времени t равен

$$\Phi = BS \cos \alpha = BS \cos \omega t,$$

α – угол поворота рамки в момент времени t .

При равномерном вращении рамки в однородном магнитном поле в ней возникает переменная ЭДС, изменяющаяся по гармоническому закону.

$$\varepsilon_i = -\frac{d\Phi}{dt} = BS\omega \sin \omega t$$

Индуктивность контура

Электрический ток, текущий в замкнутом контуре, создаёт вокруг себя магнитное поле, индукция которого, по закону Био-Савара-Лапласа, пропорциональна току.

$$B \propto I$$

Сцепленный с контуром магнитный поток
пропорционален току в контуре

$$\Phi_B = LI$$

[L]=генри) - **индуктивность контура.**

Потокосцепление соленоида (полный магнитный поток сквозь соленоид)

$$\Phi_{\Sigma} = NBS = \mu\mu_0 \frac{N^2 I}{l} S,$$

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

N – число витков соленоида,

l – его длина,

S – площадь,

μ_0 – магнитная постоянная,

μ – магнитная проницаемость сердечника.

Индуктивность контура зависит от:

- геометрической формы контура;
- размеров контура;
- магнитной проницаемости той среды, в которой он находится.

Явление самоиндукции

При изменении силы тока в контуре будет изменяться и сцепленный с ним магнитный поток, а это, в свою очередь, будет индуцировать ЭДС в этом контуре.

Явление возникновения ЭДС индукции в замкнутом проводящем контуре вследствие изменения тока, текущего в этом контуре называется **явлением самоиндукцией.**

ЭДС самоиндукции (закона Фарадея):

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

Если контур не деформируется и магнитная проницаемость среды не изменяется, то $L=const$ и ЭДС самоиндукции

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

знак « - », обусловленный **правилом Ленца**, показывает, что **наличие индуктивности в контуре приводит к замедлению изменения тока в нем.**

- **Если ток со временем возрастает**, то $\varepsilon_s < 0$, т.е. ток самоиндукции направлен навстречу току, обусловленному внешним источником, и замедляет его возрастание.
- **Если ток со временем убывает**, то $\varepsilon_s > 0$, т.е. ток самоиндукции имеет такое же направление, как и убывающий ток в контуре, и замедляет его убывание.

Вывод:

Контур, обладая определённой **индуктивностью L** , приобретает электрическую «инертность».

Токи при замыкании и размыкании цепи

- При замыкании цепи ЭДС самоиндукции вызывает ток, препятствующий увеличению основного тока в цепи, что делает конечной скорость роста силы тока.
- При размыкании цепи ЭДС самоиндукции вызывает ток, препятствующий уменьшению основного тока в цепи, что делает конечной скорость убывания тока.

Если бы не ЭДС самоиндукции, то при замыкании цепи ток мгновенно нарастал бы до своего стационарного значения, а при размыкании цепи, мгновенно убывал бы до нуля.

Размыкание цепи. Рассмотрим цепь сопротивлением R и индуктивностью L . Под действием ЭДС ε в ней течёт постоянный ток

$$I_0 = \frac{\varepsilon}{R}.$$

В момент времени $t=0$ **отключим** источник тока. Возникает ЭДС

самоиндукции $\varepsilon_s = -L \frac{dI}{dt}$, **препятствующая уменьшению тока.**

Ток в цепи определяется законом Ома

$$IR = \varepsilon_s,$$

или

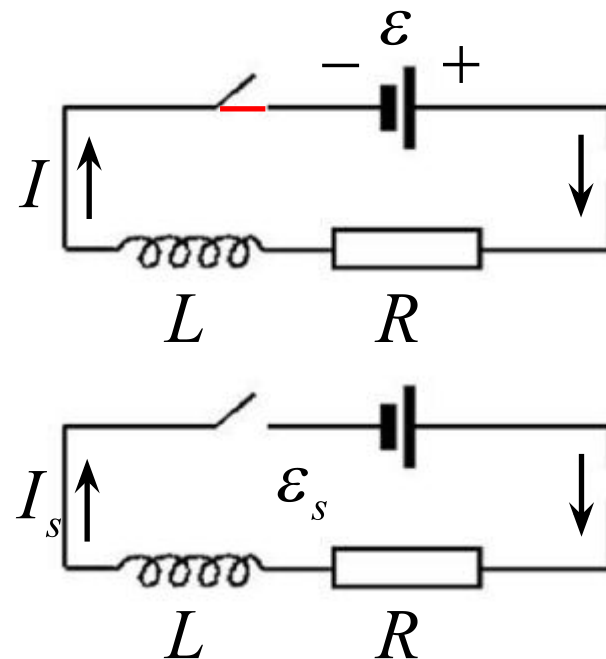
$$IR = -L \frac{dI}{dt}.$$

Разделяем переменные:

