

ЯВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ

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.

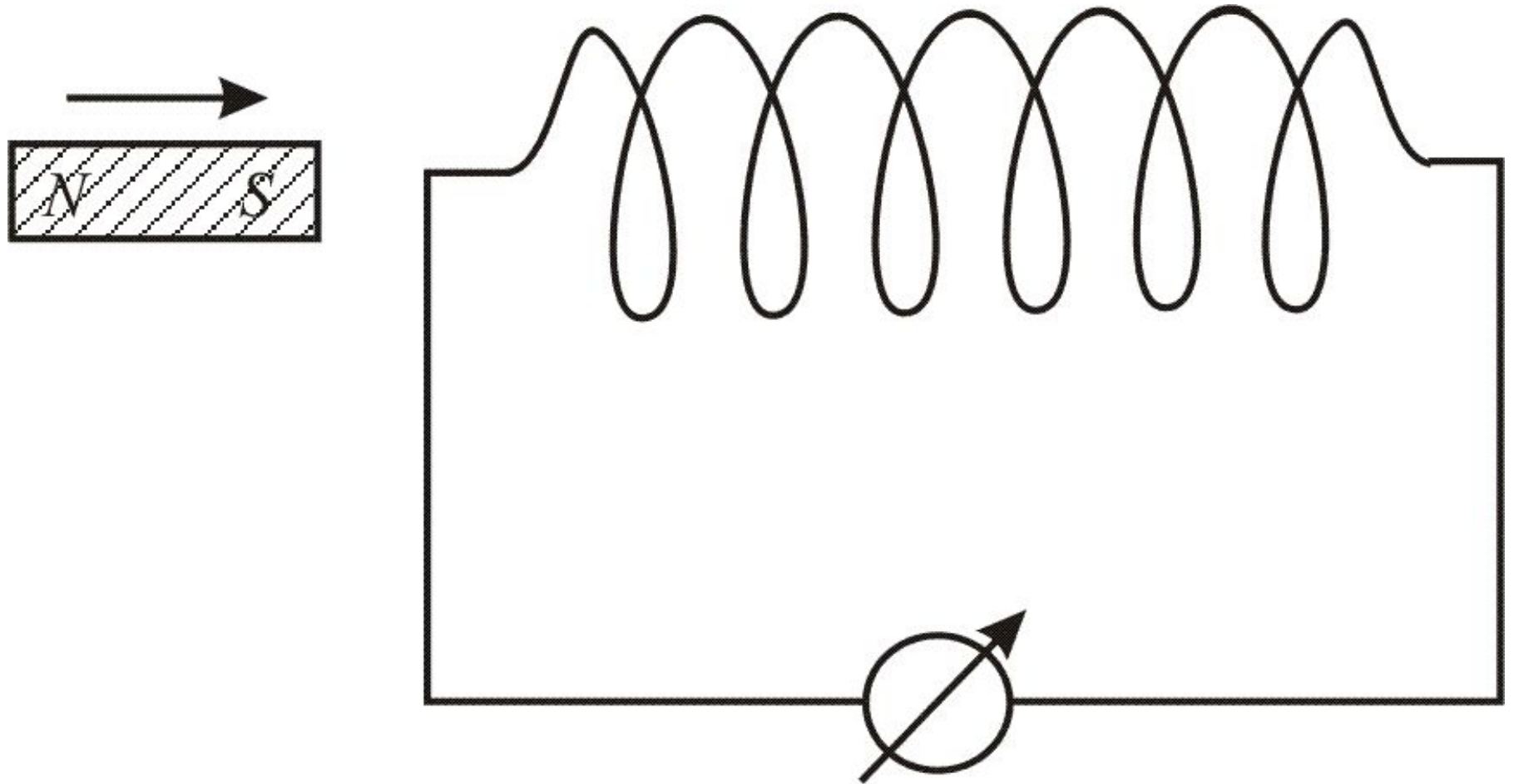
Американец Джозеф Генри тоже открыл, но не успел опубликовать свои результаты. Ампер также претендовал на открытие, но не смог

ФАРАДЕЙ Майкл (1791 – 1867) – знаменитый английский физик.

Исследования в области электричества, магнетизма, магнитооптики, электрохимии. Создал лабораторную модель электродвигателя. Открыл экстратоки при замыкании и размыкании цепи и установил их направление. Открыл законы электролиза, первый ввел понятия поля и диэлектрической проницаемости, в 1845 употребил термин «магнитное поле».

