

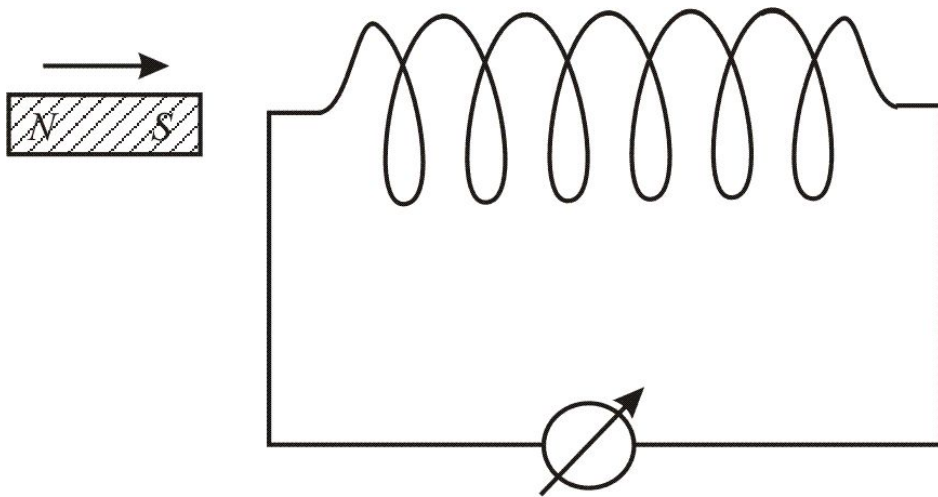
Закон электромагнитной индукции Фарадея

Опыты Фарадея. Индукционный ток. Правило Ленца

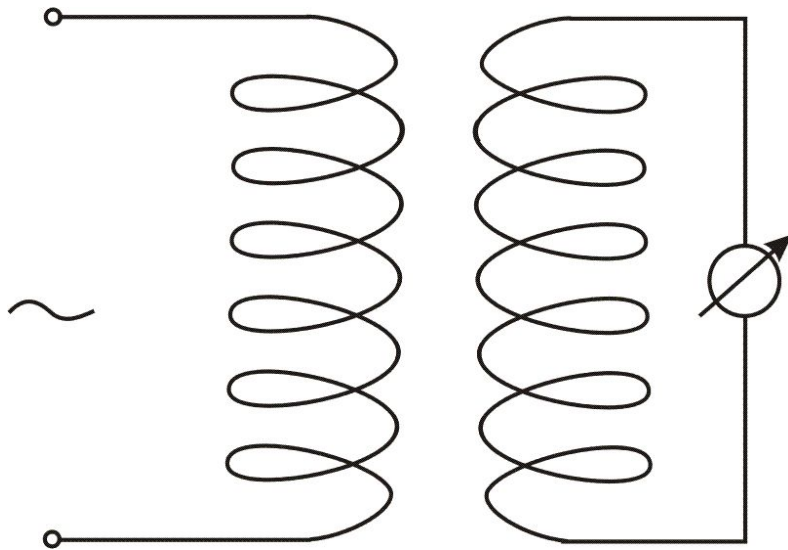
С момента открытия связи магнитного поля с током (что является подтверждением симметрии законов природы), делались многочисленные попытки получить ток с помощью магнитного поля.

Задача была решена Майклом Фарадеем в *1831г.*

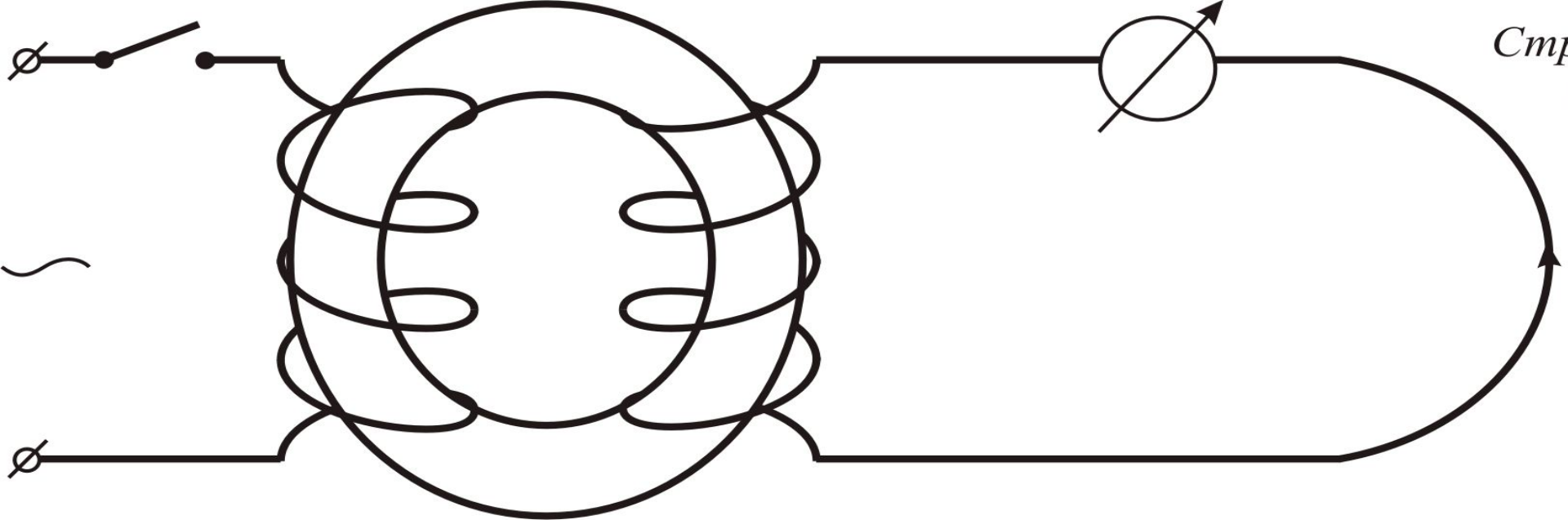
Американец Джозеф Генри тоже открыл, но не успел опубликовать свои результаты. Ампер также претендовал на открытие, но не смог



Если подносить магнит к катушке или наоборот, то в катушке возникнет электрический ток.



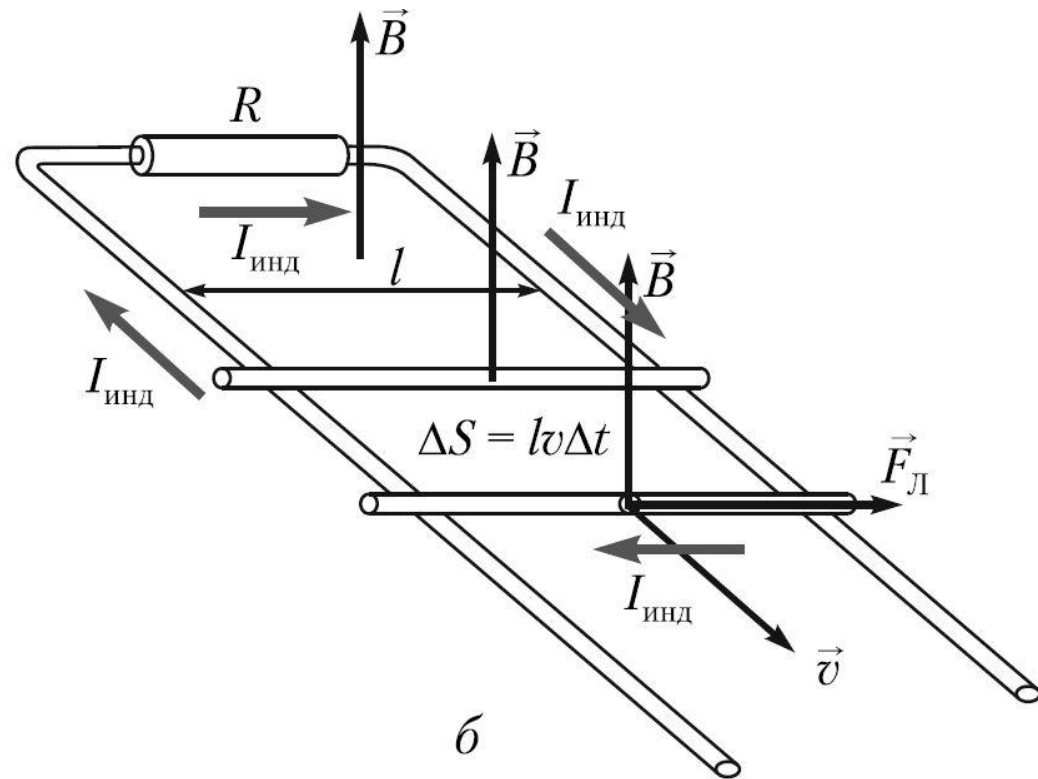
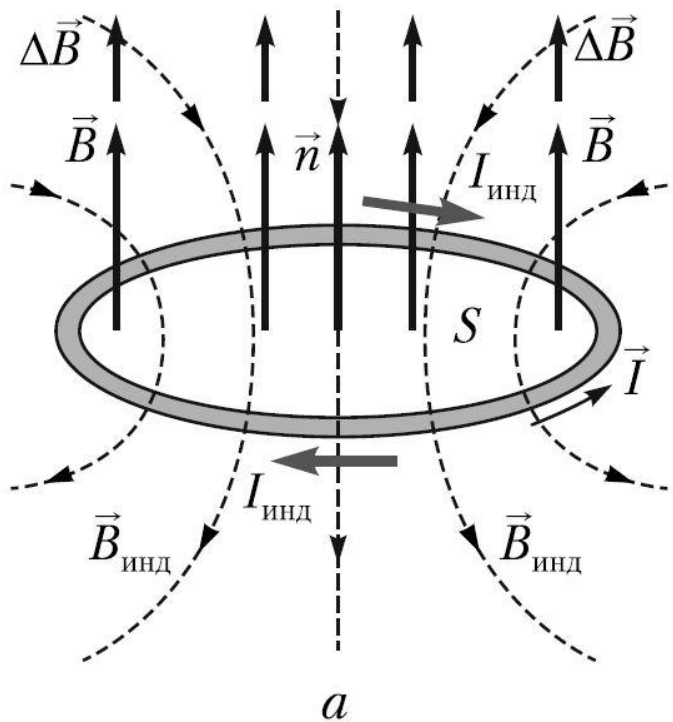
Если к одной из катушек подключить источник переменного тока, то в другой так же возникнет переменный ток, но лучше всего этот эффект проявляется, если две катушки соединить сердечником



Заполнение всего пространства однородным магнетиком приводит при прочих равных условиях к **увеличению индукции в μ раз**.

Этот факт подтверждает то, что индукционный ток обусловлен изменением потока вектора магнитной индукции \mathbf{B} а не потока вектора напряженности \mathbf{H} .