$$\frac{dI}{I} = -\frac{R}{L} dt$$

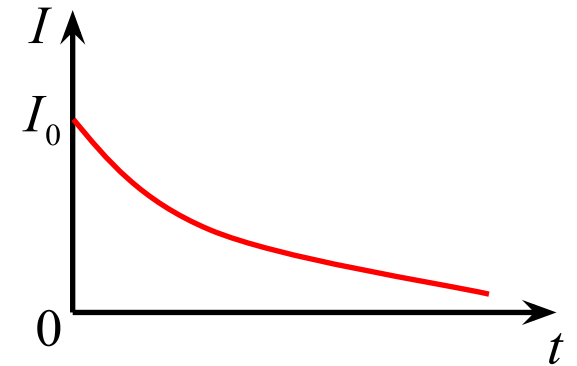
и интегрируем по I (от I_0 до I) и по t (от 0 до t):

$$\int_{I_0}^I \frac{dI}{I} = -\frac{R}{L} \int_0^t dt \Rightarrow \ln \frac{I}{I_0} = -\frac{R}{L} t.$$



Тогда

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



При выключении источника тока сила тока убывает по экспоненциальному закону (а не мгновенно).

Значение ЭДС самоиндукции при мгновенном увеличении сопротивления от R_0 до R

$$I = \frac{\varepsilon}{R_0} e^{-\frac{R}{L}t} \Rightarrow \varepsilon_s = -L \frac{dI}{dt} = \frac{R}{R_0} \varepsilon e^{-\frac{R}{L}t}$$

Вывод: при резком размыкании контура ($R \gg R_0$) ЭДС самоиндукции ε_s , может во много раз превысить ε , что может привести к пробое изоляции и выводу из строя измерительных приборов.

При замыкании цепи помимо внешней ЭДС ε возникает ЭДС самоиндукции ε_s , препятствующая возрастанию тока. По закону Ома,

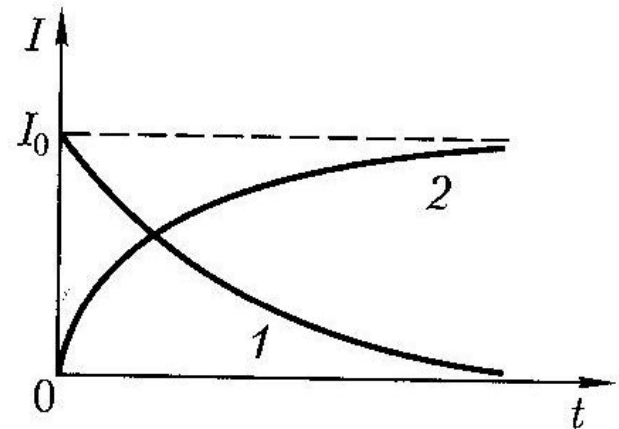
$$IR = \varepsilon + \varepsilon_s, IR = \varepsilon - L \frac{dI}{dt}.$$

Можно показать, что решение этого уравнения имеет вид

$$\text{кривая } \frac{\varepsilon}{R} \left(1 - e^{-\frac{R}{L}t} \right) = I_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right), \quad (2)$$

где

$I_0 = \frac{\varepsilon}{R}$ – установившийся ток при $t \rightarrow \infty$.



Вывод: при включении источника тока **сила тока** возрастает **по экспоненциальному закону** (а не мгновенно).