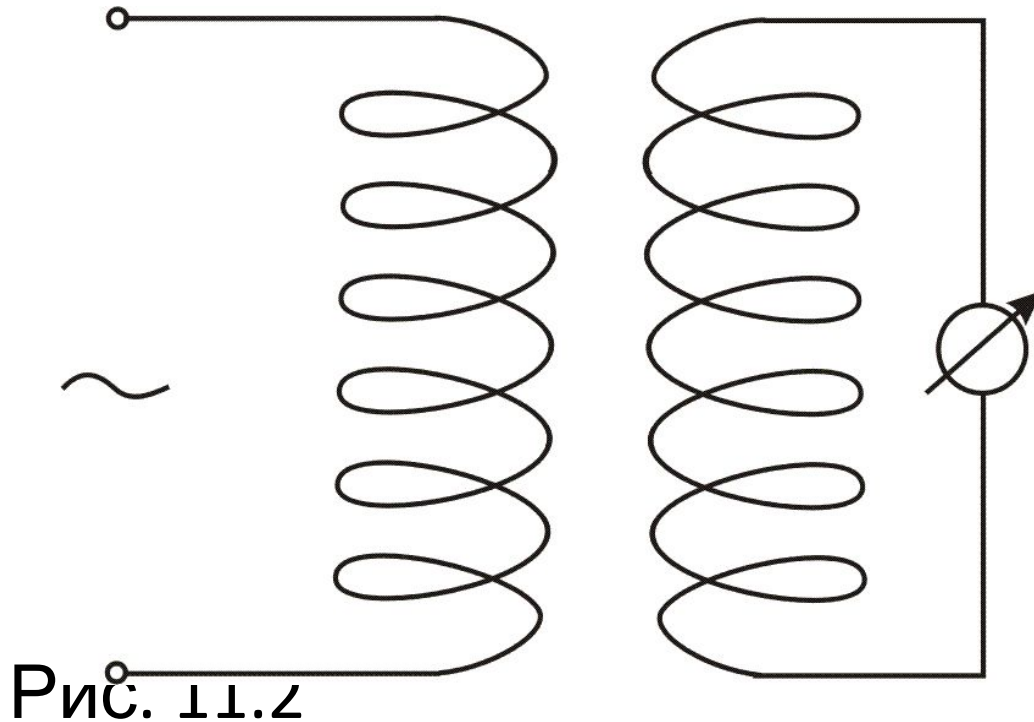
Кроме всего прочего М. Фарадей открыл явления диа и парамагнетизма. Он установил, что все материалы в магнитном поле ведут себя по-разному: ориентируются по полю (пара и ферромагнетики) или поперек поля – диамагнетики.

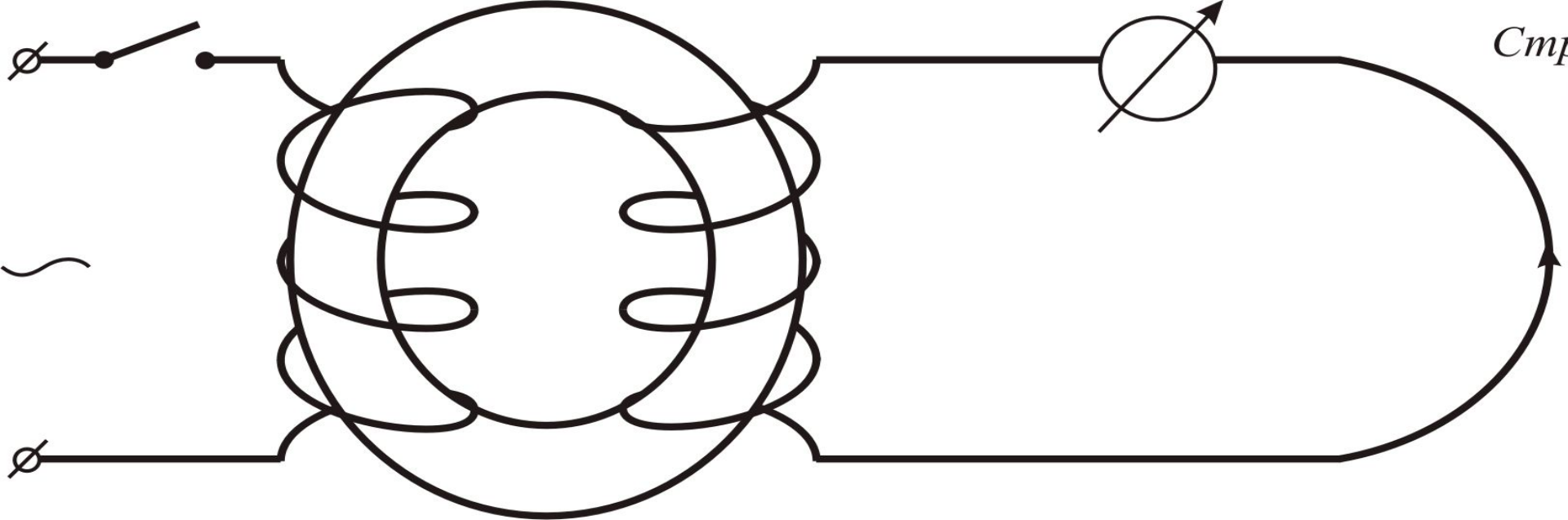
Из школьного курса физики **опыты Фарадея** хорошо известны: катушка и постоянный магнит



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

Тоже самое с двумя близко расположенными катушками: 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.