Электромагнитная индукция



Возникновение индукционного тока:

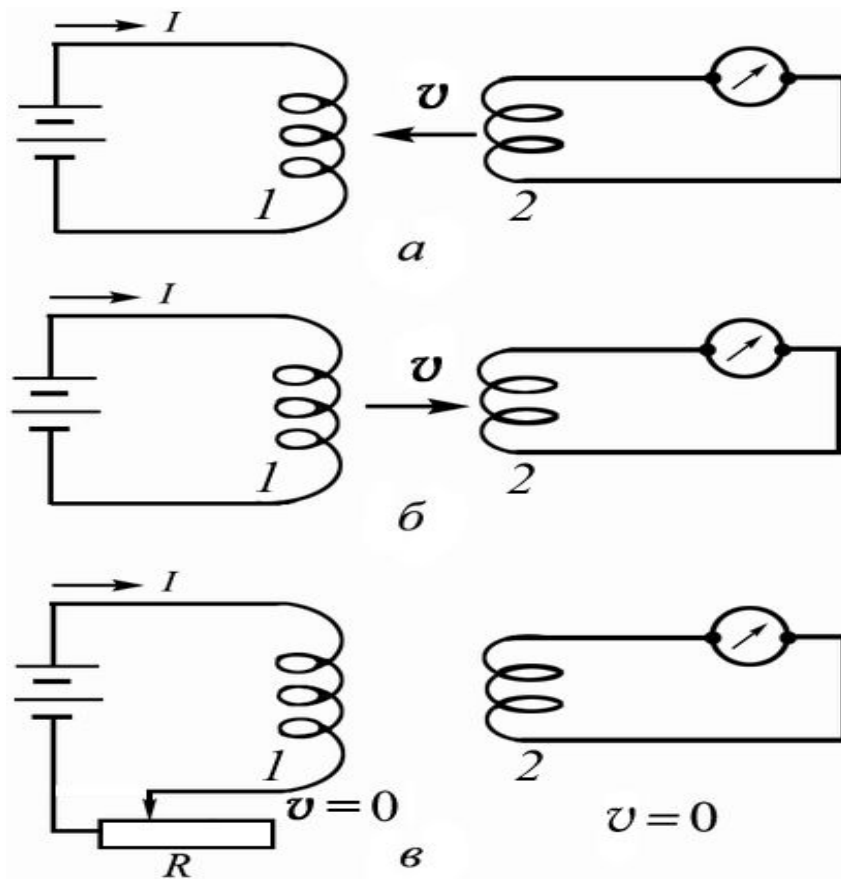
a — при изменении магнитного поля; *б* — при движении проводника

По определению Фарадея общим для этих опытов является то, что

если поток вектора индукции, пронизывающий замкнутый, проводящий контур меняется, то в контуре возникает электрический ток.

Это явление называют явлением электромагнитной индукции, а ток – индукционным.

При этом, явление совершенно не зависит от способа изменения потока вектора магнитной индукции.

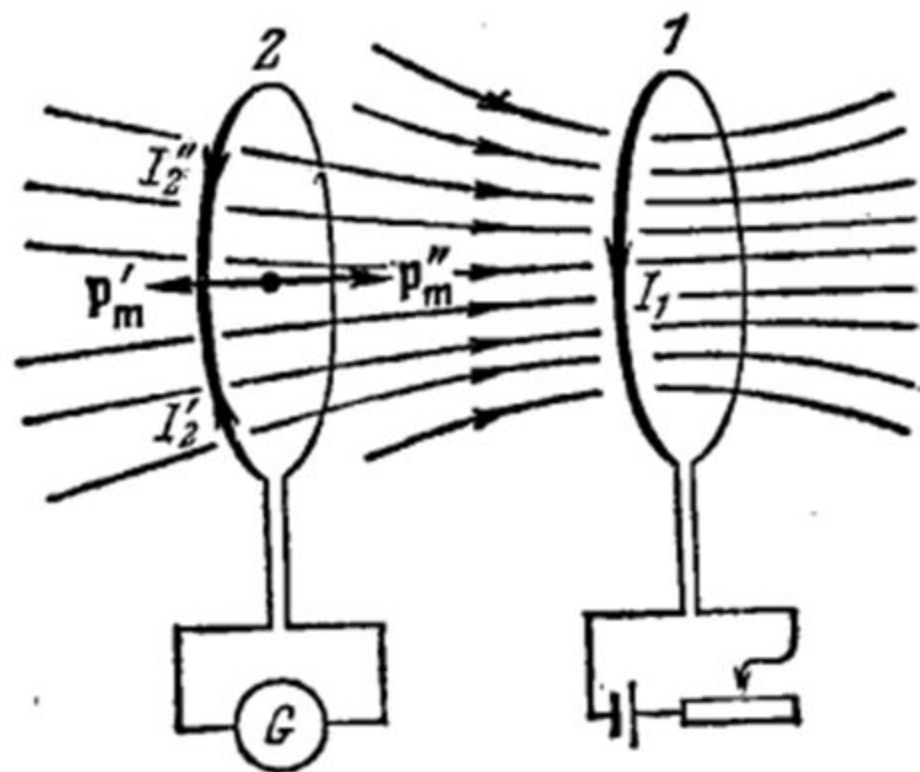


Итак, получается, что движущиеся заряды (ток) создают магнитное поле, а движущееся магнитное поле создает (вихревое) электрическое поле или индукционный ток

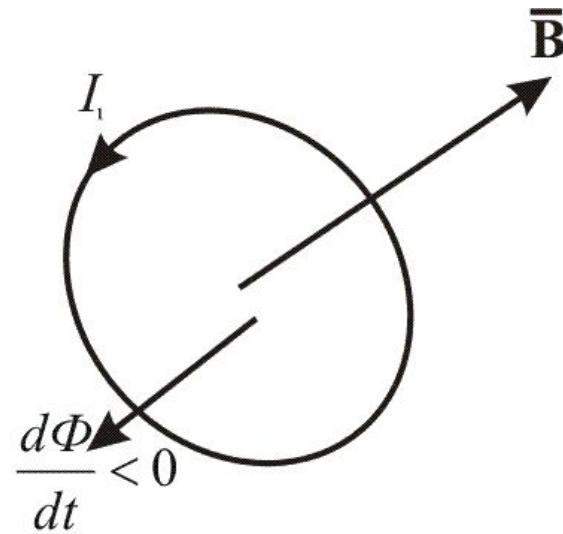
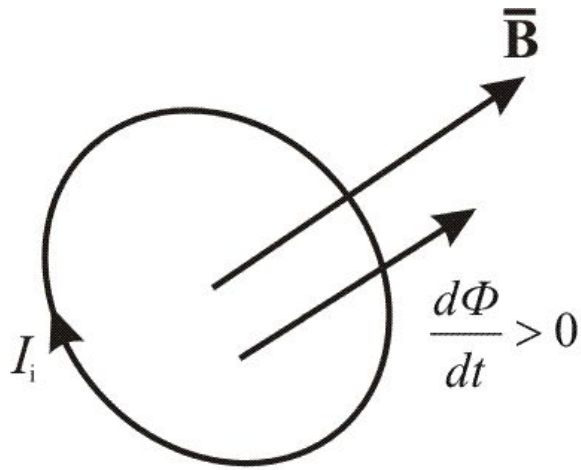
В 1833 г. Ленц установил общее правило нахождения направления тока:

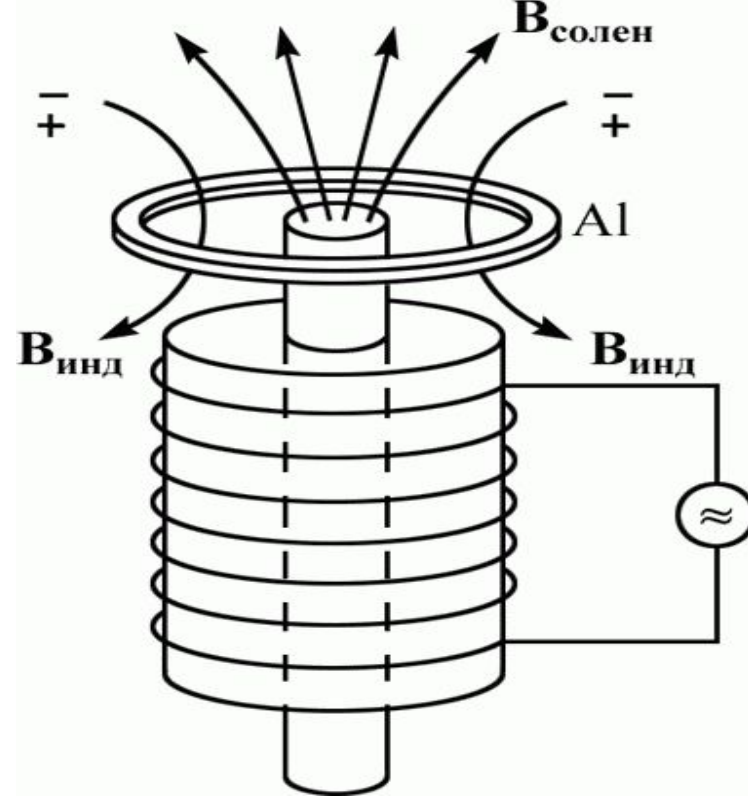
Правило Ленца:

индукционный ток всегда направлен так, что магнитное поле этого тока препятствует изменению магнитного потока, вызывающего индукционный ток.



Направление индукционного тока и направление $\frac{d\Phi}{dt}$ связаны *правилом буравчика* :





Алюминиевое кольцо выталкивается и зависает над сердечником соленоида, подключенного к генератору переменного электрического тока.

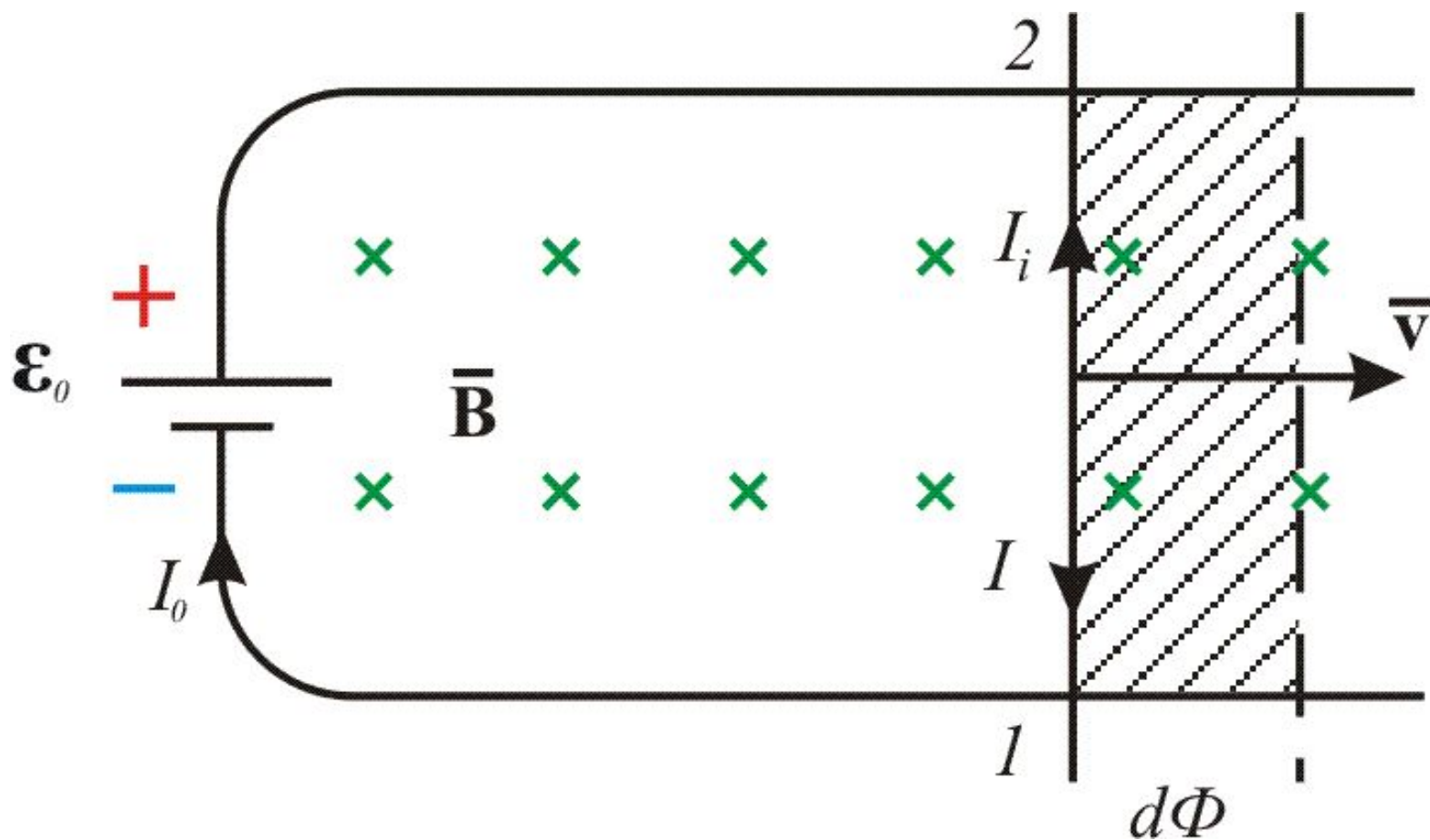
Сила отталкивания возникает в соответствии с **правилом Ленца – индукционный ток порождает магнитное поле, препятствующее изменению магнитного потока в контуре**