Взаимная индукция

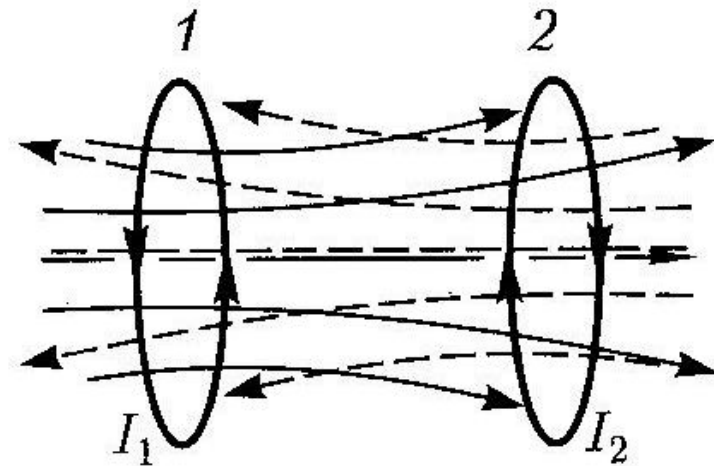
Взаимной индукцией называется явление возбуждения ЭДС электромагнитной индукции в одной электрической цепи при изменении электрического тока в другой цепи или при изменении взаимного расположения этих двух цепей.

Исходные условия. два неподвижных контура 1 и 2 с токами I_1 и I_2 , расположенных достаточно близко друг от друга. При протекании в контуре 1 тока магнитный поток пронизывает второй контур

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

Аналогично

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

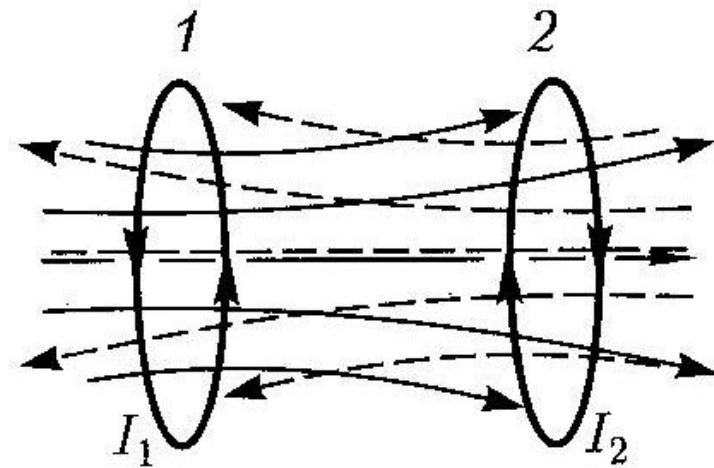


Коэффициенты пропорциональности L_{21} и L_{12} равны друг другу $L_{12}=L_{21}=L$ и называются **взаимной индуктивностью контуров**.

При изменении силы тока в одном из контуров, в другом индуцируется ЭДС

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

$$\varepsilon_{i1} = -\frac{d\Phi_{12}}{dt} = -L \frac{dI_2}{dt}.$$



Взаимная индуктивность контуров **зависит от геометрической формы, размеров, взаимного расположения контуров и от магнитной проницаемости окружающей контуры среды.**

Пример. Рассчитаем взаимную индуктивность двух катушек, намотанных на тороидальный сердечник.

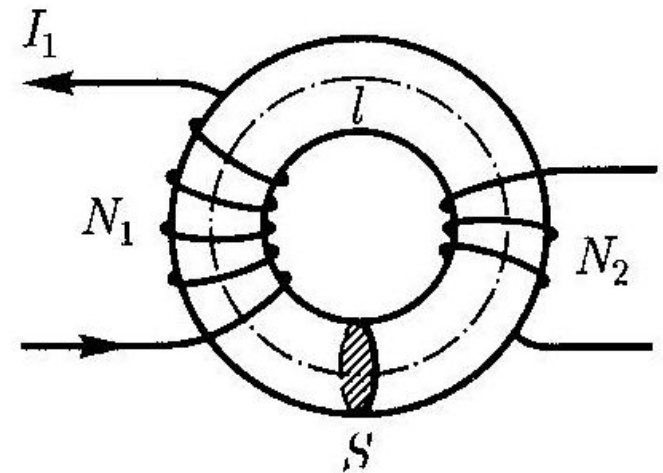
Первая катушка с числом витков N_1 и током I_1 создает поле

$$B = \mu\mu_0 \frac{N_1 I_1}{l}.$$

Магнитный поток сквозь один виток второй катушки

$$\Phi_2 = BS = \mu\mu_0 \frac{N_1 I_1}{l} S,$$

где l – длина сердечника по средней линии.