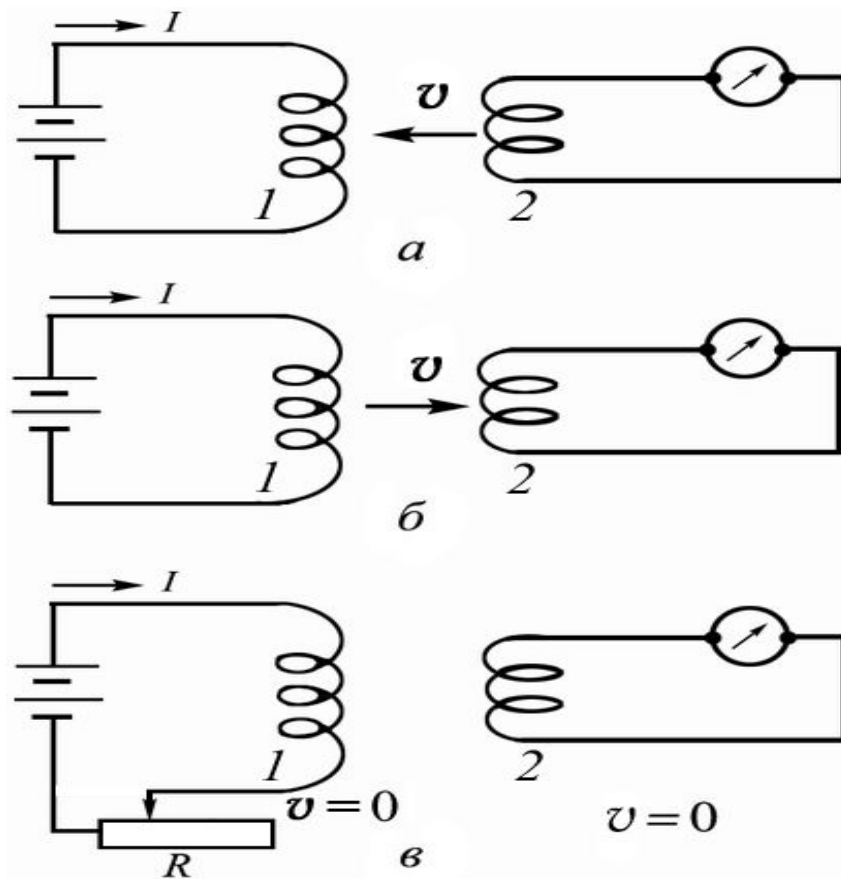
Заполнение всего пространства однородным магнетиком приводит при прочих равных условиях к **увеличению индукции в μ раз**.

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

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.

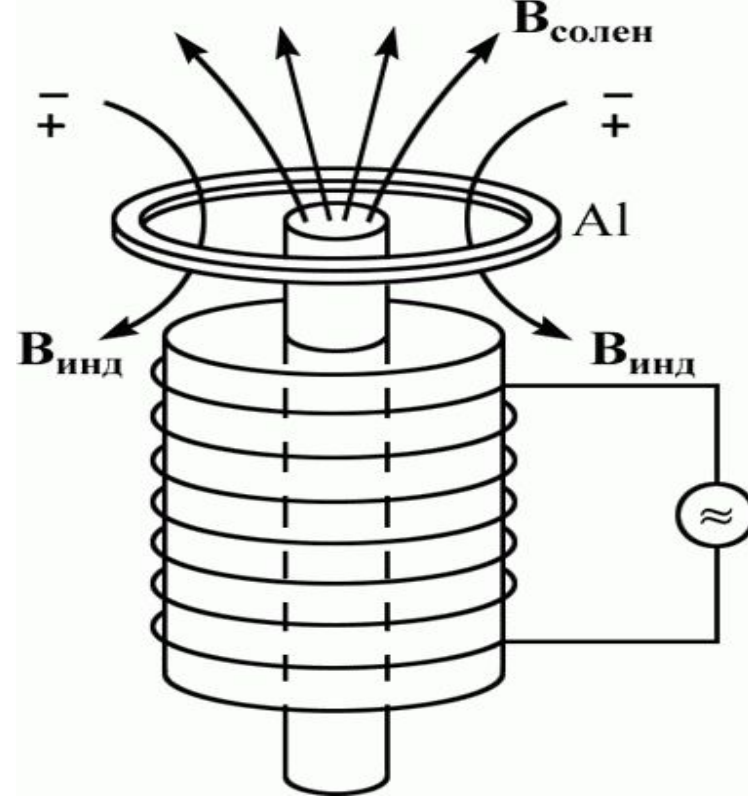


Итак, получается, что **движущиеся заряды (ток) создают магнитное поле, а движущееся магнитное поле создает (вихревое) электрическое поле или индукционный ток**

Для каждого конкретного случая Фарадей указывал направление индукционного тока.

