

# МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

## Лекция 22.

### Тема: Магнитный поток. Закон Фарадея. Самоиндукция

Учебник:

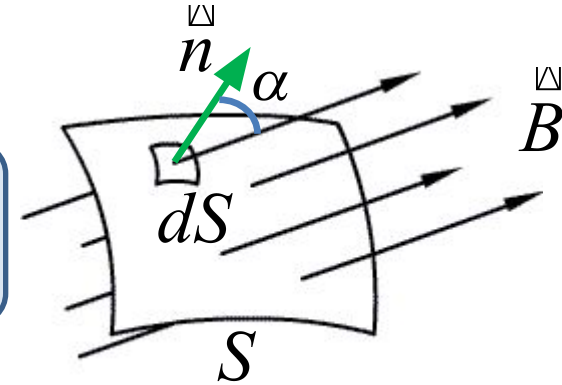
*Трофимова Т.И.* Курс физики : учеб. пособ. для вузов / Т. И.  
Трофимова. - М.: Академия, 2007.- с. **221-233**.

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

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



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

Магнитный поток  $\Phi_B$  через произвольную замкнутую поверхность  $S$  равен

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

$$[\Phi_B] = \text{Вб (вебер)}$$

# 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.

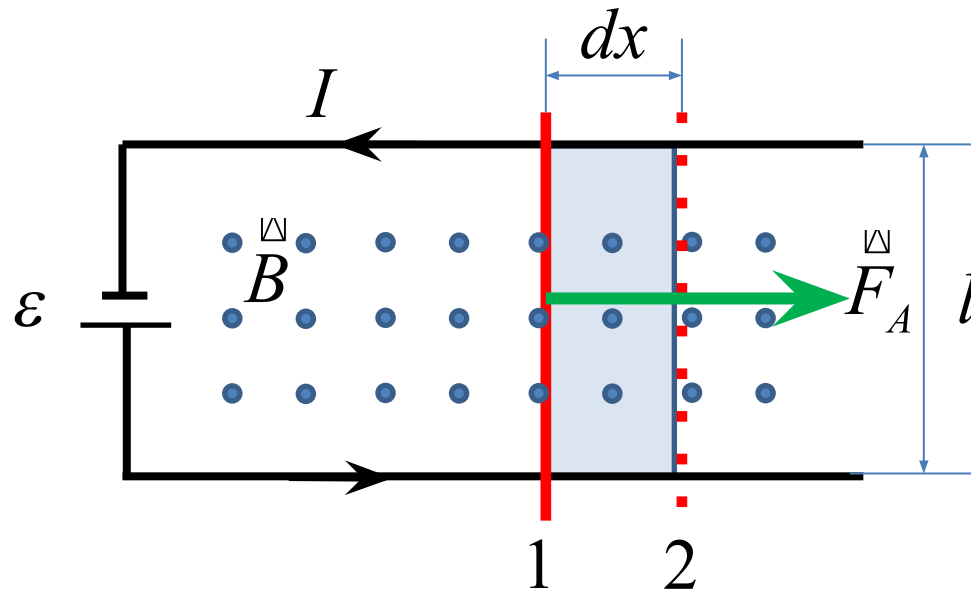
$$\oint_S B dS \equiv 0$$

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  $dx$ .

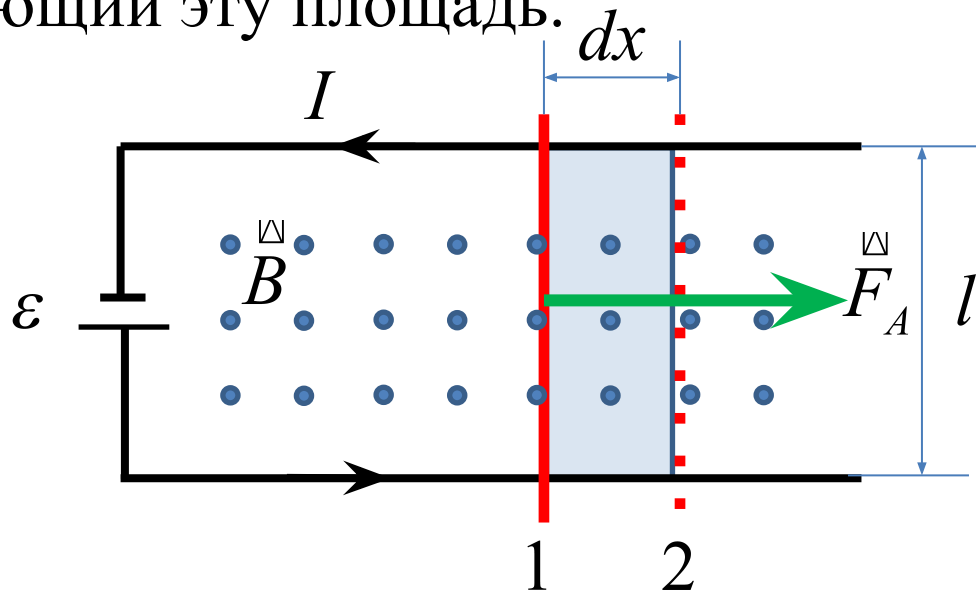
## Работа, совершаемая магнитным полем:

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

$$= (IlB \sin 90^\circ) dx \cos 0^\circ = I B dl S = Id \int B,$$

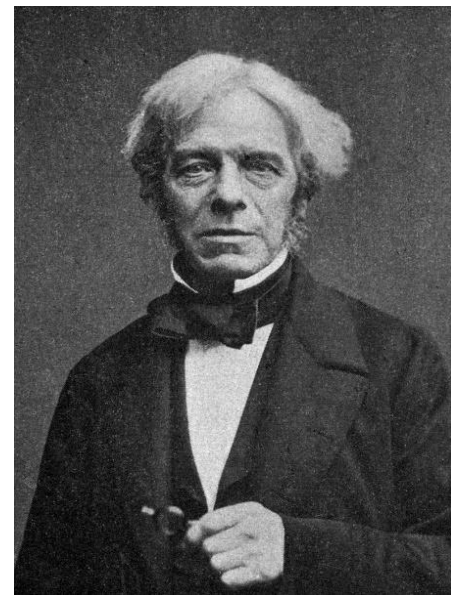
$\Phi$   $B$

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



# Электромагнитная индукция

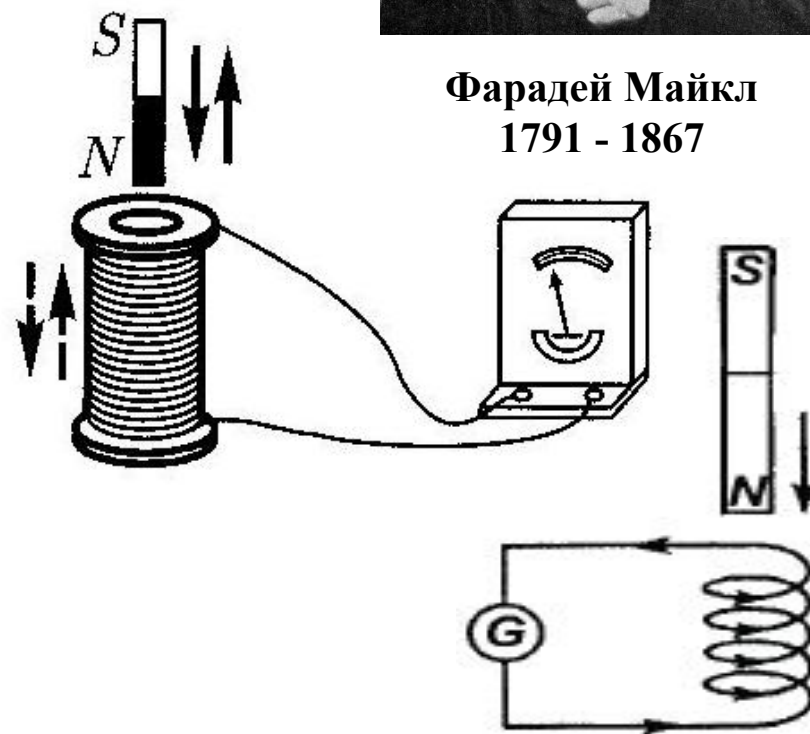
## Опыты Фарадея



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.