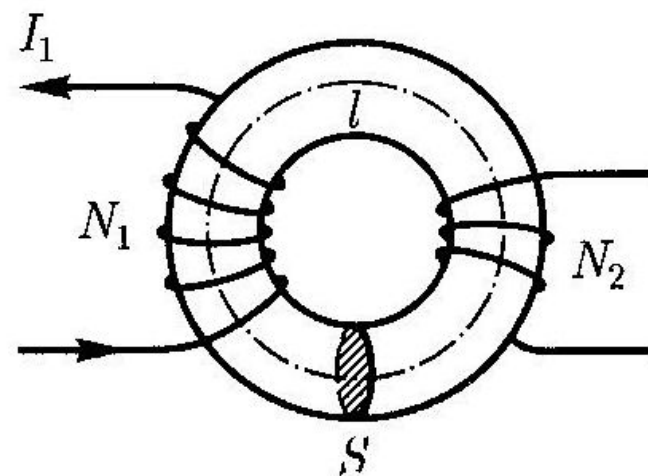


Тогда полный **магнитный поток** (потокосцепление) сквозь вторичную обмотку, содержащую N_2 витков:

$$\psi = \Phi_2 N_2 = \mu\mu_0 \frac{N_1 N_2}{l} S I_1.$$

Поскольку поток ψ создаётся током I_1 , то

$$L = \frac{\psi}{I_1} = \mu\mu_0 \frac{N_1 N_2}{l} S.$$



Данное устройство является примером **трансформатора**.

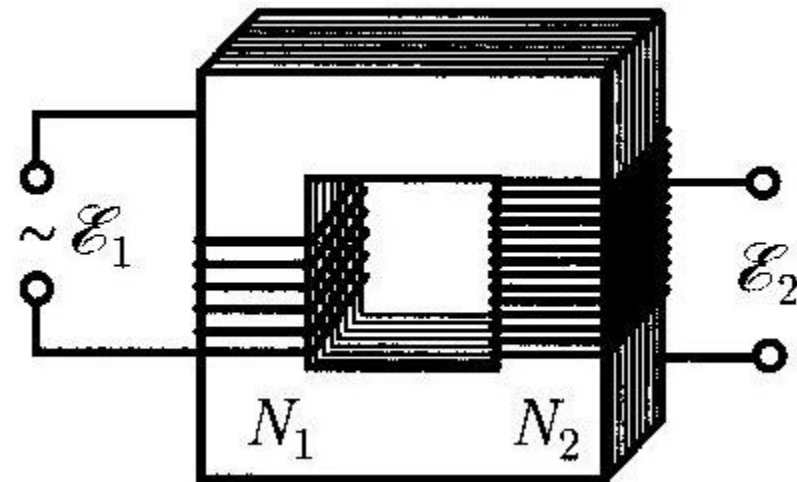
Трансформаторы

Определение. Это устройства, применяемые для повышения или понижения напряжения переменного тока. Принцип действия основан на явлении **взаимной индукции**.

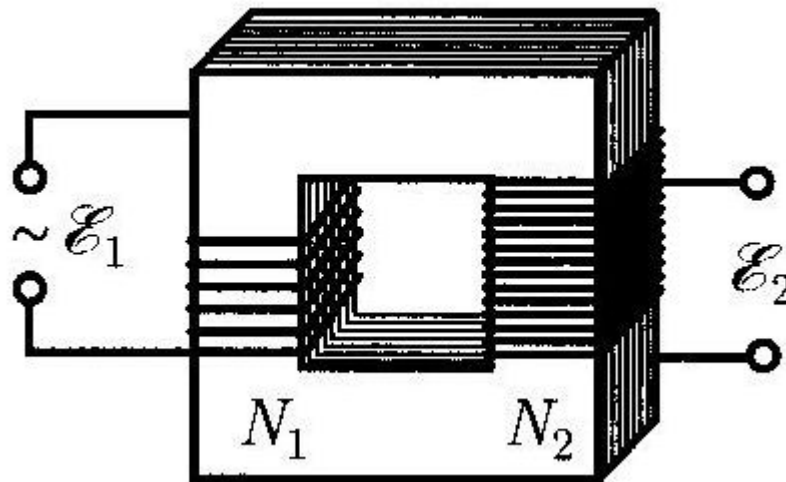
Исходные условия. **Переменный ток** I_1 , создает в первичной обмотке переменное **магнитное поле**. Это вызывает во вторичной обмотке появление ЭДС взаимной индукции. При этом

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

где N_1 и N_2 – число витков в первичной и вторичной обмотках, соответственно.



Отношение $k = \frac{N_2}{N_1}$, – показывающее, во сколько раз **ЭДС** во вторичной обмотке трансформатора больше (или меньше), чем в первичной, называется коэффициентом трансформации.