В 1833 г. Ленц установил общее **правило нахождения направления тока**:
индукционный ток всегда направлен так, что магнитное поле этого тока препятствует изменению магнитного потока, вызывающего индукционный ток.

Это утверждение носит название правила Ленца.



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

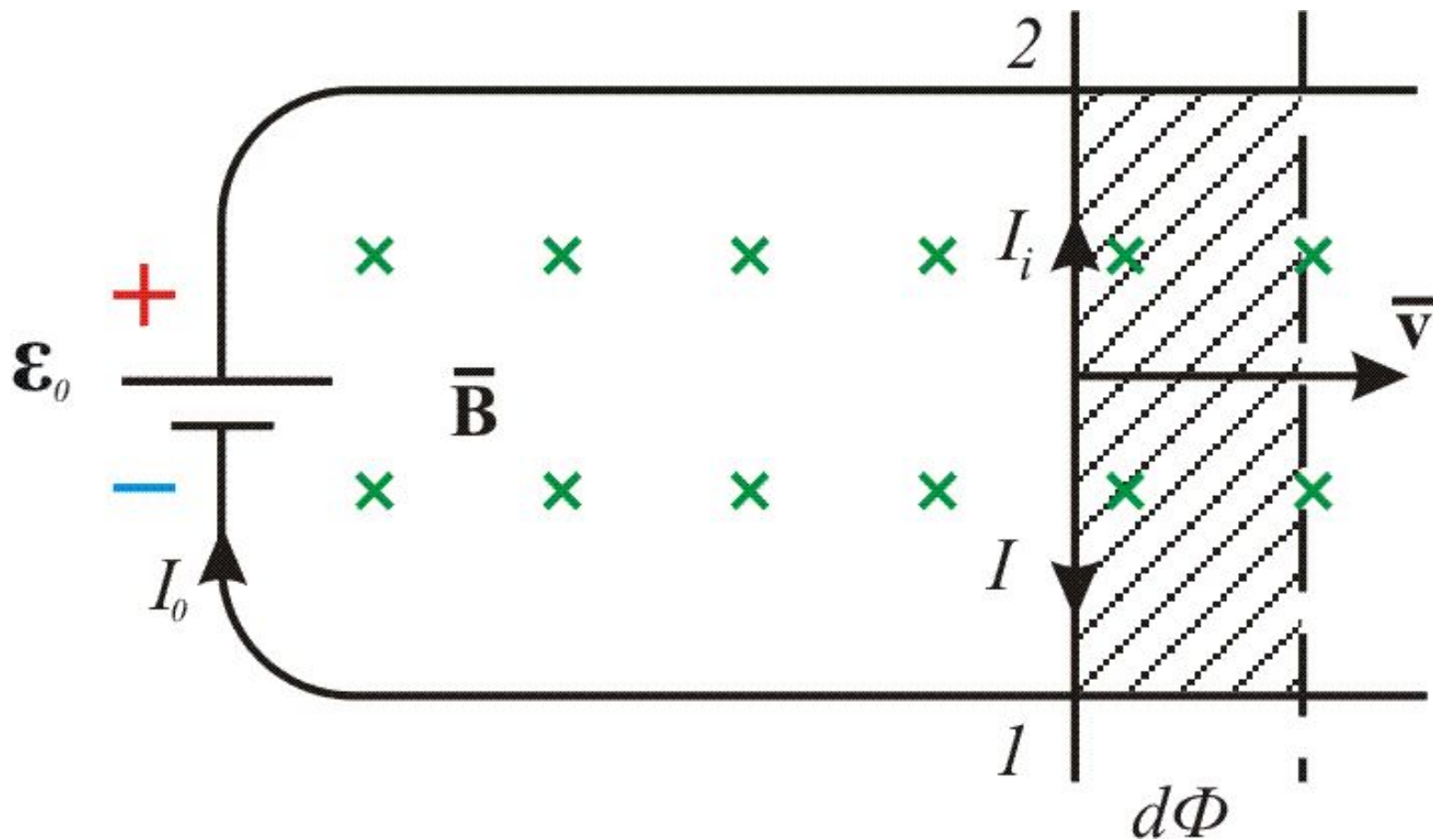
Сила отталкивания возникает в соответствии с **правилом Ленца – индукционный ток порождает магнитное поле, препятствующее изменению магнитного потока в контуре**

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 .

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 \mathbf{B}



Пусть сначала магнитное поле отсутствует.