Величина Э.Д.С. индукции

Для создания тока в цепи необходимо наличие электродвижущей силы. Поэтому явление электромагнитной индукции свидетельствует о том, что при изменении магнитного потока в контуре возникает электродвижущая сила индукции \mathcal{E}_i .

Наша *задача*, используя законы сохранения энергии, найти величину \mathcal{E}_i и выяснить ее природу.

Рассмотрим перемещение подвижного участка 1 – 2 контура с током в магнитном поле \vec{B} (Рис. 11.4).



Пусть сначала магнитное поле отсутствует.

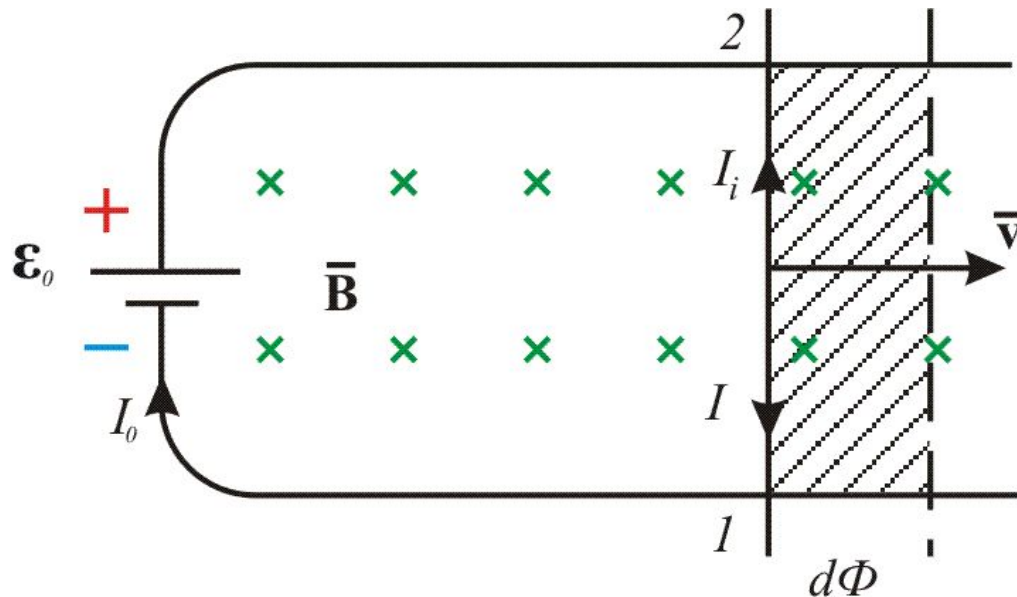
Батарея с ЭДС равно \mathcal{E}_0 создает ток I_0 . За время dt , батарея совершает работу

$$dA = \mathcal{E}_0 I_0 dt$$

– эта работа будет переходить в тепло которое можно найти по закону Джоуля-Ленца:

$$Q = dA = \mathcal{E}_0 I_0 \cdot dt = I_0^2 \cdot R dt,$$

здесь $I_0 = \frac{\mathcal{E}_0}{R}$, R -полное сопротивление всего контура.



\vec{B}

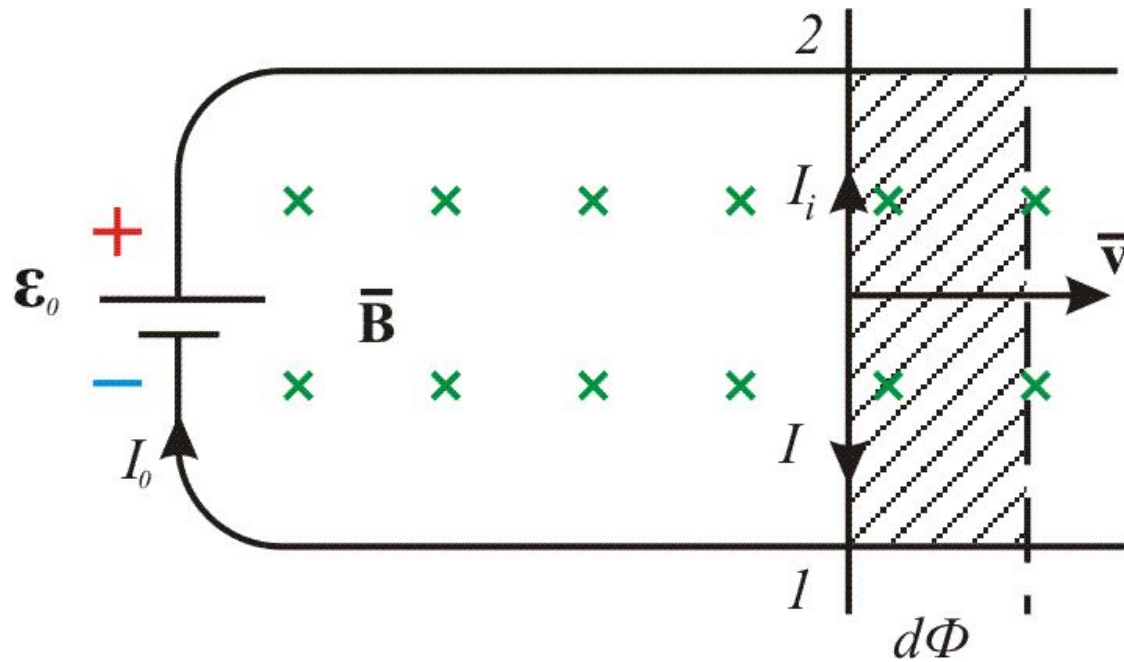
Теперь включим магнитное поле

Каждый элемент контура испытывает механическую силу $d\vec{F}$. Подвижная

сторона рамки будет испытывать силу \vec{F}_0 .

Под действием этой силы участок 1-2

будет перемещаться со скоростью $v = dx/dt$.

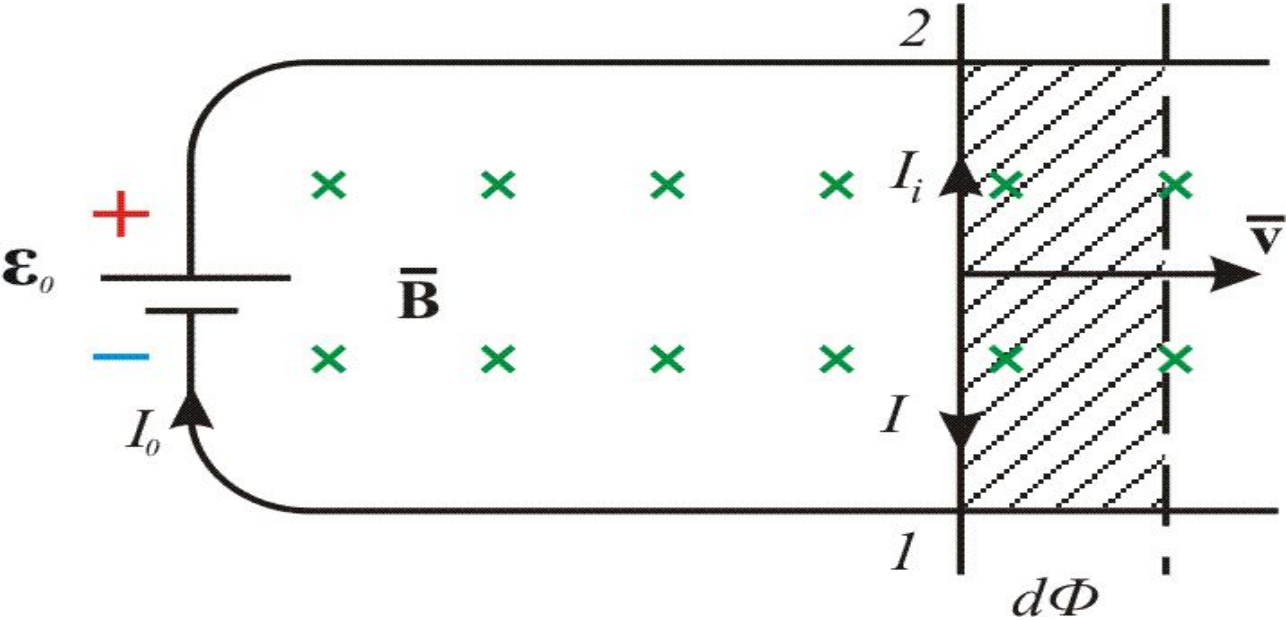


При движении проводника **изменится и поток магнитной индукции.**

Тогда в результате электромагнитной индукции ток в контуре изменится и станет равным $I = I_0 - I_i$

Изменится и сила F_0 , которая теперь станет равна F (сила F – не добавочная, а результирующая).

Эта сила за время dt произведет работу $dA = Fdx = Id\Phi$.