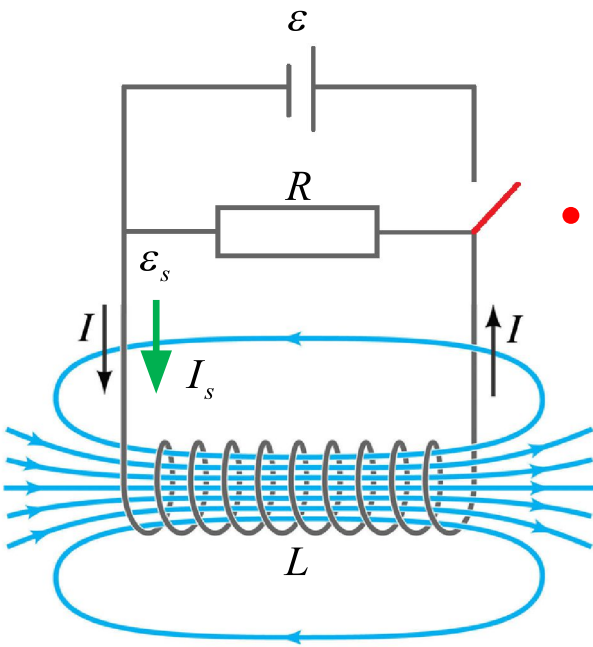
Если:

$k > 1$, то трансформатор – **повышающий**,

$k < 1$ – **понижающий**.

Энергия магнитного поля

- При замкнутом ключе в соленоиде течёт ток I ;
- При разомкнутой цепи, через сопротивление R будет течь постепенно убывающий ток, поддерживаемый возникающей в соленоиде ЭДС самоиндукции ε_s
- Работа, совершаемая этим током за время dt , равна



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

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

Следовательно, энергия магнитного поля, связанного с контуром

$$W_B = \frac{LI^2}{2}.$$

Исходные условия. Рассчитаем **магнитное поле** длинного соленоида, используя уже известные формулы:

$$\text{Индуктивность соленоида} \quad \frac{N^2 S}{l} \quad ;$$

$$\text{Магнитное поле соленоида} \quad \frac{NI}{l} \quad ;$$

$$B = \mu\mu_0 H.$$

Используя эти соотношения, получим

$$W_B = \frac{B^2}{2\mu\mu_0} V = \frac{BH}{2} V,$$

где $V=Sl$ – объём соленоида.

Магнитное поле длинного соленоида однородно и сосредоточено внутри него, поэтому энергия заключена в объеме соленоида и распределена в нем с **объемной плотностью**

$$w_B = \frac{W_B}{V} = \frac{B^2}{2\mu\mu_0} = \frac{\mu\mu_0 H^2}{2} = \frac{BH}{2}.$$

Эти соотношения носят общий характер и справедливы и для неоднородных полей, но только для сред, для которых связь между \underline{B} и \underline{H} линейная (т.е. для пара- и диамагнетиков).

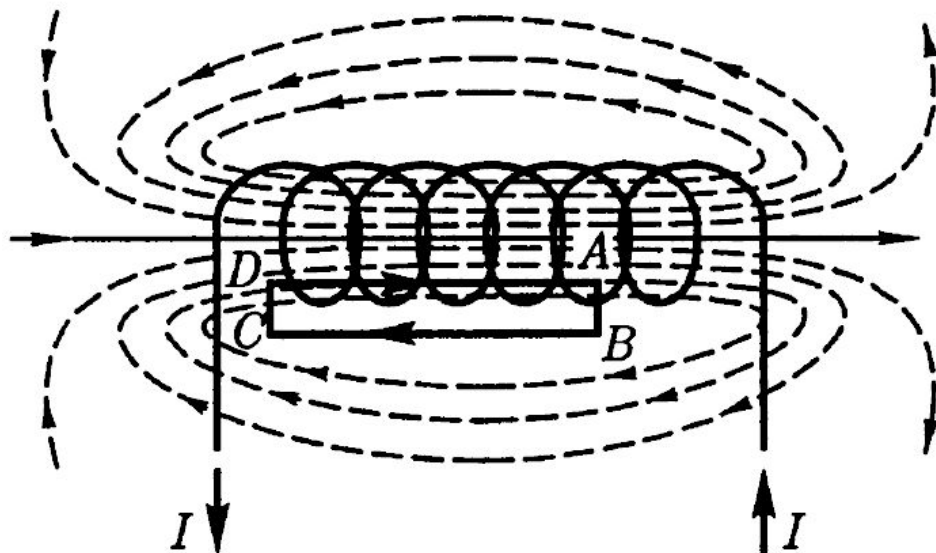
Магнитные поля соленоида и тороида

1) магнитное поле (бесконечного) соленоида в вакууме

Соленоид – свёрнутый в спираль изолированный проводник, по которому течёт электрический ток.