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

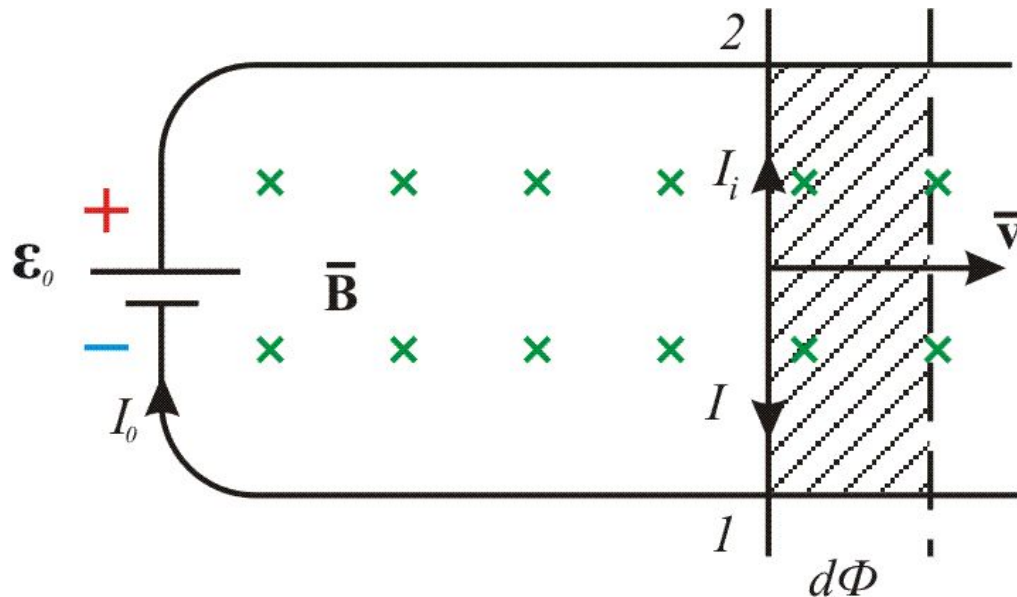
$$dA = \mathcal{E}_0 I_0 dt$$

– эта работа будет

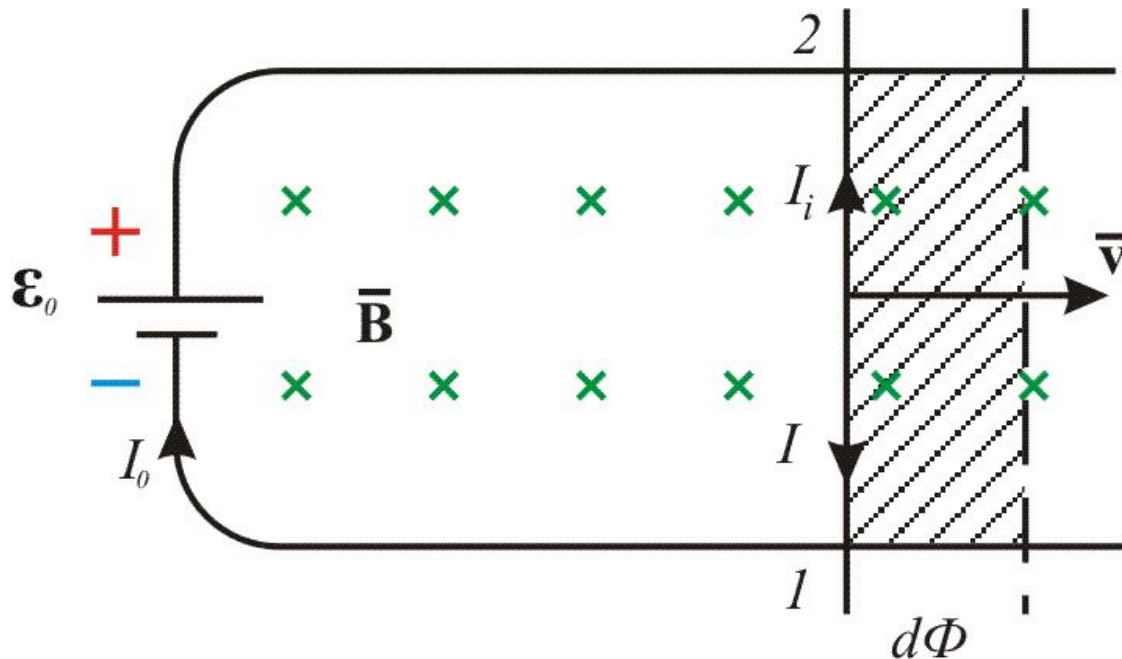
переходить в тепло которое можно найти по закону Джоуля-Ленца:

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

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



Теперь включим магнитное поле \vec{B} .
 Каждый элемент контура испытывает механическую силу $d\vec{F}$.
 Подвижная сторона рамки будет испытывать силу F_0 .
 Под действием этой силы участок 1-2 будет перемещаться со скоростью $v = dx/dt$.