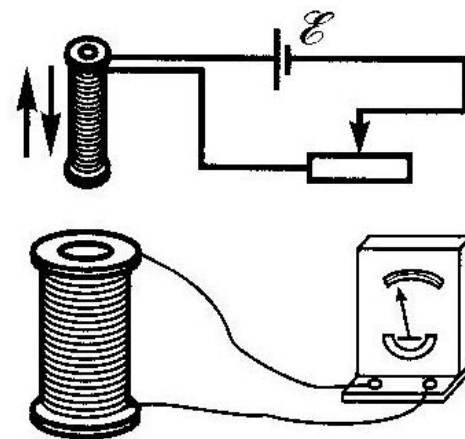


- Направление отклонения стрелки при вдвигании и выдвигании противоположны.
- Если постоянный магнит развернуть так, чтобы полюса поменялись местами, то и направление отклонения стрелки изменится на противоположное.
- Отклонение стрелки гальванометра тем больше, чем больше скорость движения магнита относительно 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:**

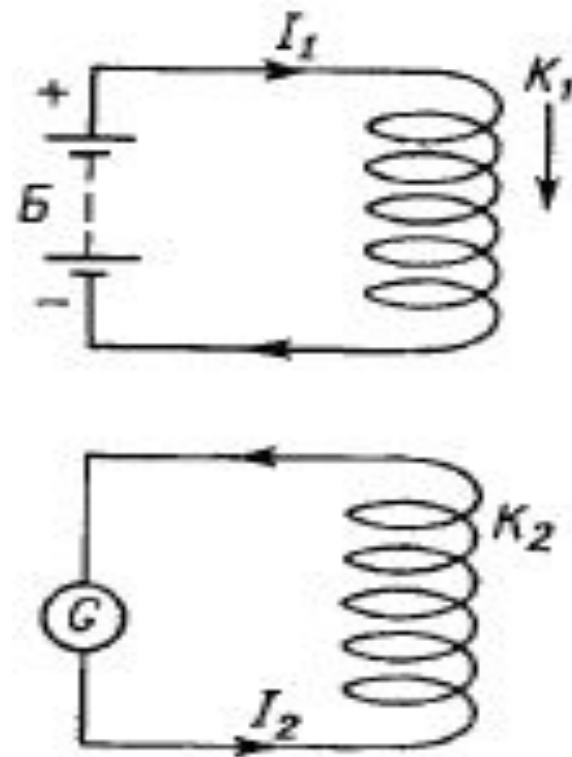
- 1) в моменты включения или выключения тока;
- 2) в моменты его увеличения или уменьшения;
- 3) при перемещении катушек друг относительно друга.





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:

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

**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.

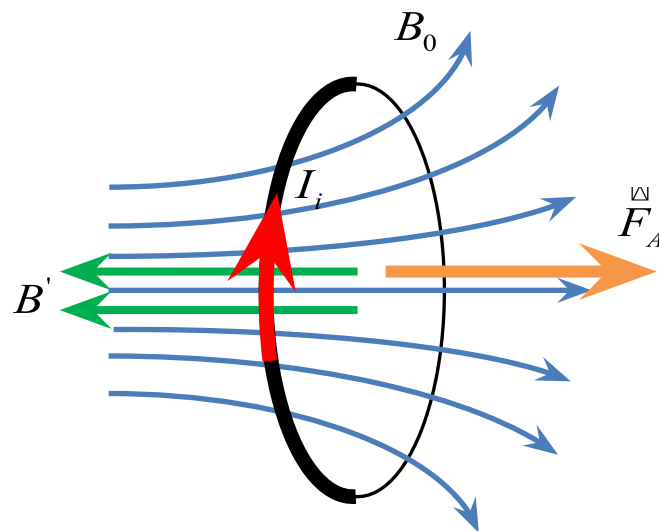
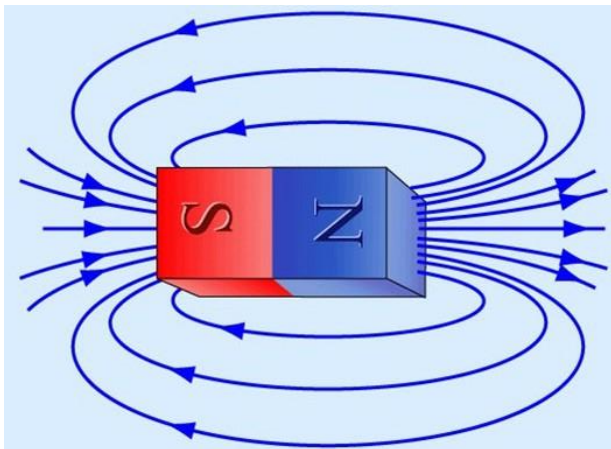
# Направление индукционного тока. Правило Ленца



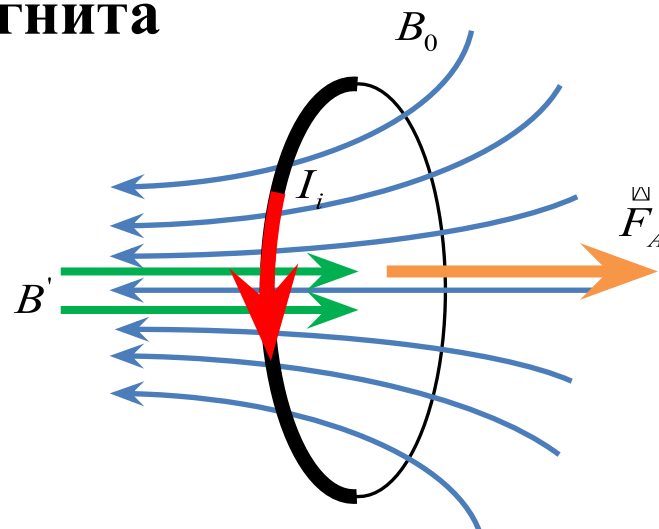
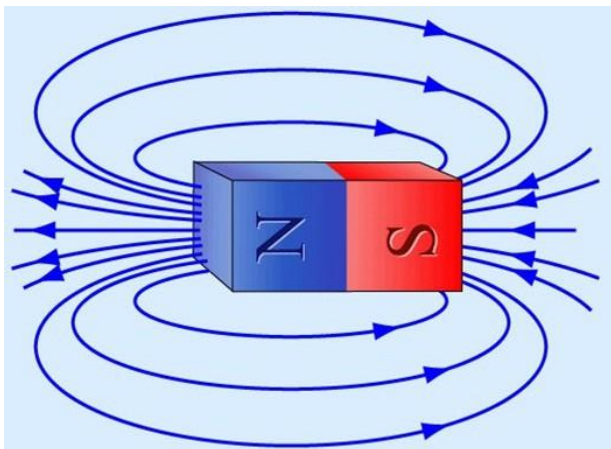
Ленц  
Эмилий Христианович  
1804 - 1865