Исходные условия. Соленоид имеет длину l , состоит из N витков.

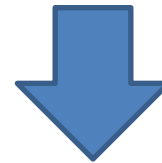
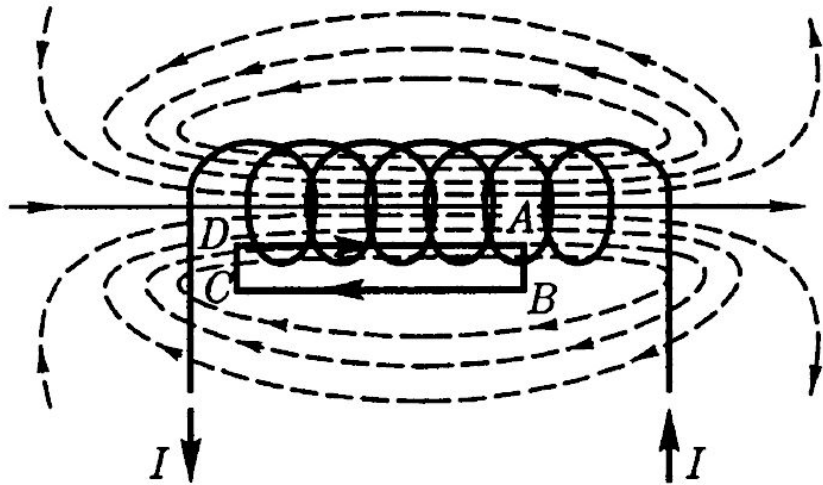
Необходимо отметить. Циркуляция вектора \vec{B} по замкнутому контуру $ABCD$, охватывающему все N витков, равна



$$\oint_{ABCD} \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \cdot N \cdot I.$$

На участках AB и CD контур перпендикулярен **линиям магнитной индукции**, следовательно, $B \cos 90^\circ = 0$. Можно показать, что вне бесконечного соленооида **магнитное поле $B=0$** . На участке DA контур совпадает с **линией магнитной индукции**, внутри соленооида поле однородно ($B \cos 0^\circ = B$), поэтому

$$\oint_{DA} B \cos 0^\circ dl = Bl = \mu_0 \cdot N \cdot I$$



$$B = \frac{\mu_0 NI}{l}$$

2) магнитное поле тороида в вакууме

Тороид - кольцевая катушка с витками, намотанными на сердечник, имеющий форму тора, по которой течет ток.

Исходные условия. **Магнитное поле** отсутствует вне тороида, а внутри его оно является **однородным**.

Необходимо отметить. **Линии магнитной индукции** есть окружности, центры которых расположены на оси тороида. В качестве контура выберем одну такую окружность радиуса r .

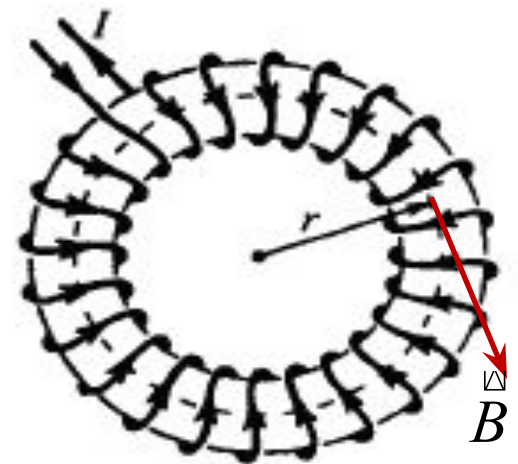
По теореме о циркуляции

$$B \cdot 2\pi r = \mu_0 NI$$



$$B = \frac{\mu_0 NI}{2\pi r}$$

N – число
витков
тороида.