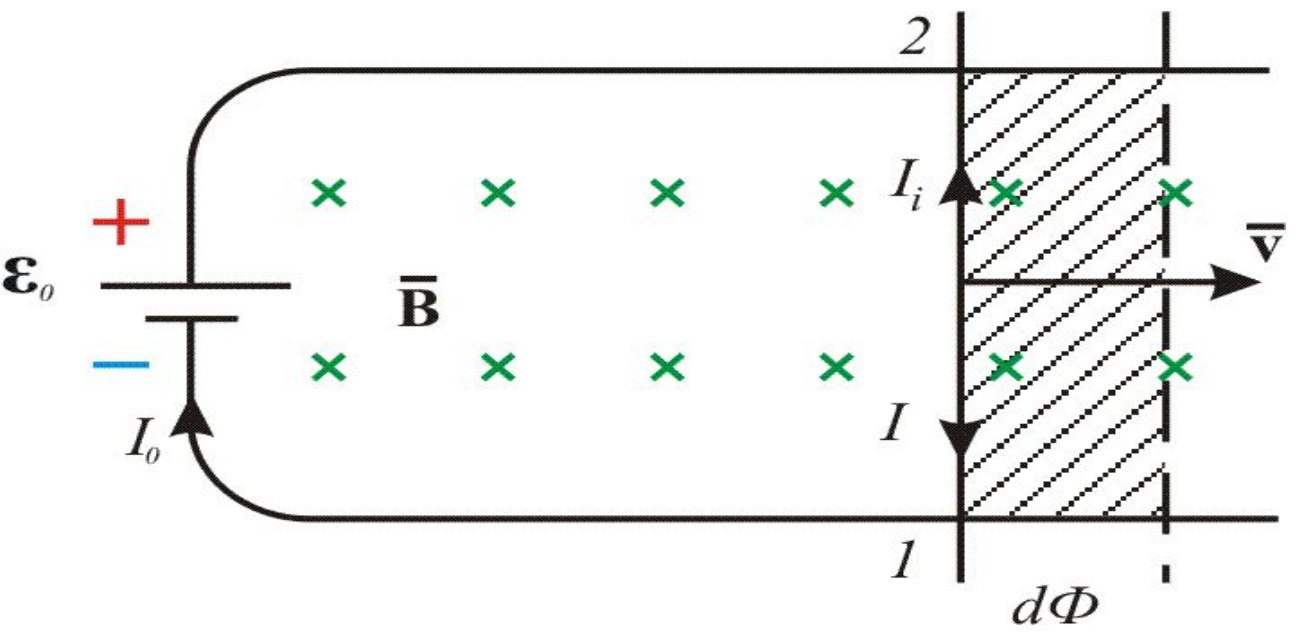


При движении проводника **изменится и поток магнитной индукции.**

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 $dA = Fdx = Id\Phi$.

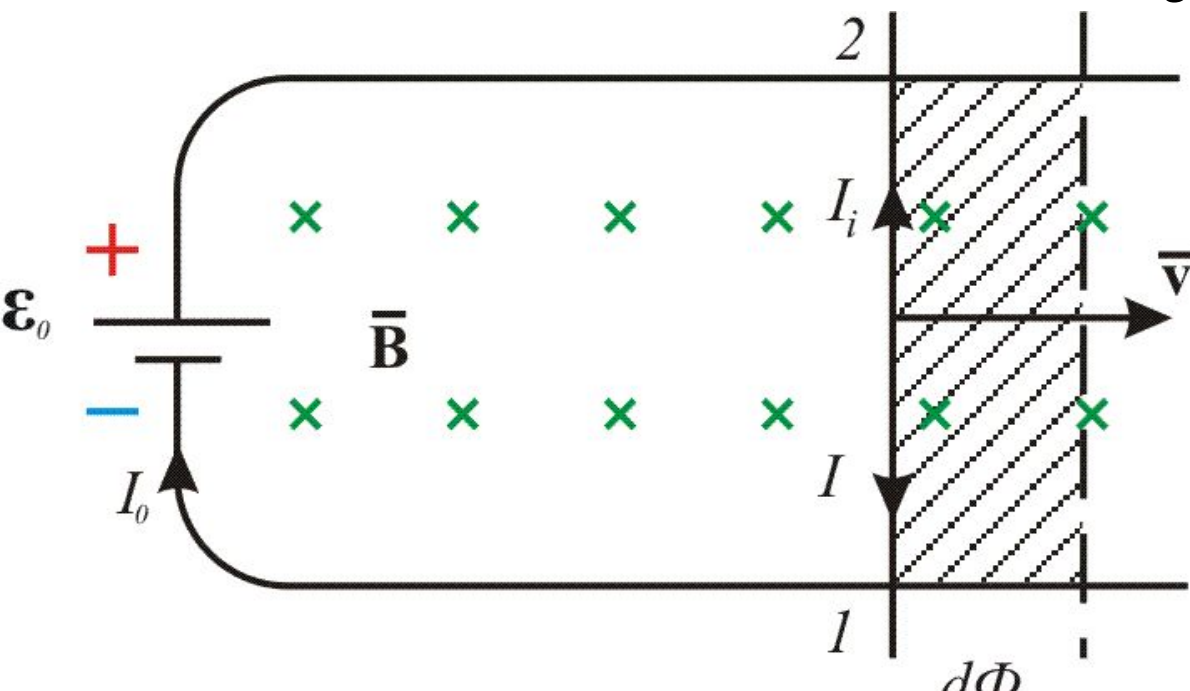


Как и в случае, когда все элементы рамки неподвижны, источником работы является \mathcal{E}_0 .