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

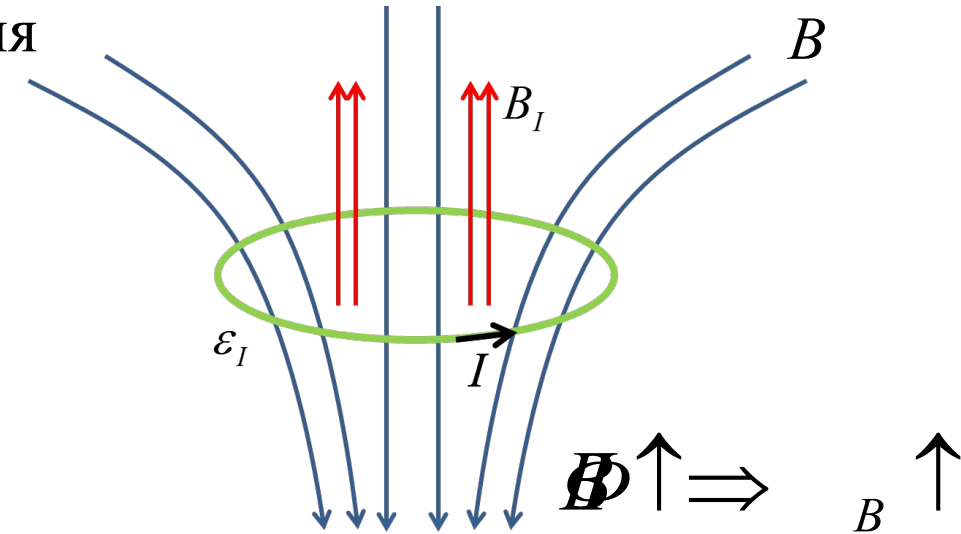
$$\Phi_B = \int_S \vec{B} d\vec{S}$$

3. Согласно закону Фарадея

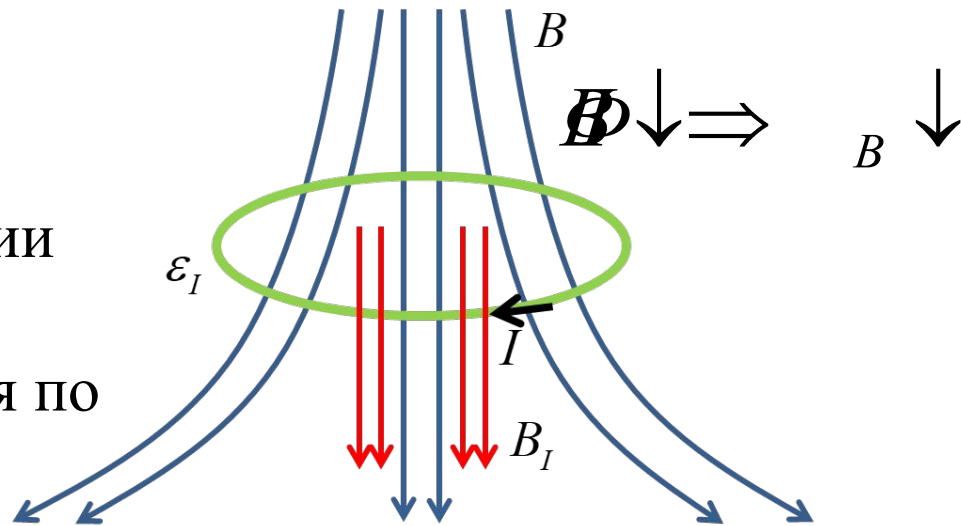
$$\mathcal{E}_i = - \frac{d\Phi_B}{dt},$$