Поток вектора магнитной индукции

Поток вектора магнитной индукции (магнитный поток) через площадку dS – СФВ, равная

$$\Phi_B = \int_B \vec{B} d\vec{S} = \int_B B dS \cos \alpha, \quad [\text{б (вебер)}]$$

где α – угол между векторами \vec{B} и $d\vec{S}$;

$d\vec{S} = n dS$ – вектор, модуль которого равен dS , а направление совпадает с направлением нормали n к площадке.

Поток вектора \vec{B} может быть как **положительным**, так и **отрицательным** в зависимости от знака $\cos \alpha$.

Поток вектора \vec{B} связывают с контуром, по которому течет ток. **Положительное направление** нормали к контуру связано с направлением тока по **правилу правого винта**. Поэтому магнитный поток, создаваемый контуром с током через поверхность, ограниченную им самим, всегда положителен.

Поток вектора магнитной индукции через произвольную поверхность S :

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

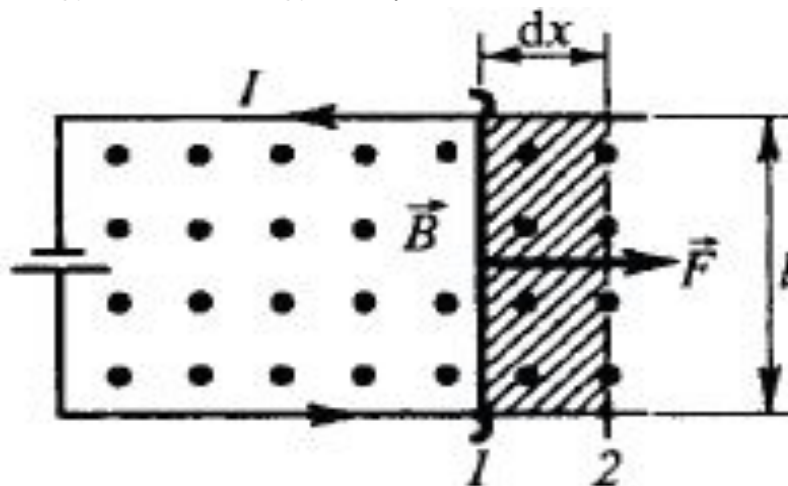
Теорема Гаусса ∇ для магнитного поля в вакууме:
поток вектора B **магнитной индукции** сквозь любую
замкнутую поверхность S равен нулю

$$\Phi_{\nabla B} = \oint_S \nabla B dS = 0.$$

Эта теорема отражает факт
отсутствия магнитных зарядов,
вследствие чего
линии магнитной индукции
не имеют ни начала, ни конца
и являются **замкнутыми**.

Работа по перемещению проводника с током в магнитном поле

Исходные данные. В однородном **магнитном поле** находится проводник длиной l , который может свободно перемещаться. Поле направлено перпендикулярно плоскости рисунка – к «нам».



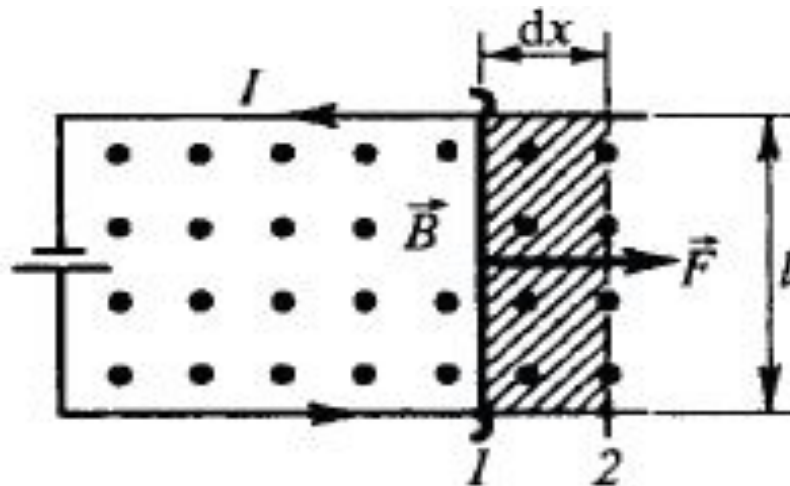
Отметим. Под действием силы Ампера $F=IlB$, проводник переместился из положения 1 в положение 2.