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



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

правую часть выражения на

Умножим левую и
правую часть на $IRdt$
, получим

Отсюда

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

$$I = \frac{\mathcal{E}_0 - \frac{d\Phi}{dt}}{R}$$

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

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

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

М. Фарадей

ЗАКОН ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ

ЭДС индукции контура \mathcal{E} () равна скорости изменения потока магнитной индукции, пронизывающего этот контур.

Закон Фарадея.

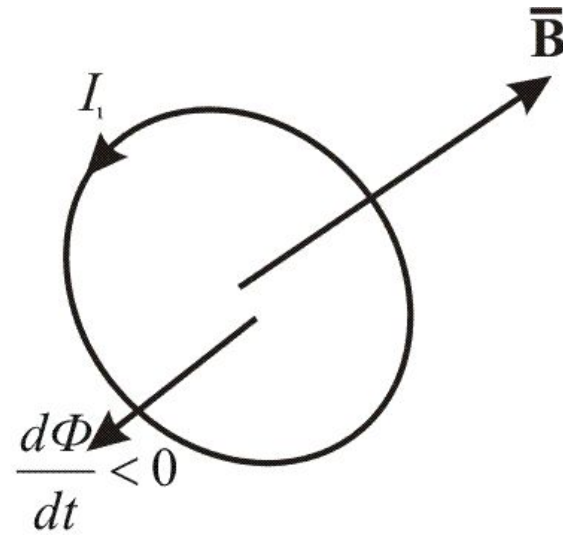
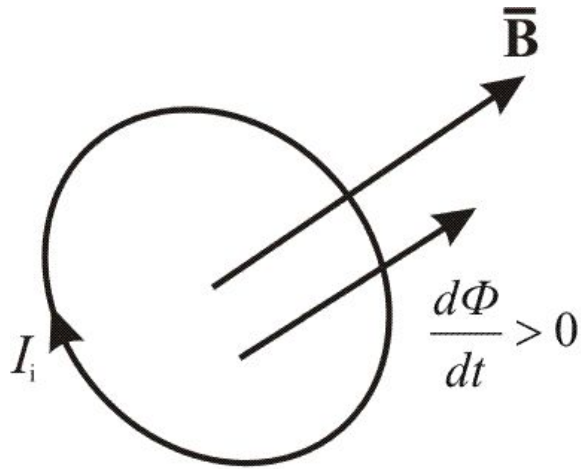
$$\mathcal{E}_i = - \frac{d\Phi}{dt}$$

Это выражение для ЭДС индукции контура является совершенно универсальным, не зависящим от способа изменения потока магнитной индукции и носит название **закон Фарадея**.

Знак (-) – математическое выражение **правила Ленца** о направлении индукционного тока:
индукционный ток всегда направлен так, чтобы своим полем противодействовать изменению начального магнитного поля.

Направление индукционного тока и направление связаны *правилом буравчика* :

$$\frac{d\Phi}{dt}$$



$$\mathcal{E}_i = -\frac{d\Phi}{dt} \quad \text{Отсюда размерность ЭДС индукции: } [\mathcal{E}_i] = \mathbf{B}.$$

$$[\mathcal{E}_i] = \frac{[\Phi]}{[t]} = \frac{Bc}{c} = \mathbf{B}.$$

Если контур состоит из нескольких витков, то надо пользоваться понятием **потокосцепления (полный магнитный поток)**:

$$\Psi = \Phi \cdot N,$$

где N – число витков.

Итак, если

$$\mathcal{E}_i = - \sum_{i=1}^N \frac{d\Phi_i}{dt} = - \frac{d}{dt} \sum \Phi_i$$