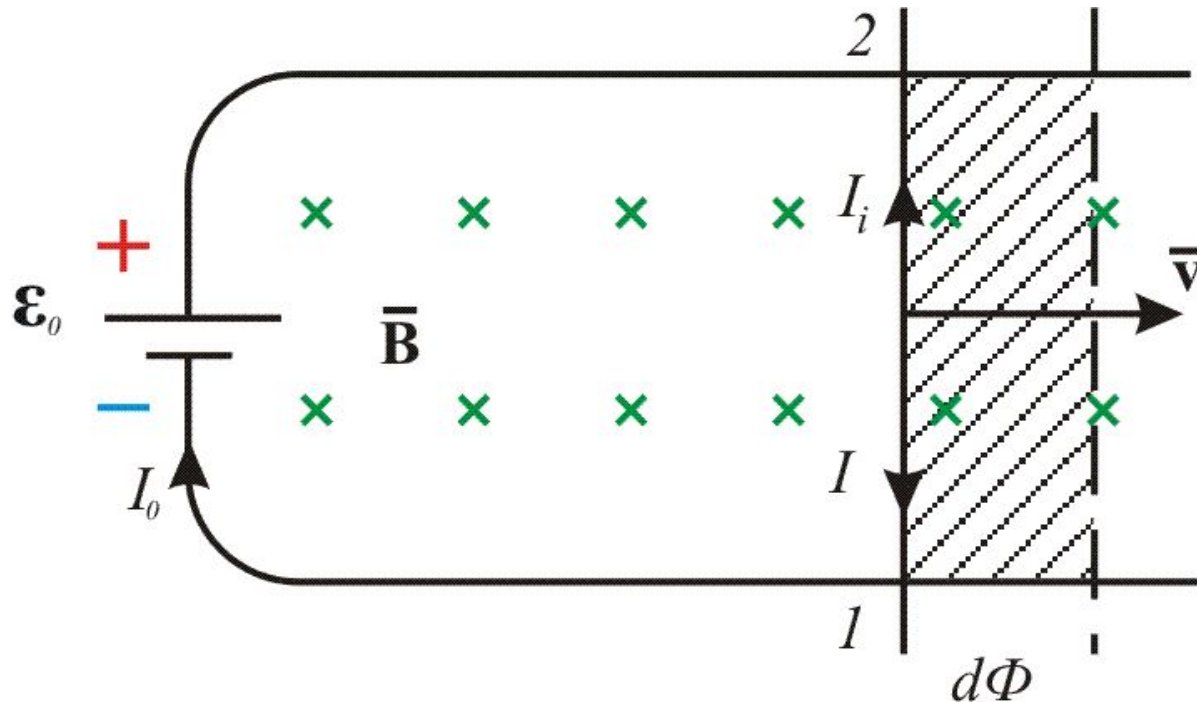


Как и в случае, когда все элементы рамки неподвижны, источником работы является \mathcal{E}_0 .

При неподвижном контуре эта работа сводилась только лишь к выделению тепла.

В нашем случае тепло тоже будет выделяться, но уже в другом количестве, так как ток изменился. Кроме того, совершается механическая работа.

Общая работа за время dt , равна: $\mathcal{E}_0 I dt = I^2 R dt + I d\Phi$



$$I dt \mathcal{E}_0 I^2 R dt + I d\Phi$$

Умножим левую и правую часть выражения на $\frac{1}{IRdt}$, получим

$$\frac{\mathcal{E}_0}{R} = I + \frac{1}{R} \cdot \frac{d\Phi}{dt}$$

Отсюда

$$I = \frac{\mathcal{E}_0 - \frac{d\Phi}{dt}}{R} \quad (11.2\mathcal{B})$$

Полученное выражение мы вправе рассматривать как закон Ома для контура, в котором кроме источника \mathcal{E}_0 действует \mathcal{E}_i , которая равна:

$$\mathcal{E}_i = \mathcal{E}_0 - \frac{d\Phi}{dt} \quad (11.2.4)$$

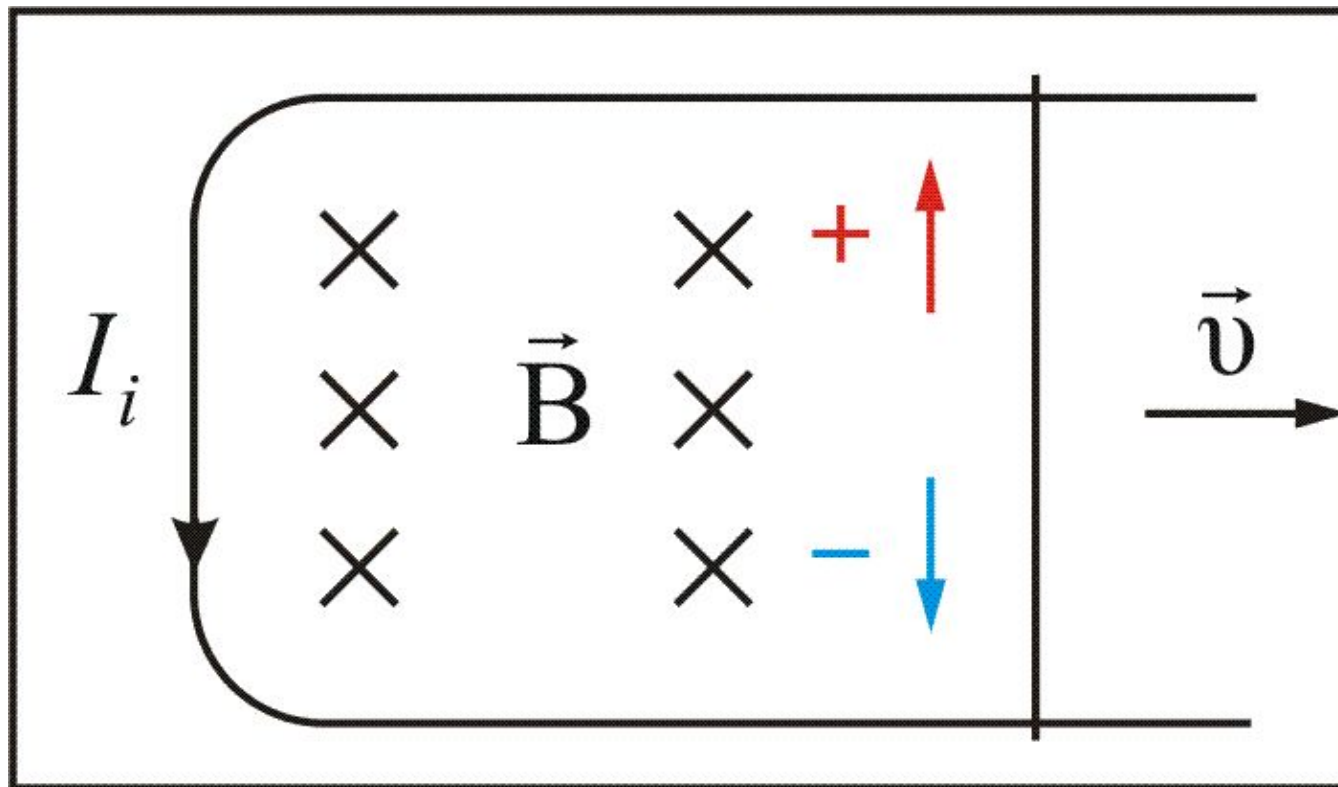
$$\mathbf{E}_i = - \frac{d\Phi}{dt}$$

ЗАКОН ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ

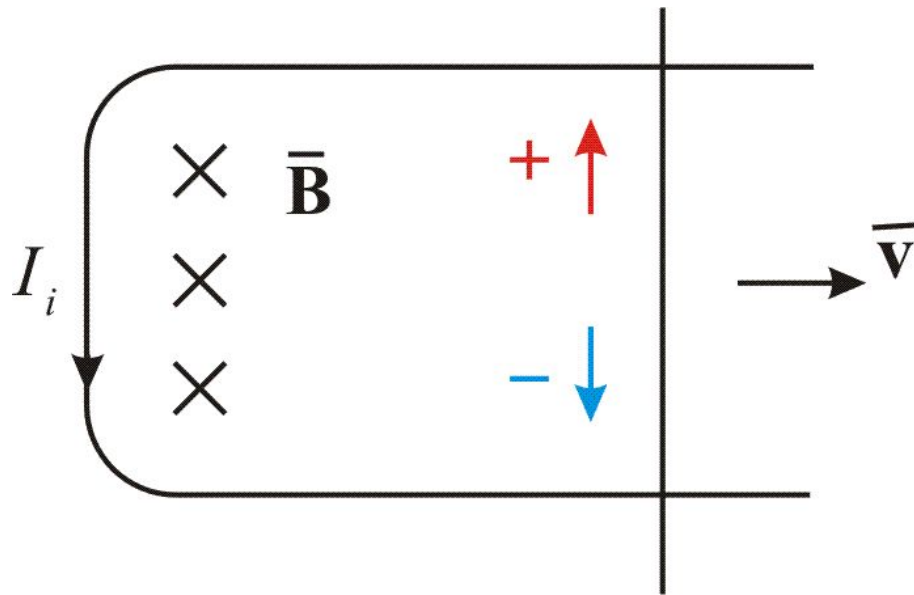
Природа Э.Д.С. индукции

Ответим на вопрос, что является причиной движения зарядов, причиной возникновения индукционного тока?

Рассмотрим рисунок 11.6.

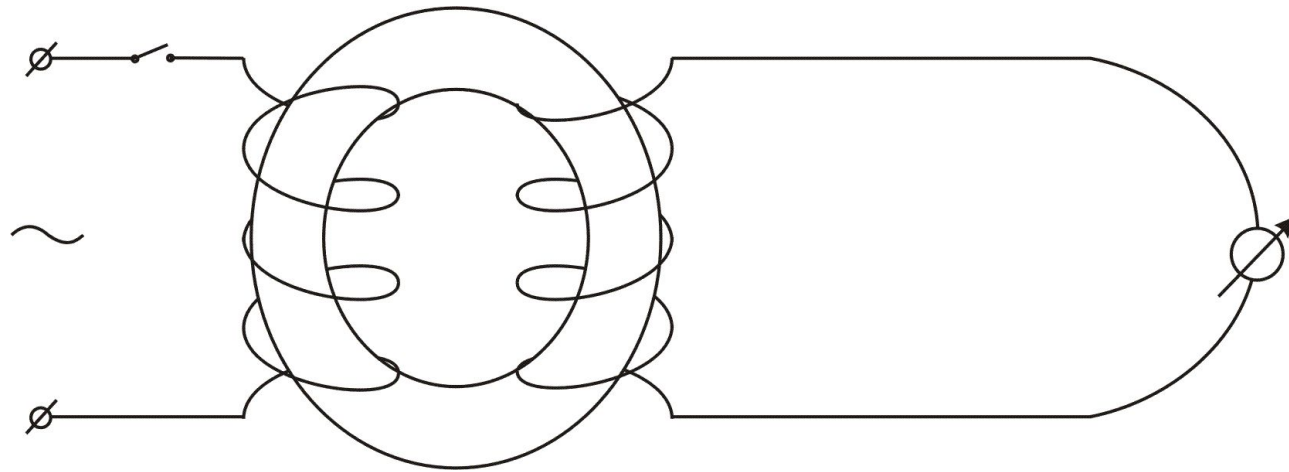


- 1) Если перемещать проводник в однородном магнитном поле \vec{B} , то под действием силы Лоренца, электроны будут отклоняться вниз, а положительные заряды вверх – возникает разность потенциалов.
- 2) Это и будет E_i - *сторонняя сила*, под действием которой течет ток.
- 3) Как мы знаем, для положительных зарядов $F_L = q^+ [\vec{v}, \vec{B}]$; для электронов $F_L = -e^- [\vec{B}, \vec{v}]$.



- Если проводник неподвижен, а изменяется магнитное поле, какая сила возбуждает индукционный ток в этом случае?

Возьмем обыкновенный трансформатор



■ Как только мы замкнули цепь первичной обмотки, во вторичной обмотке сразу возникает ток. Но ведь сила Лоренца здесь ни при чем, ведь она действует на движущиеся заряды, а они в начале покоились (находились в тепловом движении – хаотическом, а здесь нужно направленное движение).

Ответ был дан **Дж. Максвеллом** в 1860 г.:

всякое переменное магнитное поле возбуждает в окружающем пространстве электрическое поле E' . Оно и является причиной возникновения индукционного тока в проводнике. То есть E' возникает только при наличии переменного магнитного поля (на постоянном токе трансформатор не работает).