в контуре возникает ЭДС индукции

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

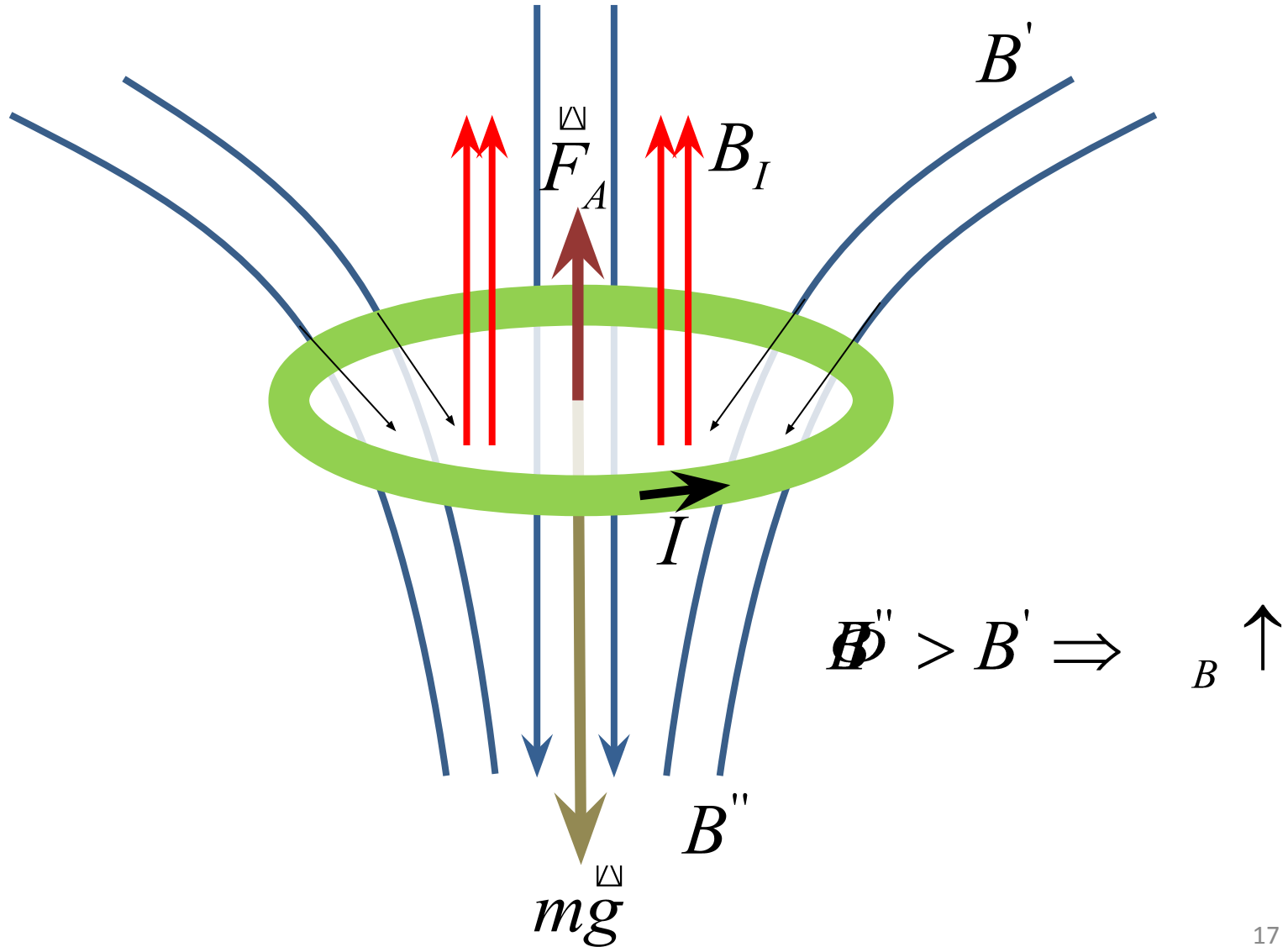


## Магнитное поле убывает





# Падение тел (проводящего кольца) в неоднородном магнитном поле

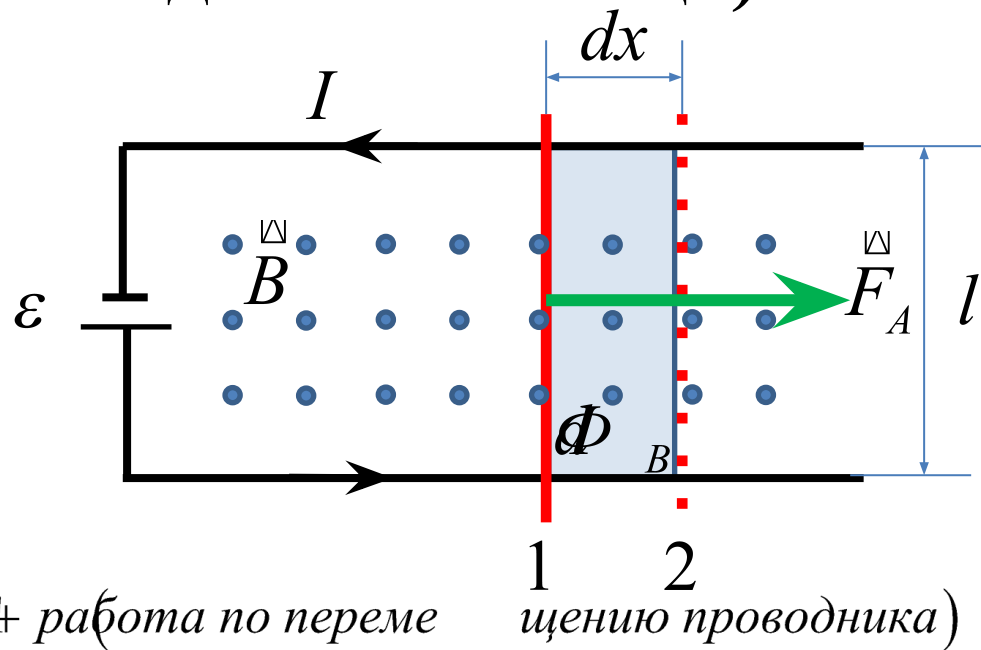


# Закон Фарадея (вывод Гельмгольца)

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)



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

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

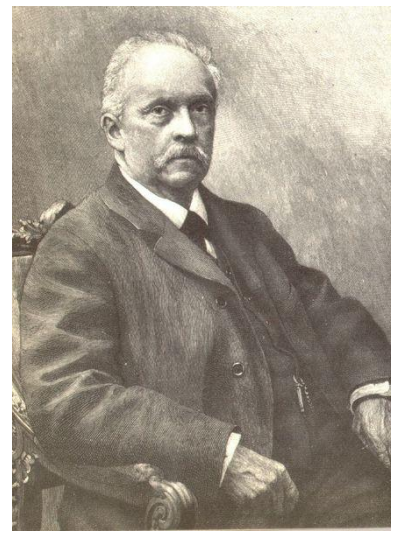
$$\mathcal{E} dt - R Idt = Id^2 \quad | \div$$

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

Сумма действующих ЭДС в цепи

Падение напряжения на сопротивлении

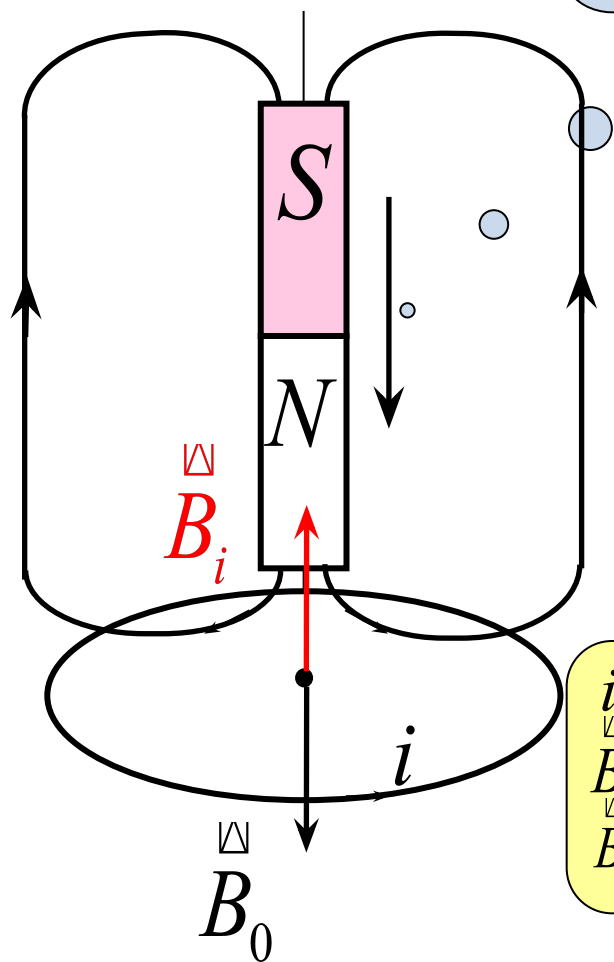
$$\varepsilon_i = - \frac{\Phi}{dt} \quad \text{- закон Фарадея}$$



Гельмгольц  
Герман Людвиг  
Фердинанд

# Иллюстрация правила Ленца.

Движение  
магнита

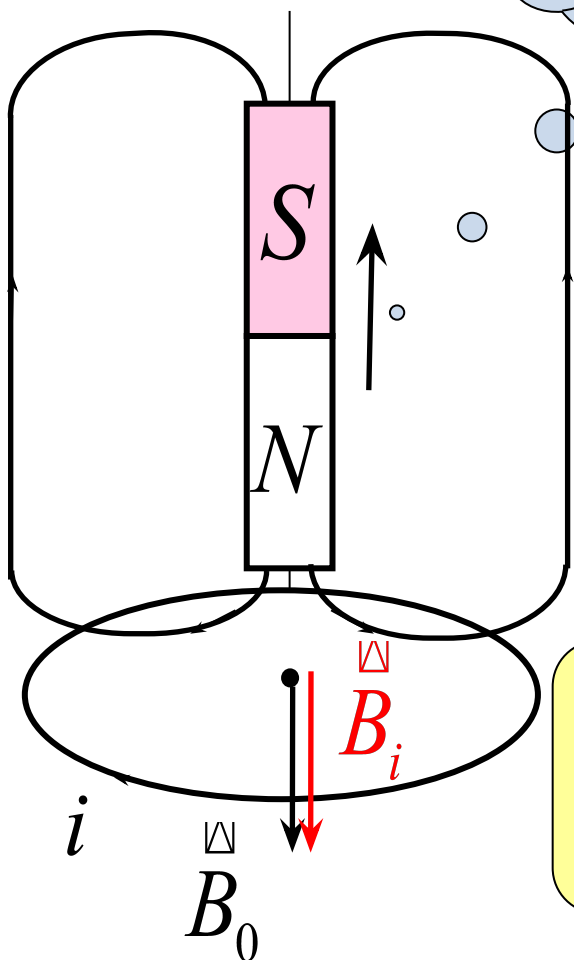


**Магнитное поле  
индукционного тока**  
направлено **навстречу**  
внешнему полю,  
если поток вектора индукции  
внешнего **магнитного поля**  
**возрастает** со временем  
(препятствует возрастанию).

$i$  – **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.