Работа, совершаемая **МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ**:

$$dA = \vec{F} dx = I \left[\vec{l} \times \vec{B} \right] dx = IlBdx = IBdS = \boxed{Id},$$

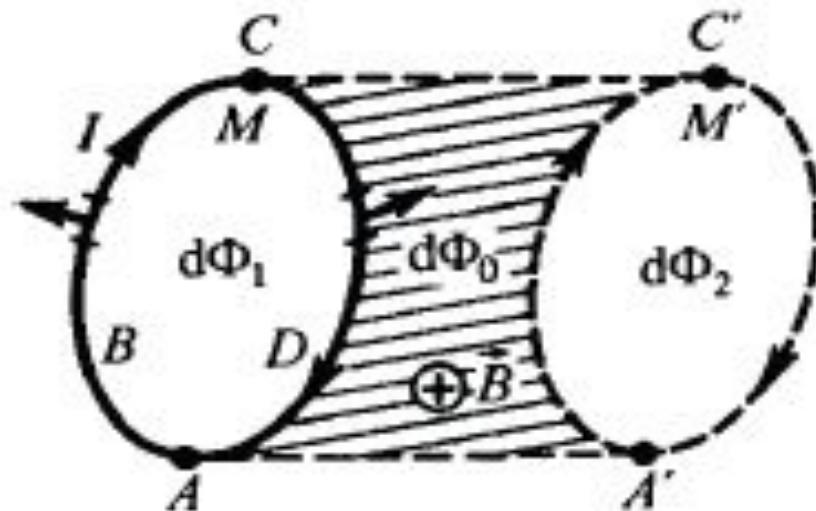
где $dS=ldx$ – площадь, пересекаемая проводником при его перемещении **в магнитном поле**;

$d\Phi=BdS$ – **поток вектора магнитной индукции**, пронизывающий эту площадь.



Работа по перемещению контура с током в магнитном поле

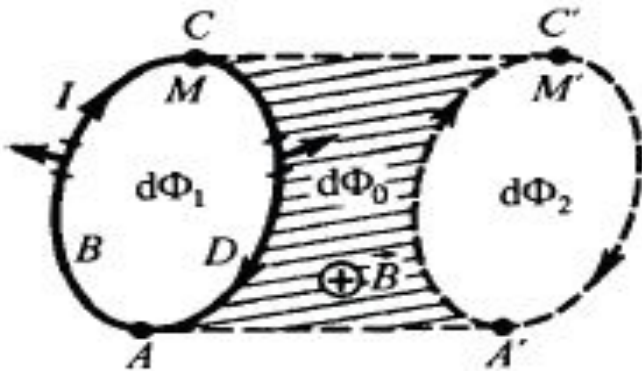
Исходные данные. Поле направлено перпендикулярно плоскости рисунка – от «нас».



Отметим. Работа dA сил Ампера при перемещении контура $ABCD$ равна сумме работ по перемещению проводников ABC (dA_1) и CDA (dA_2), т.е.

$$dA = dA_1 + dA_2.$$

Особенно важно. 1) При перемещении участка CDA силы Ампера направлены в сторону перемещения (образуют с направлением перемещения **острые углы**), поэтому $dA_2 > 0$:



$$dA_2 = d\Phi (d_0 + d_2).$$

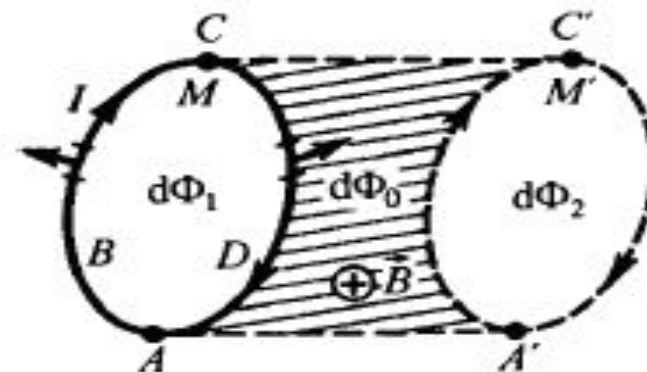
2) Силы, действующие на участок ABC контура, направлены против перемещения (образуют с направлением перемещения **тупые углы**), поэтому $dA_1 < 0$:

$$dA_1 = d\Phi (d_0 + d_1).$$

Больше страховать я не буду

В сумме

$$dA = d(\Phi_2 - I d\Phi_1) = \dots$$



**Работа по перемещению замкнутого контура
с током в магнитном поле
равна произведению силы тока в контуре
на изменение магнитного потока,
сцепленного с контуром.**