Сущность явления электромагнитной индукции совсем не в появлении индукционного тока (ток появляется тогда, когда есть заряды и замкнута цепь), **а в возникновении вихревого электрического поля** (не только в проводнике, но и в окружающем пространстве, в вакууме).

Это поле имеет совершенно иную структуру, нежели поле, создаваемое зарядами. Так как оно не создается зарядами, то силовые линии не могут начинаться и заканчиваться на зарядах, как это было в электростатике. **Это поле вихревое, силовые**

Раз это поле перемещает заряды, следовательно, оно обладает силой. Введем вектор напряженности вихревого электрического поля \vec{E}' .

Сила с которой это поле действует на заряд $\vec{F}' = q\vec{E}'$

Но когда заряд движется в магнитном поле, на него действует сила Лоренца

$$\vec{F}_L = q[\vec{v}, \vec{B}]$$

Эти силы должны быть равны в силу закона сохранения энергии: $q\vec{E}' = -q[\vec{v}, \vec{B}]$, отсюда

$$\vec{E}' = -[\vec{v}, \vec{B}]$$

Здесь \vec{v} - скорость движения заряда q относительно \vec{B} .

Но для явления электромагнитной индукции важна скорость изменения магнитного поля \vec{B} .

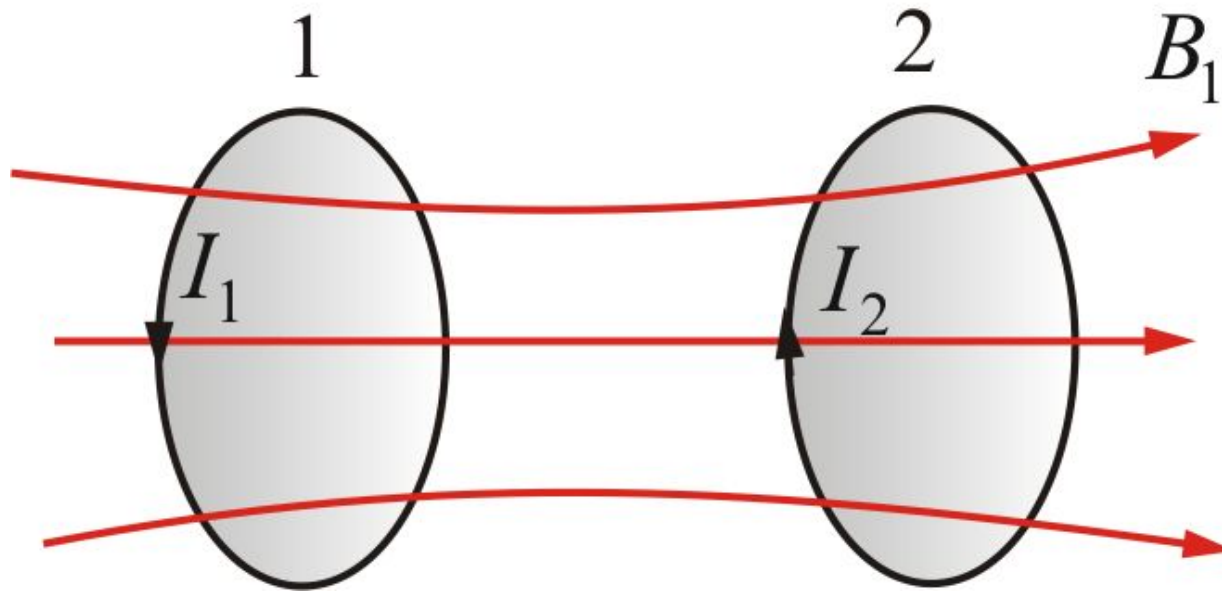
Поэтому можно записать:

$$(11.3) \vec{E}' = -[\vec{v}_B, \vec{B}]$$

Где \vec{v}_B - скорость движения магнитного поля относительно заряда.

Взаимная индукция

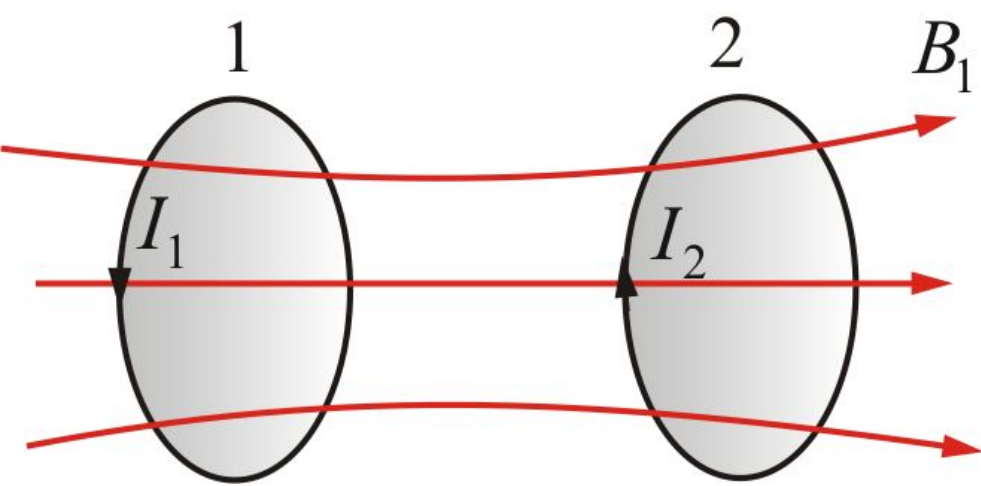
Возьмем два контура, расположенные недалеко друг от друга



В первом контуре течет ток I_1 .

Он создает магнитный поток, который пронизывает и витки второго контура.

$$\Phi_2^{(1)} = L_{21} I_1$$



При изменении тока I_1 во втором контуре наводится ЭДС индукции

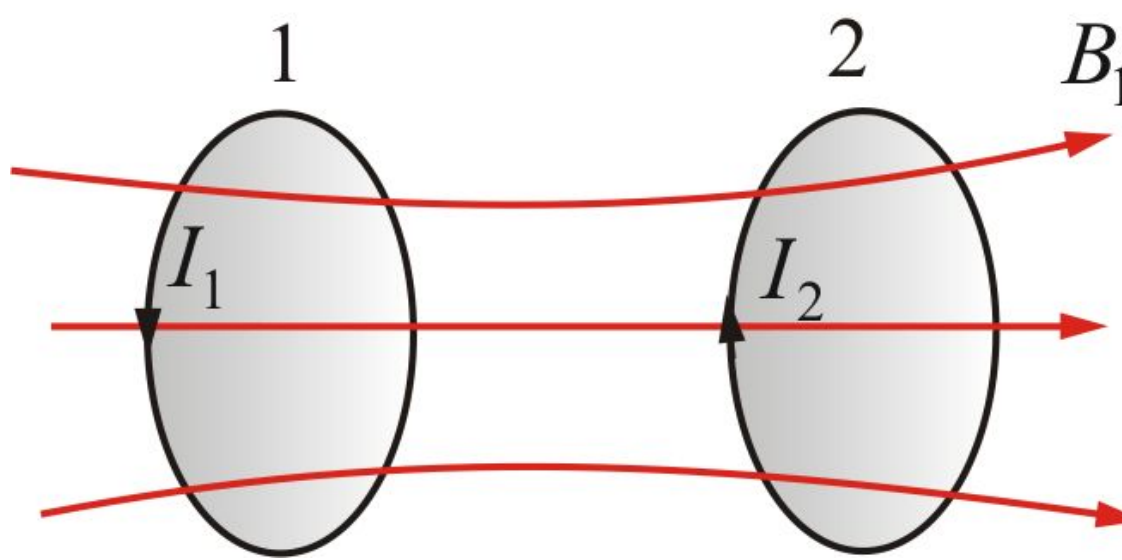
$$\mathbf{E}_{i2} = -L_{21} \frac{dI_1}{dt}$$

Аналогично, ток I_2 второго контура создает магнитный поток пронизывающий первый контур

$$\Psi_1 = L_{12} I_2$$

И при изменении тока I_2 наводится ЭДС

$$\mathbf{E}_{i1} = -L_{12} \frac{dI_2}{dt}$$



Контуров называются *связанными*, а явление – *взаимной индукцией*.

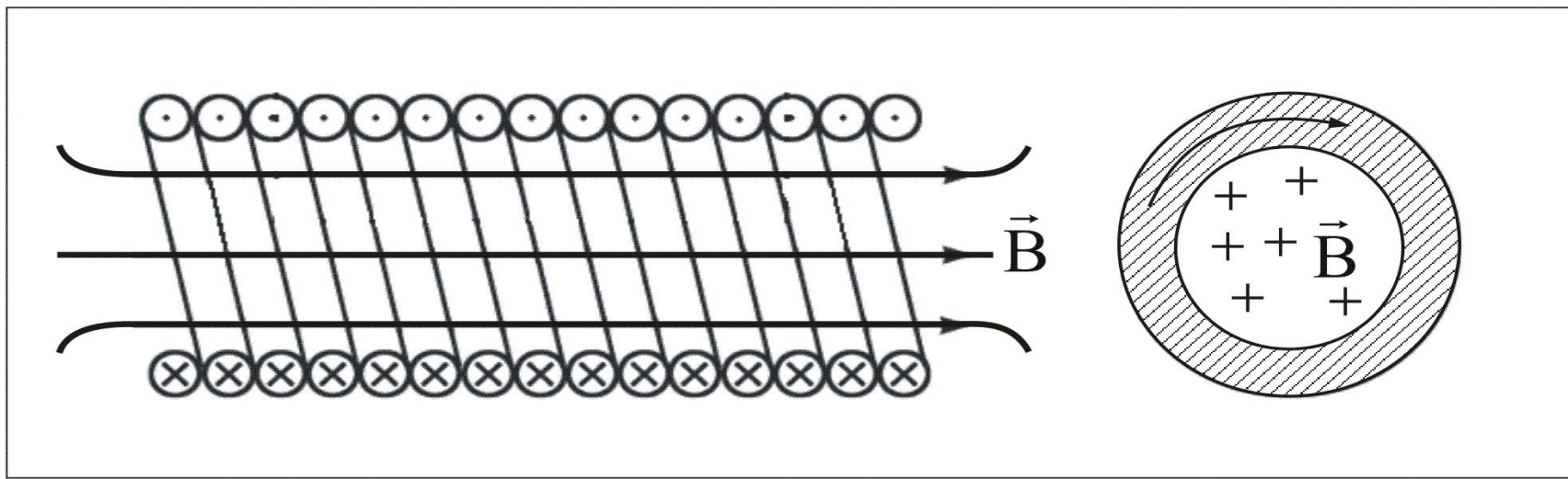
Коэффициенты L_{21} и L_{12} называются *взаимной индуктивностью* или коэффициенты взаимной индукции.

Причём $L_{21} = L_{12} = L$.

Трансформатор является типичным примером двух связанных контуров. Рассмотрим индуктивность трансформатора и найдем коэффициент трансформации.

Явление самоиндукции

До сих пор мы рассматривали изменяющиеся магнитные поля не обращая внимание на то, что является их источником. На практике, чаще всего магнитные поля создаются с помощью различного рода соленоидов, т.е. многовитковых контуров с током.