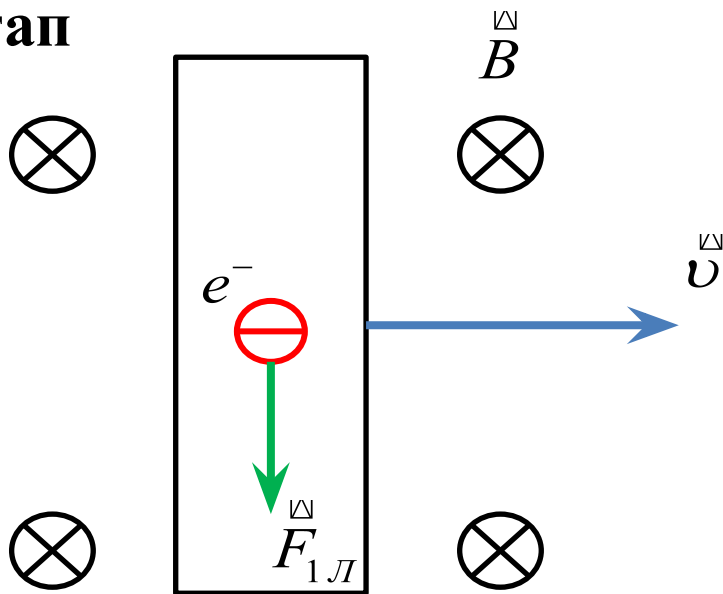
Катушка создает переменный магнитный поток через помещенный в печь образец, а возникающие токи Фуко разогревают последний.

# Природа ЭДС электромагнитной индукции

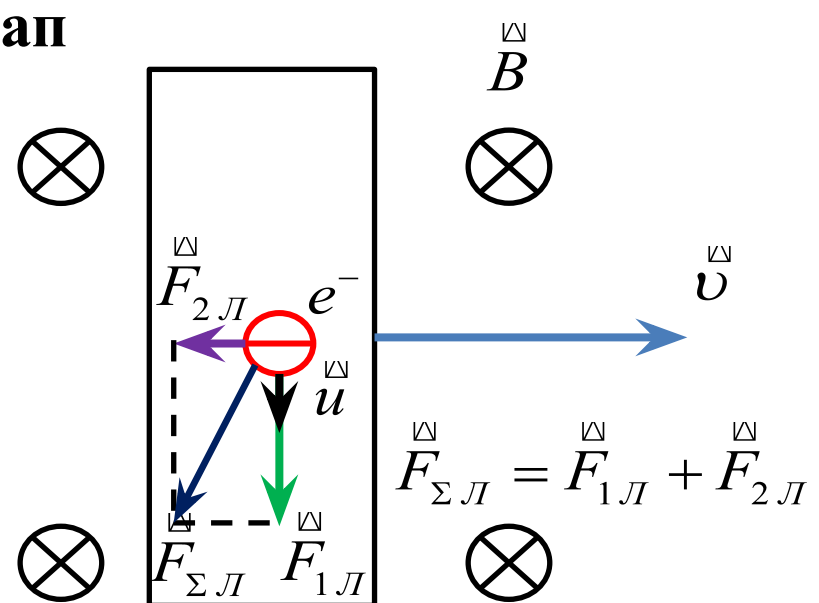
## 1. Движущийся проводник

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.**

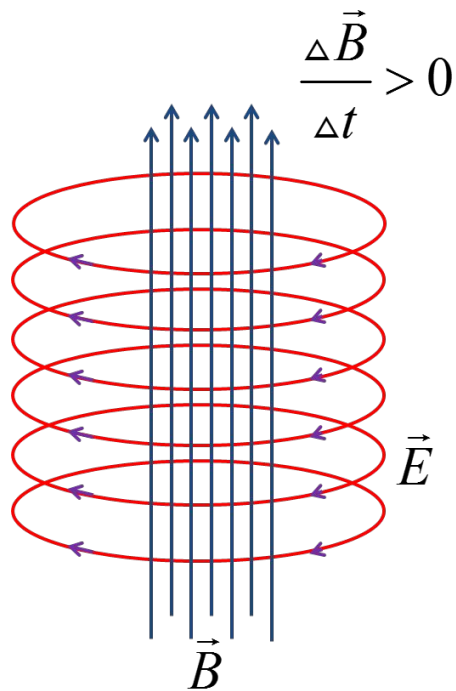
Мы знаем, что сила Лоренца на неподвижные заряды не действует.



**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.

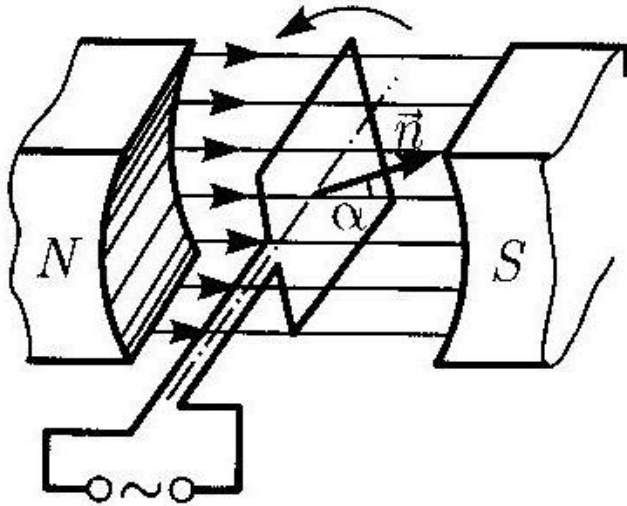
Циркуляция  $\oint_L \vec{E}_B$  вихревого электрического поля по любому контуру  $L$  проводника представляет собой ЭДС электромагнитной индукции:

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



# Вращение рамки в магнитном поле

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



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

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

$\alpha$  – 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,

$\mu_0$  – магнитная постоянная,

$\mu$  – 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  $\varepsilon$  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

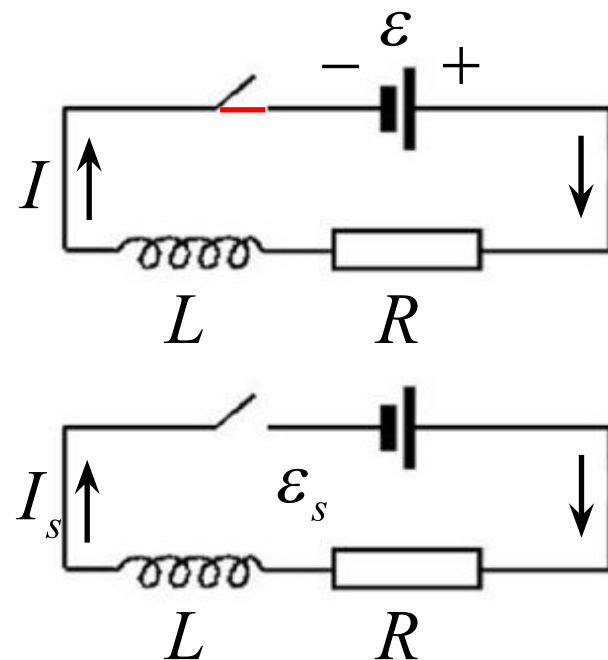
$$IR = -L \frac{dI}{dt}.$$

Разделяем переменные:

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

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

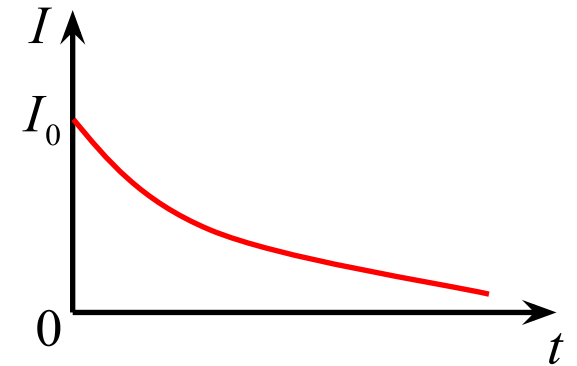
$$\int_{I_0}^I \frac{dI}{I} = -\frac{R}{L} \int_0^t dt \Rightarrow \ln \frac{I}{I_0} = -\frac{R}{L} t.$$





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  $\varepsilon_s$ , может во много раз превысить  $\varepsilon$ , что может привести к пробое изоляции и выводу из строя измерительных приборов.

При замыкании цепи помимо внешней ЭДС  $\varepsilon$  возникает ЭДС самоиндукции  $\varepsilon_s$ , препятствующая возрастанию тока. По закону Ома,

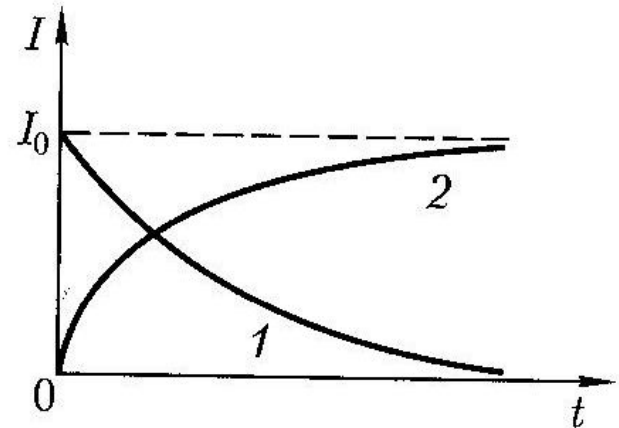
$$IR = \varepsilon + \varepsilon_s, IR = \varepsilon - L \frac{dI}{dt}.$$

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

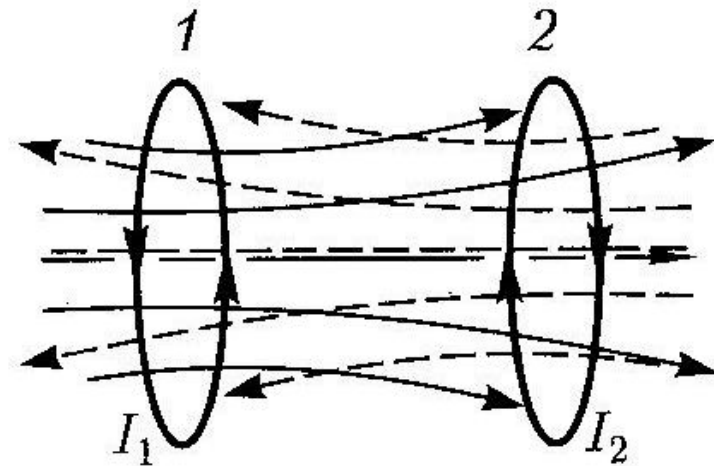
Взаимной индукцией называется явление возбуждения ЭДС электромагнитной индукции в одной электрической цепи при изменении электрического тока в другой цепи или при изменении взаимного расположения этих двух цепей.

**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

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

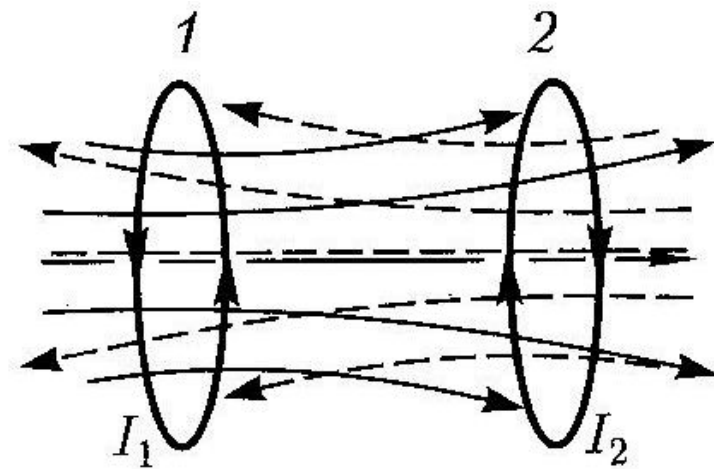


Коэффициенты пропорциональности  $L_{21}$  и  $L_{12}$  равны друг другу  $L_{12}=L_{21}=L$  и называются **взаимной индуктивностью контуров**.

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.

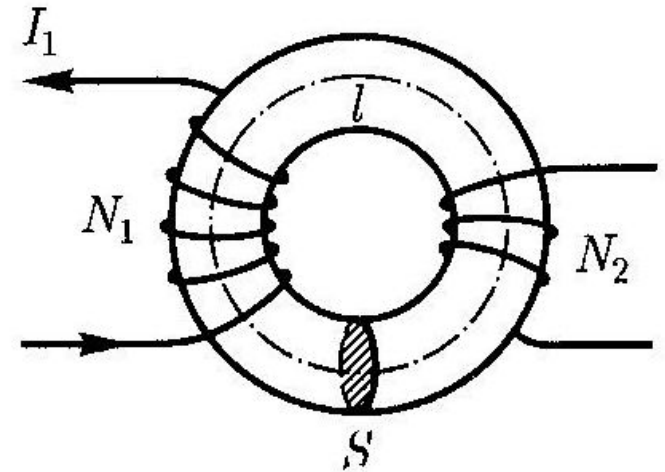
Первая катушка с числом витков  $N_1$  и током  $I_1$  создает поле

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

**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.

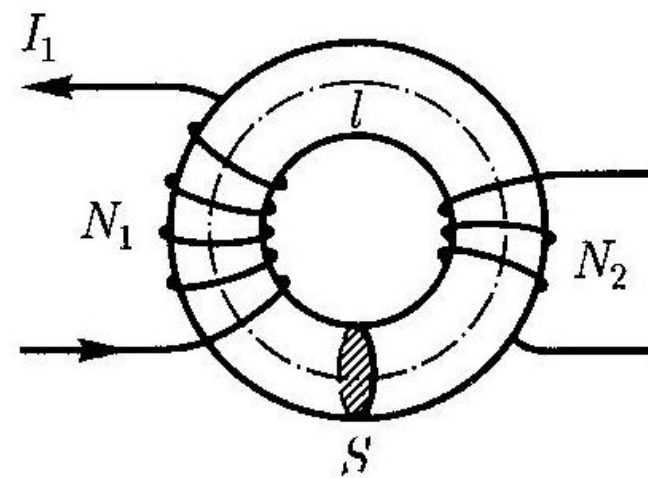


Тогда полный **магнитный поток** (потокосцепление) сквозь вторичную обмотку, содержащую  $N_2$  витков:

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

Поскольку поток  $\psi$  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**.