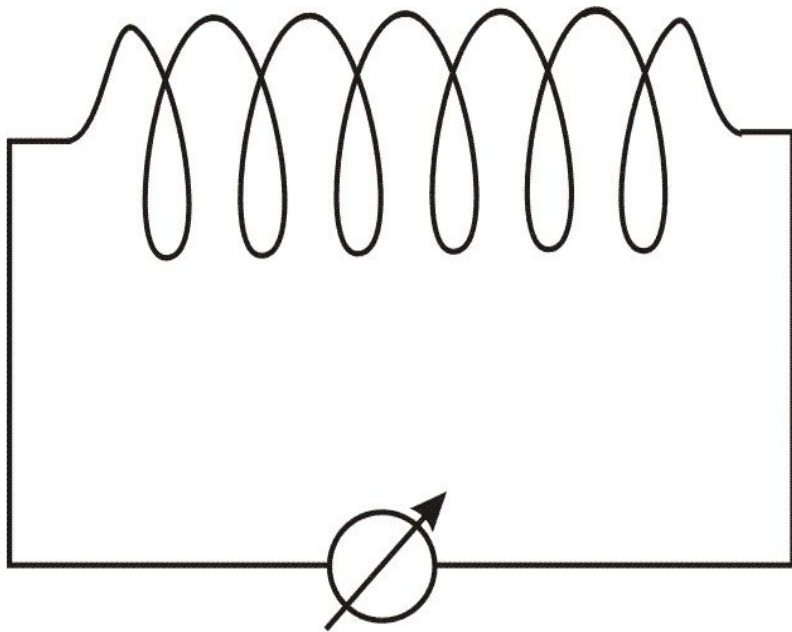


Причины изменения магнитного потока

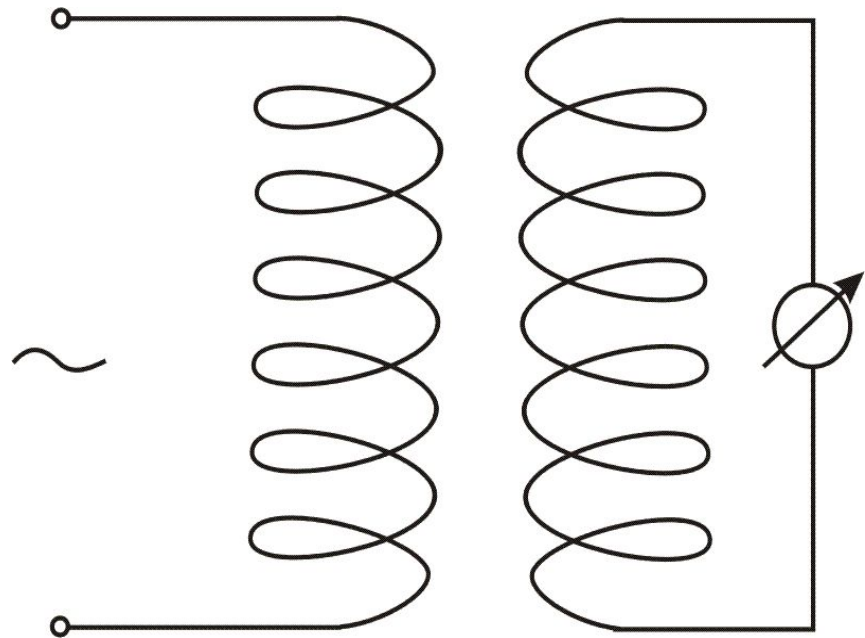
$$\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d(B \cdot S)}{dt} = -S \cdot \left(\frac{dB}{dt} \right)_{S=\text{const}} = -B \cdot \left(\frac{dS}{dt} \right)_{B=\text{const}}$$

**Здесь возможны два случая:
при изменении тока в контуре
изменяется магнитный поток,
пронизывающий:**

а) этот же контур,



б) соседний контур.



- ЭДС индукции, возникающая в самом же контуре называется **ЭДС самоиндукции**, а само явление – **самоиндукция**.
- Если же ЭДС индукции возникает в соседнем контуре, то говорят о явлении **взаимной индукции**.
- Ясно, что **природа явления одна и та же**, а разные названия – чтобы подчеркнуть место возникновения ЭДС индукции.
- Явление самоиндукции открыл американский ученый **Дж. Генри** в 1831 г.

Явление самоиндукции:

Ток I , текущий в любом контуре создает магнитный поток Ψ , пронизывающего этот же контур. При изменении I , будет изменяться Ψ , следовательно в контуре будет наводиться ЭДС индукции.

Т.к. магнитная индукция B пропорциональна току I ($B = \mu\mu_0 nI$), следовательно

$$\Psi = LI,$$

где L – коэффициент пропорциональности, названный *индуктивностью контура*.

$L = \text{const}$, если внутри контура нет ферромагнетиков, т.к. $\mu = f(I) = f(H)$

Индуктивность контура L *зависит от геометрии контура: числа витков, площади витка контура.*

За единицу индуктивности в СИ принимается индуктивность такого контура, у которого при токе $I = 1\text{А}$ возникает полный поток $\Psi = 1\text{Вб}$.

Эта единица называется Генри (Гн).

Размерность индуктивности $[L] = \text{Гн}$

$$[L] = \frac{\Psi}{[I]} = \frac{\text{Вб}}{\text{А}} = \frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{А}} = \text{Ом} \cdot \text{с} = 1\text{Гн}$$

Вычислим **индуктивность соленоида L** .

Если длина соленоида l гораздо больше его диаметра d ($l \gg d$), то к нему можно применить формулы для бесконечно длинного соленоида.

Тогда

$$B = \mu\mu_0 I \frac{N}{l} \quad (12.1.1)$$

Здесь N – число витков.

Поток через каждый из витков $\Phi = BS$

Потокосцепление

$$\Psi = NBS = \mu\mu_0 I \frac{N}{l} NS = \mu\mu_0 \frac{N^2 S}{l} I \quad (12.1.2)$$

Мы знаем, что $\Psi = LI$ тогда
ИНДУКТИВНОСТЬ СОЛЕНОИДА

$$(12.1.3) \quad L_{\text{сол}} = \mu\mu_0 \frac{N^2 S}{l} = \mu\mu_0 n^2 l S$$

где n – число витков на единицу длины, т.е.

$$n = \frac{N}{l}, \quad l S = V$$

V – объем соленоида, значит

$$(12.1.4) \quad L_{\text{сол}} = \mu\mu_0 n^2 V$$

Можно найти **размерность для μ_0**

$$[\mu_0] = \frac{[L][I]}{[S]} = \frac{\text{Гн} \cdot \text{м}}{\text{м}^2} = \frac{\text{Гн}}{\text{м}}$$

При изменении тока в контуре в нем возникает ЭДС самоиндукции, равная

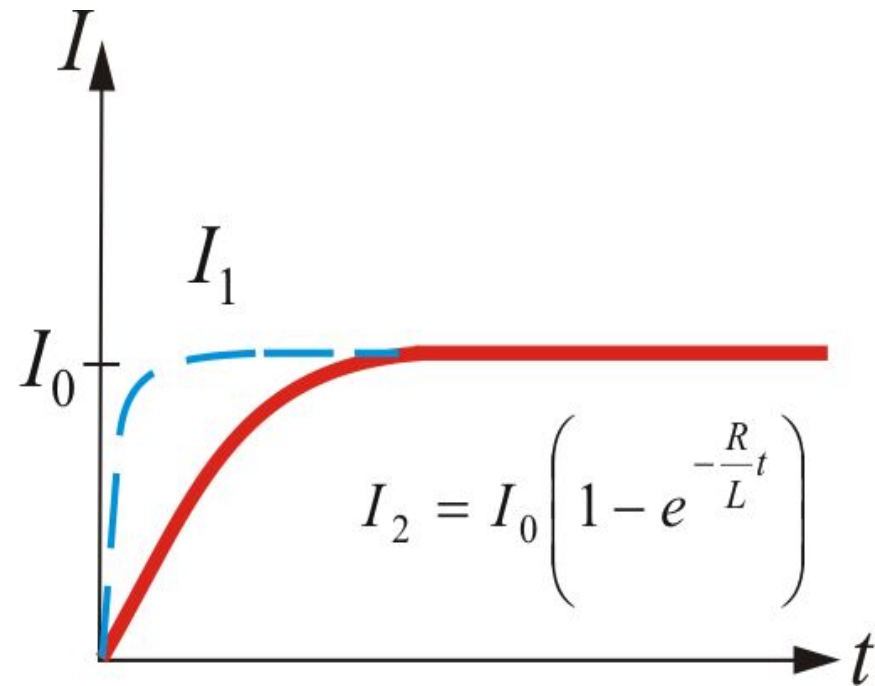
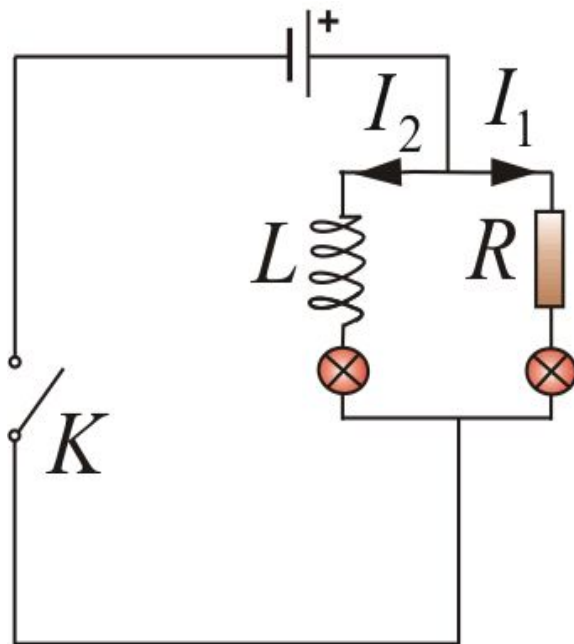
$$\mathcal{E}_i = -\frac{d\Psi}{dt} = -\frac{d(IL)}{dt} = -L \frac{dI}{dt}$$

Знак минус в этой формуле обусловлен правилом Ленца.

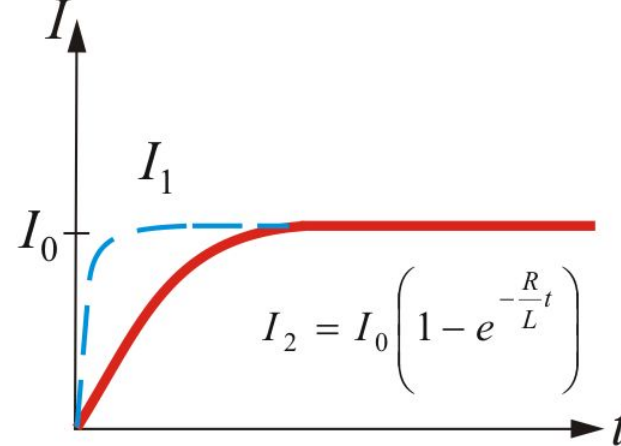
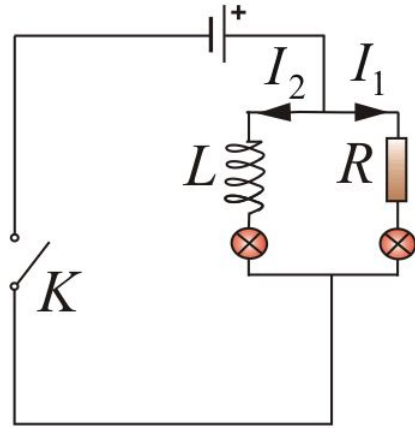
$$\mathcal{E}_i = -L \frac{dI}{dt}$$

Влияние самоиндукции на ток при размыкании и замыкании цепи, содержащей ИНДУКТИВНОСТЬ

Случай 1.