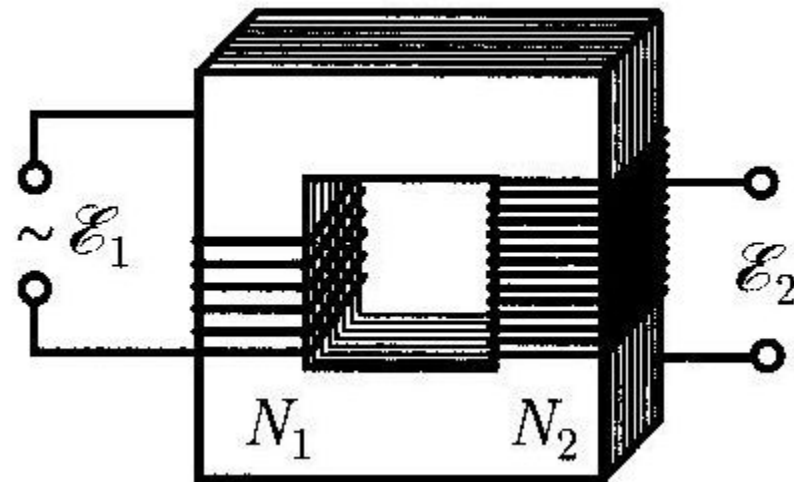
# Трансформаторы

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

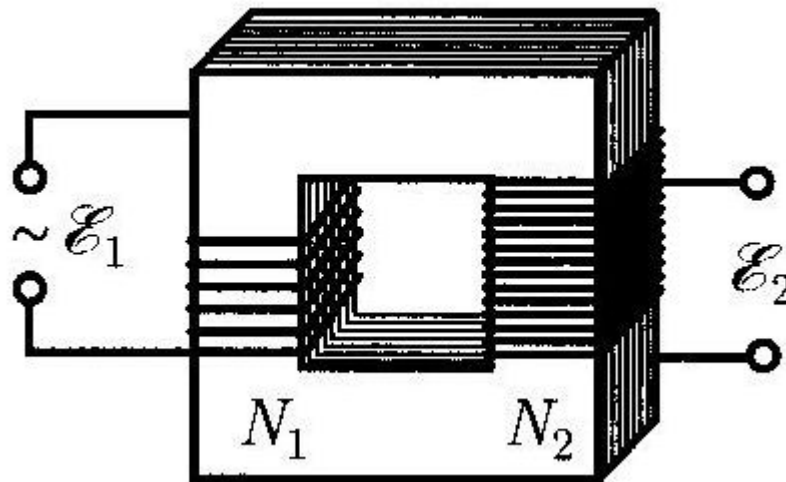
**Исходные условия.** **Переменный ток**  $I_1$ , создает в первичной обмотке переменное **магнитное поле**. Это вызывает во вторичной обмотке появление ЭДС взаимной индукции. При этом

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

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:

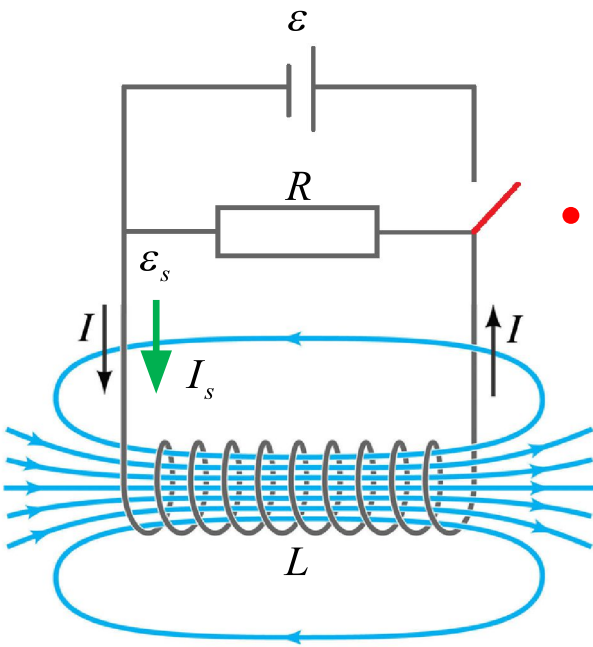
$k > 1$ , то трансформатор – **повышающий**,

$k < 1$  – **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**  $\varepsilon_s$
- **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).

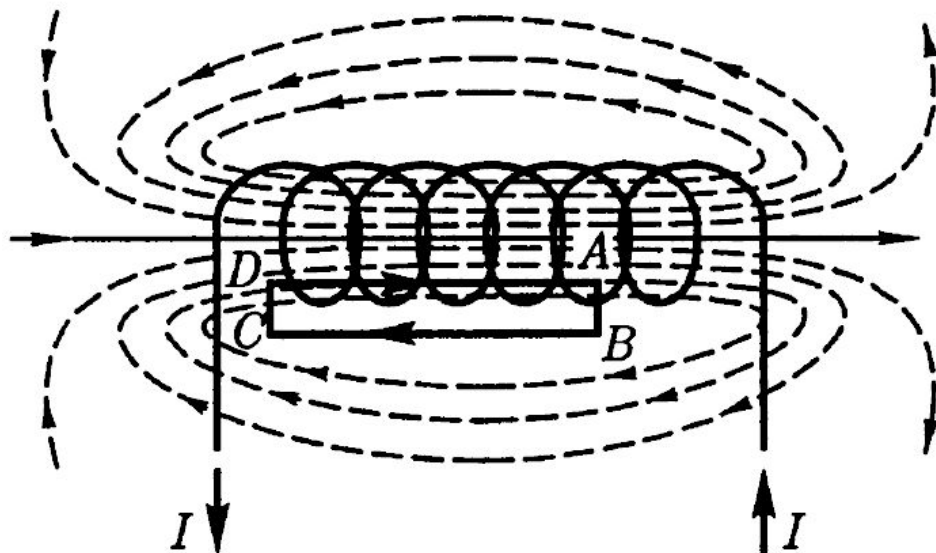
# Магнитные поля соленооида и тороида

## 1) магнитное поле (бесконечного) соленооида в вакууме

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

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

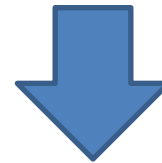
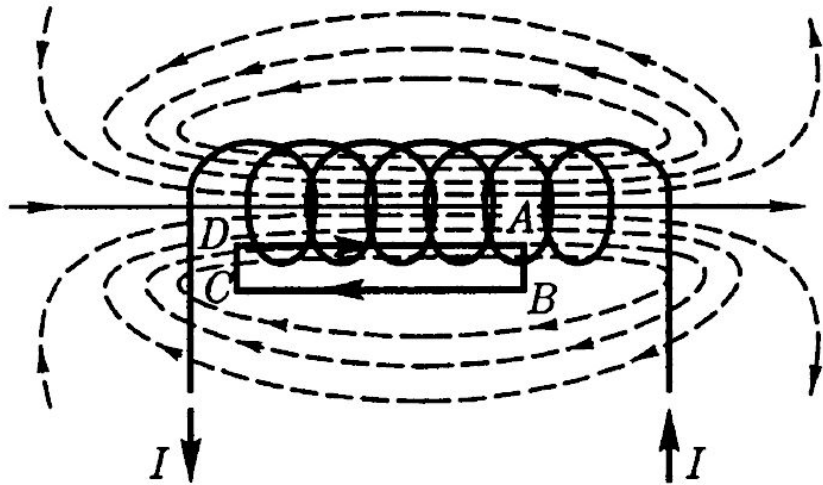
**Необходимо отметить.** Циркуляция вектора  $\vec{B}$  по замкнутому контуру  $ABCD$ , охватывающему все  $N$  витков, равна



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

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  $r$ .