По правилу Ленца, токи возникающие в цепях вследствие самоиндукции всегда направлены так, чтобы препятствовать изменению тока, текущего в цепи.



Это приводит к тому, что при замыкании ключа K установление тока I_2 в цепи содержащей индуктивность L , будет происходить не мгновенно, а постепенно.

Сила тока в этой цепи будет удовлетворять уравнению

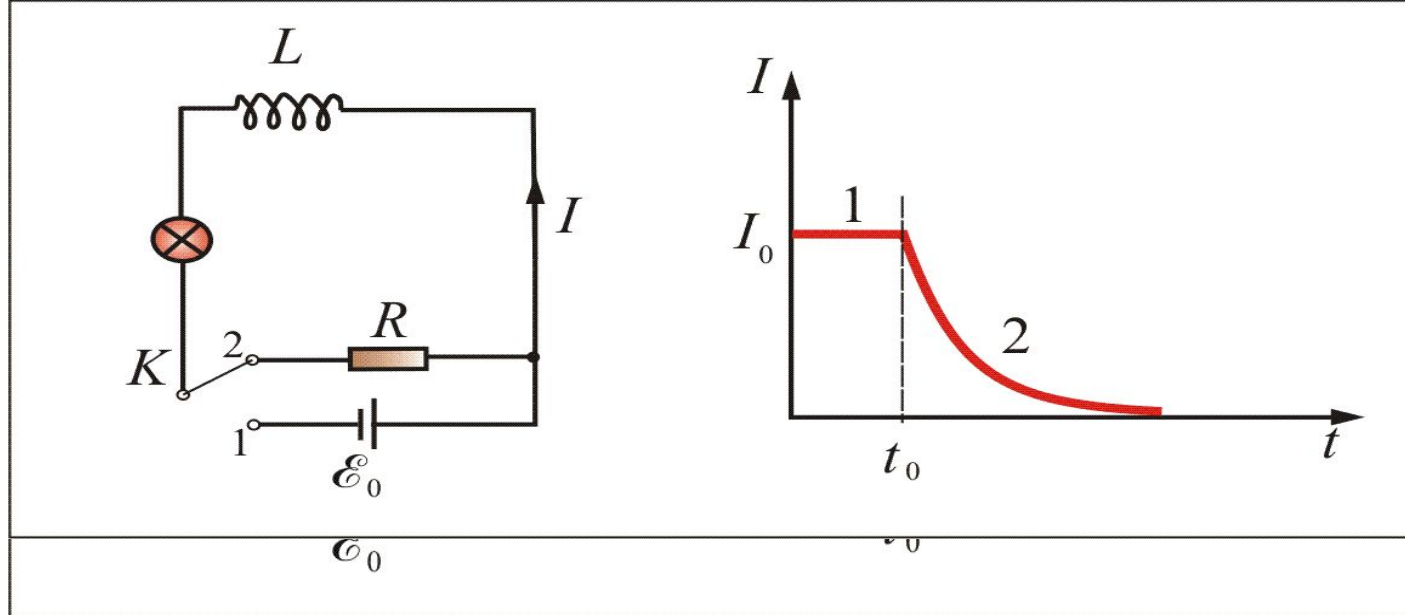
$$I_2 = I_0 \left(1 - e^{-\frac{R}{L}t} \right)$$

Скорость возрастания тока будет характеризоваться **постоянной времени цепи**

$$(12.2.2) \quad \frac{L}{R}$$

В цепи, содержащей только активное сопротивление R ток I_1 установится практически мгновенно.

Случай 2.

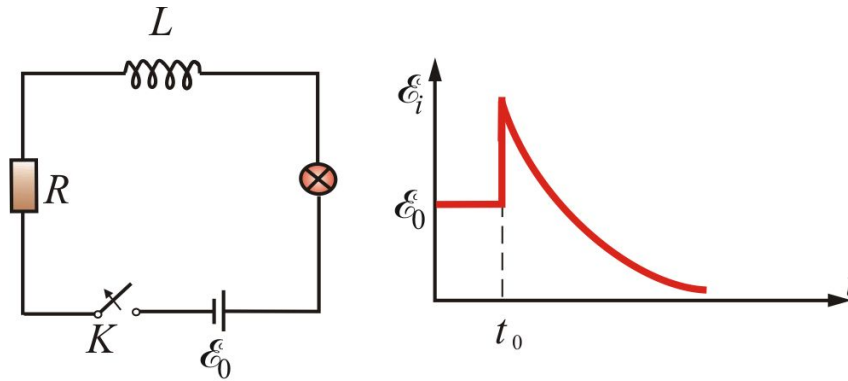


При переводе ключа из положения 1 в 2 в момент времени t_0 , ток начнет уменьшаться но ЭДС самоиндукции будет поддерживать ток в цепи, т.е. препятствовать резкому уменьшению тока. В этом случае убывание тока в цепи можно описать уравнением

Оба эти случая говорят, что **чем больше индуктивность цепи L и чем меньше сопротивление R , тем больше постоянная времени τ и тем медленнее изменяется ток в цепи.**

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

Случай 3. Размыкание цепи содержащей индуктивность L



Т.к. цепь разомкнута, ток не течёт, поэтому рисуем зависимость $\mathcal{E}_i(t)$.

При размыкании цепи в момент времени t_0 $R \rightarrow \infty$

Это приводит к **резкому возрастанию ЭДС индукции, определяемой по формуле**

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

Происходит этот скачок вследствие ~~большой~~ величины скорости изменения тока $\frac{dI}{dt}$

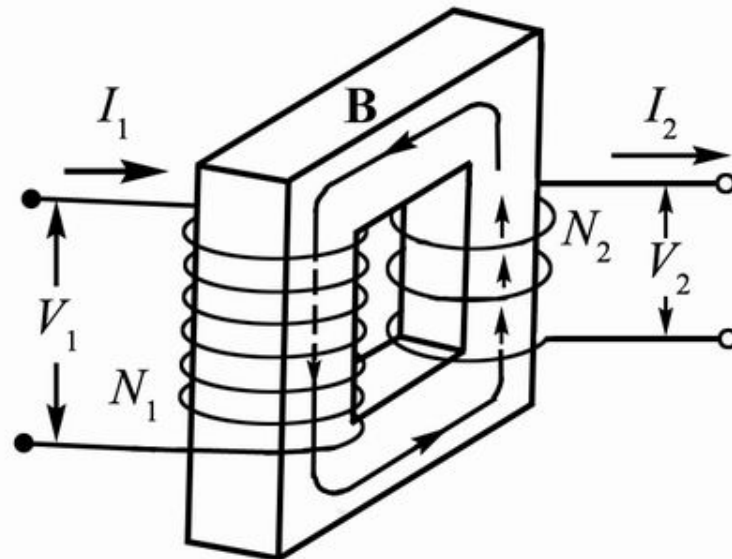
E_i резко возрастает по сравнению с E_0 и даже может быть в несколько раз больше E_0 .

Нельзя резко размыкать цепь, состоящую из трансформатора и других индуктивностей.

Индуктивность трансформатора

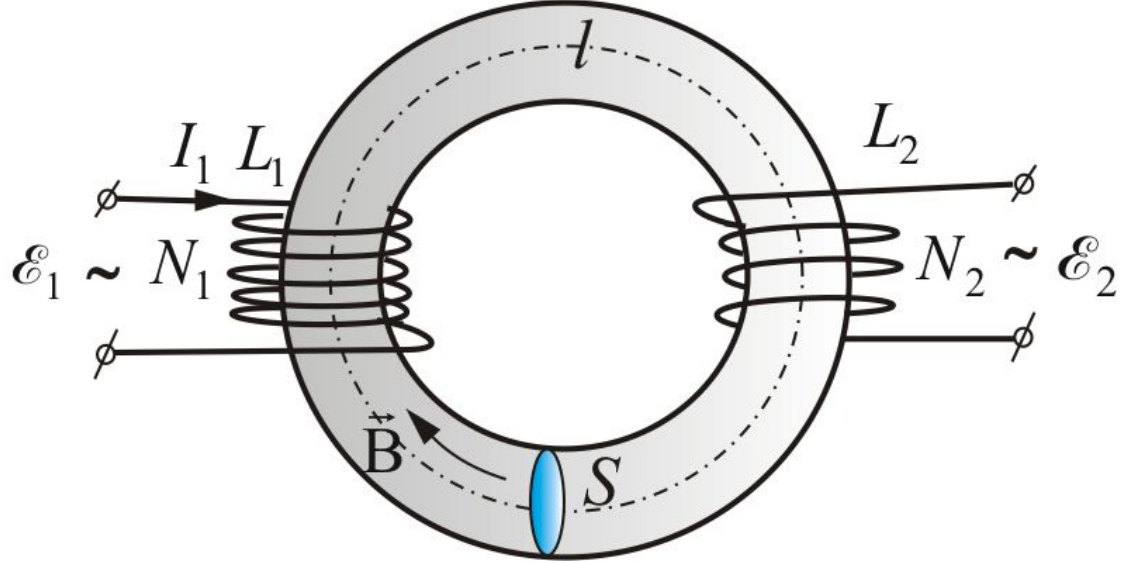
Явление взаимной индукции используется в широко распространенных устройствах – *трансформаторах*.

Трансформатор был изобретен Яблочковым – русским ученым, в 1876г. для отдельного питания отдельных электрических источников света (свечи Яблочкова).



a

б



Рассчитаем **взаимную индуктивность двух катушек L_1 и L_2** , намотанных на **общий сердечник**

Когда в первой катушке идет ток I_1 , в сердечнике возникает магнитная индукция \vec{B} и магнитный поток Φ через поперечное сечение S .

Магнитное поле тороида можно рассчитать по формуле

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

Через вторую обмотку проходит полный магнитный поток Ψ_2 сцепленный со второй обмоткой

$$\Psi_2 = N_2 B S = \mu \mu_0 \frac{N_1 N_2}{l} S I_1$$

К первичной обмотке подключена переменная ЭДС E_1 .

По закону Ома ток в этой цепи будет определяться алгебраической суммой внешней ЭДС и ЭДС индукции.

$$E_1 = - \frac{d(N_1 \Phi)}{dt} + I_1 R_1$$

где R_1 – сопротивление обмотки.