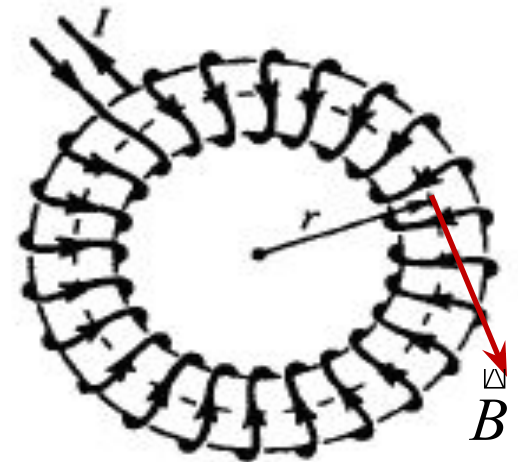
По теореме о циркуляции

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



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

$N$  – число  
витков  
тороида.



# Поток вектора магнитной индукции

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

$$\Phi_B = \int B dS = \int B dS \cos \alpha, \quad [\text{бл} \cdot \text{м}^2 / \text{с}]$$

где  $\alpha$  – угол между векторами  $B$  и  $dS$ ;

$dS = n dS$  – вектор, модуль которого равен  $dS$ , а направление совпадает с направлением нормали  $n$  к площадке.

Поток вектора  $B$  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  $S$ :

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



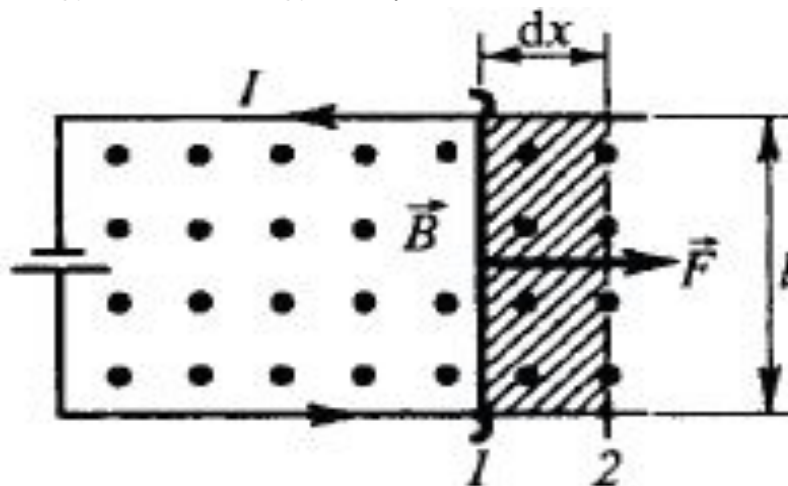
Теорема Гаусса  $\nabla$  для магнитного поля в вакууме:  
поток вектора  $B$  **магнитной индукции** сквозь любую  
замкнутую поверхность  $S$  равен нулю

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

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».



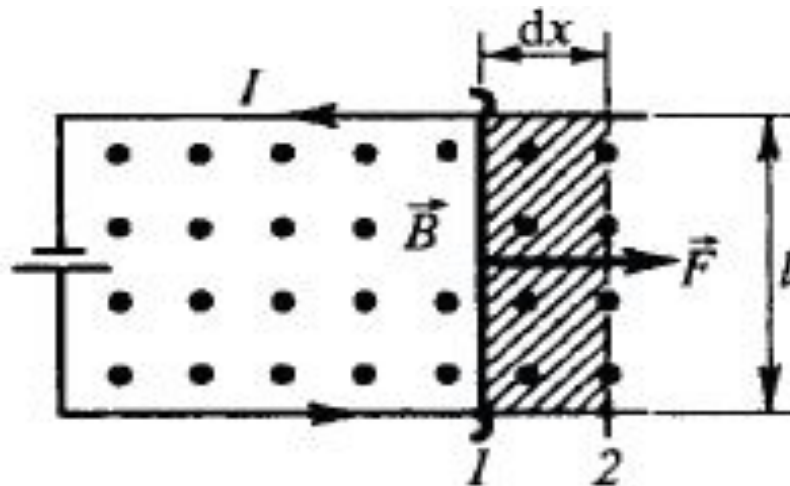
**Отметим.** Под действием силы Ампера  $F=IlB$ , проводник переместился из положения 1 в положение 2.

**Работа**, совершаемая **МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ**:

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

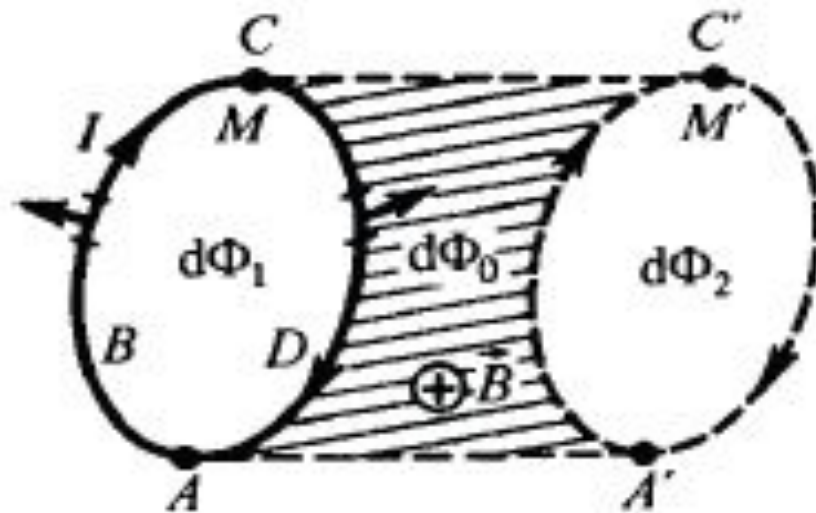
где  $dS=ldx$  – площадь, пересекаемая проводником при его перемещении **В МАГНИТНОМ ПОЛЕ**;

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



# Работа по перемещению контура с током в магнитном поле

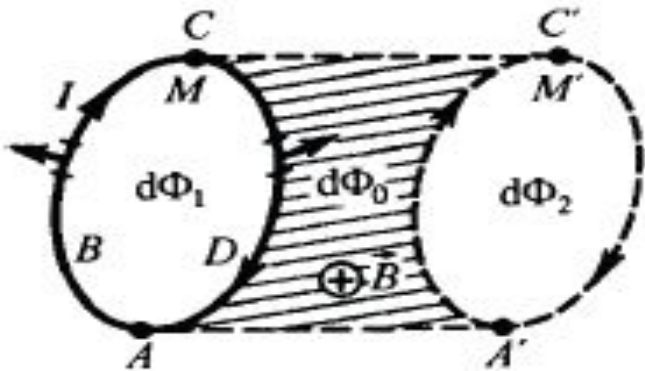
**Исходные данные.** Поле направлено перпендикулярно плоскости рисунка – от «нас».



**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  $dA_2 > 0$ :



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

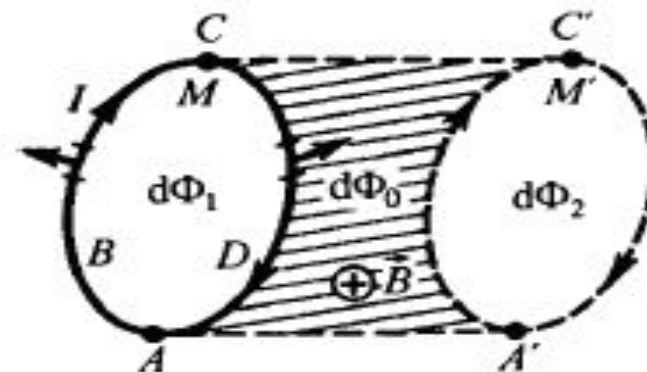
2) Силы, действующие на участок  $ABC$  контура, направлены против перемещения (образуют с направлением перемещения **тупые углы**), поэтому  $dA_1 < 0$ :

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

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.**