R_1 – делают малым (медные провода) и $I_1 R_1 \rightarrow 0$

Тогда переменная ЭДС в первичной обмотке:

$$E_1 \approx \frac{d(N_1\Phi)}{dt} \approx N_1 \frac{d\Phi}{dt}$$

Во вторичной обмотке, по аналогии

$$E_2 \approx N_2 \frac{d\Phi}{dt}$$

отсюда

$$\frac{E_1}{E_2} \approx \frac{N_1}{N_2}$$

Если пренебречь потерями, предположить, что $R \approx 0$,

то

$$E_1 I_1 \approx E_2 I_2$$

Коэффициент трансформации

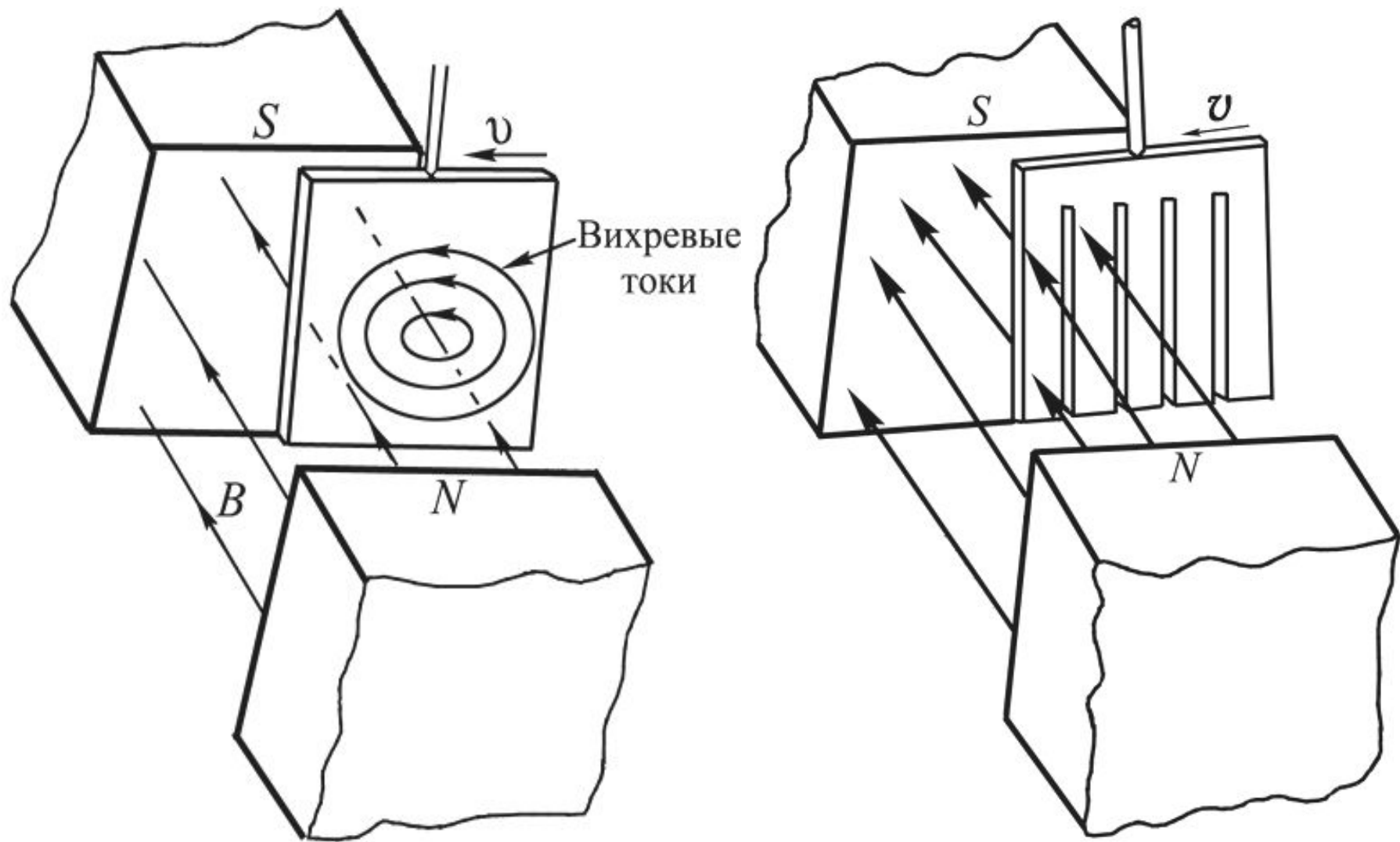
$$\eta = \frac{E_2}{E_1} = \frac{N_2}{N_1}.$$

11.6. Токи Фуко

До сих пор мы рассматривали индукционные токи в линейных проводниках. Но **индукционные токи будут возникать и в толще сплошных проводников при изменении в них потока вектора магнитной индукции**.

Они будут циркулировать в веществе проводника (напомним, что линии \vec{B} – замкнуты). Так как **электрическое поле вихревое и токи называются вихревыми**.

Именно поэтому **сердечник трансформатора делают не сплошным, а из пластин изолированных друг от друга** иначе сердечник сильно бы грелся – это вредное действие токов Фуко.



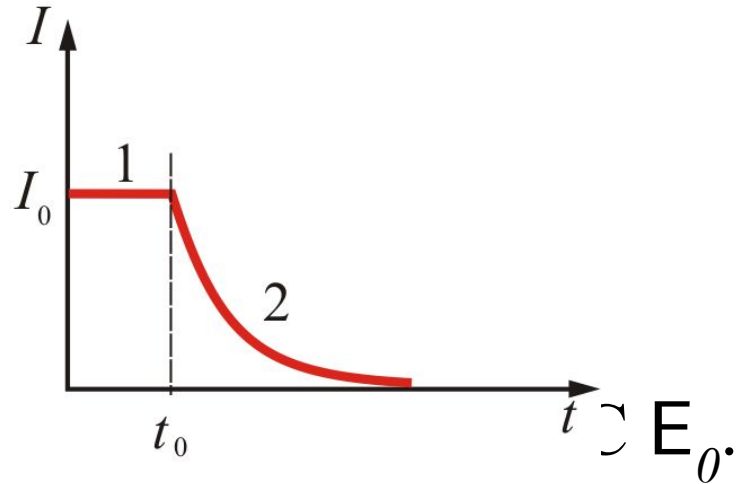
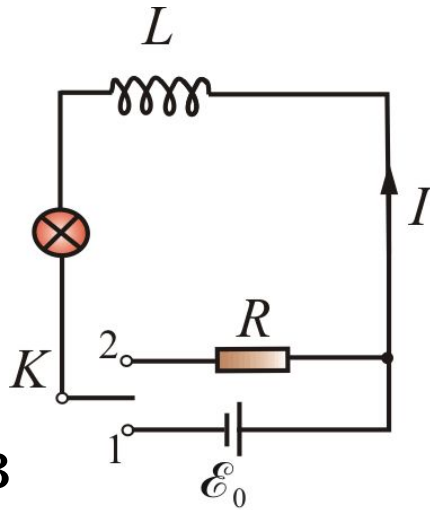
Тормозящее действие тока Фуко используется для создания *магнитных успокоителей – демпферов*.

Если под качающейся в горизонтальной плоскости магнитной стрелкой расположить массивную медную пластину, то возбуждаемые в медной пластине токи Фуко будут тормозить колебание стрелки. Магнитные успокоители такого рода используются в сейсмографах, гальванометрах и других приборах.

- Токи Фуко применяются в электрометаллургии для плавки металлов.
- Металл помещают в переменное магнитное поле, создаваемое током частотой $500 \div 2000$ Гц.
- В результате индуктивного разогрева металл плавится, а тигль, в котором он находится, при этом остается холодным.
- Например, при подведенной мощности 600 кВт тонна металла плавится за 40–50 минут.

Энергия магнитного поля

Рассмотрим случай, о котором мы уже говорили:



Сначала 3

В нем будет протекать ток I_0 .

Затем в момент времени t_0 переключим ключ в положение 2 – замкнем соленоид на сопротивление R .

В цепи будет течь убывающий ток I .

Будет совершена работа:
$$dA = \mathbf{E}_i \mathbf{I} dt \quad (12.5.1)$$

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

$$A = -L \int_I^0 I dI = \frac{LI^2}{2} \quad (12.5.2)$$

$$A = \frac{LI^2}{2}$$

Эта работа пойдет на нагревание проводников.

Но откуда взялась эта энергия? Поскольку других изменений кроме исчезновения магнитного поля в окружающем пространстве не произошло, остается заключить: *энергия была локализована в магнитном поле.*

Значит, *проводник, с индуктивностью L , по которой течет ток I , обладает энергией*

$$(12.5.3) \quad W = \frac{LI^2}{2}$$

- Выразим **энергию** через параметры магнитного поля.

- Индуктивность соленоида

$$L = \mu\mu_0 n^2 l S = \mu\mu_0 n^2 V$$

где V – объем соленоида. $I = \frac{H}{n}$

- Подставим эти значения в формулу для энергии:

$$W = \frac{\mu\mu_0 n^2 V H^2}{2n^2} = \frac{\mu\mu_0 H^2}{2} V$$

- **Энергия маг. поля соленоида:**

$$W = \frac{\mu\mu_0 H^2}{2} V$$

- Обозначим w – *плотность энергии*,
или *энергия в объеме V* ,

Тогда:

$$w = \frac{W}{V} \stackrel{(12.5.7)}{=} \frac{\mu\mu_0 H^2}{2}$$

НО Т.К. $B = \mu\mu_0 H$ ТО

$$w = \frac{BH}{2} \quad (12.5.8) \quad w = \frac{B^2}{2\mu\mu_0}$$

Энергия однородного магнитного поля *в длинном соленоиде* может быть рассчитана по формуле

$$W = \frac{1}{2} \mu \mu_0 n^2 I^2 V,$$

а плотность энергии

$$w = \frac{1}{2} \mu \mu_0 n^2 I^2$$

***Плотность энергии магнитного поля
в соленоиде с сердечником
будет складываться из энергии поля в
вакууме и в магнетике сердечника:***

$$W = W_{\text{вак.}} + W_{\text{магнет.}}$$

отсюда $W_{\text{магнет.}} = W - W_{\text{вак.}}$

Т.к. в вакууме $\mu = 1$, имеем

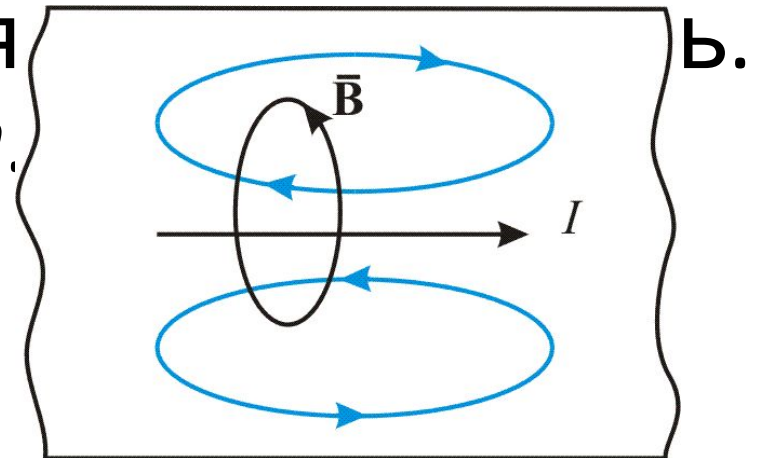
$$W_{\text{магнет.}} = \frac{\mu\mu_0 H^2}{2} - \frac{\mu_0 H^2}{2} = \frac{\mu_0(\mu - 1)H^2}{2}.$$

Скин-эффект

В проводах, по которым текут токи высокой частоты (ВЧ), также возникают вихревые токи, существенно изменяющие картину распределения плотности тока по сечению проводника.

При этом **вихревые токи по оси проводника текут против направления основного тока, а на поверхности – в том же направлении**

Ток как бы вытесняется к поверхности. Это и есть **скин-эффект**.



Провода для переменных токов высокой частоты, учитывая скин-эффект, **сплетают из большого числа тонких проводящих нитей, изолированных друг от друга эмалевым покрытием – литцендратом.**

ВЧ-токи используются для закалки поверхностей деталей: поверхностный слой разогревается быстро в ВЧ-поле, закаливается и становится **прочным, но не хрупким**, так как внутренняя часть детали не разогревалась и не закаливалась.