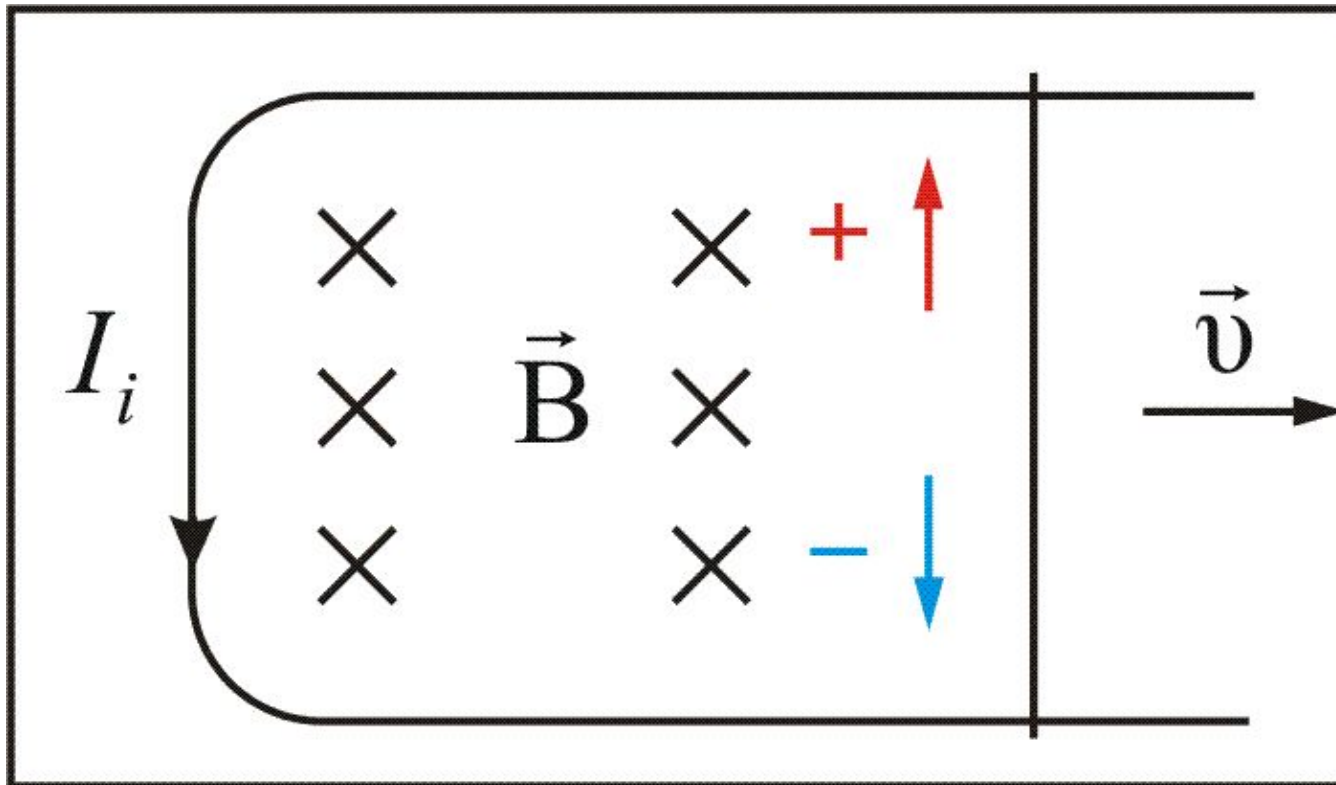
$$\Psi = \sum \Phi$$

Тогда

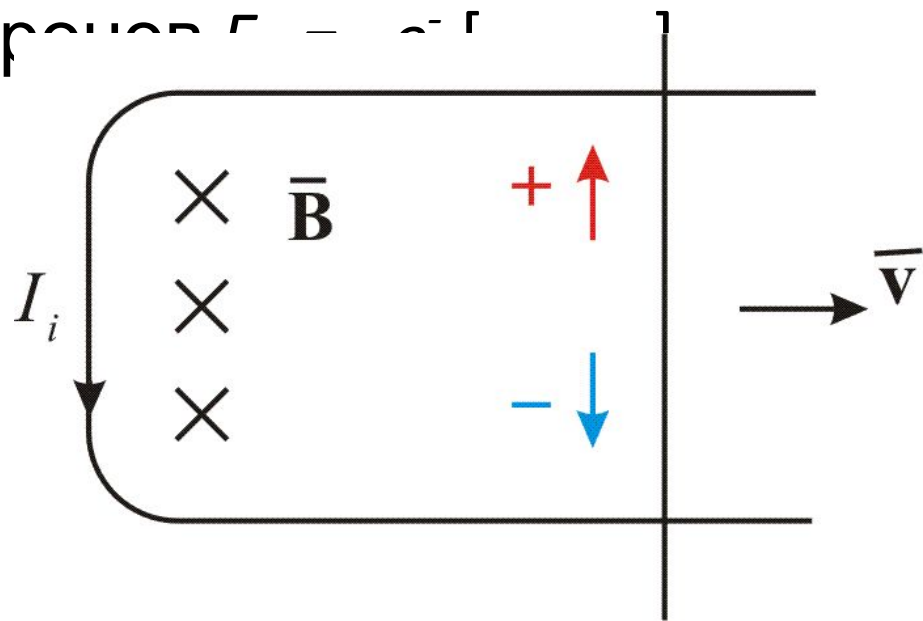
$$\mathcal{E}_i = - \frac{d\Psi}{dt}$$

Природа Э.Д.С. индукции

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

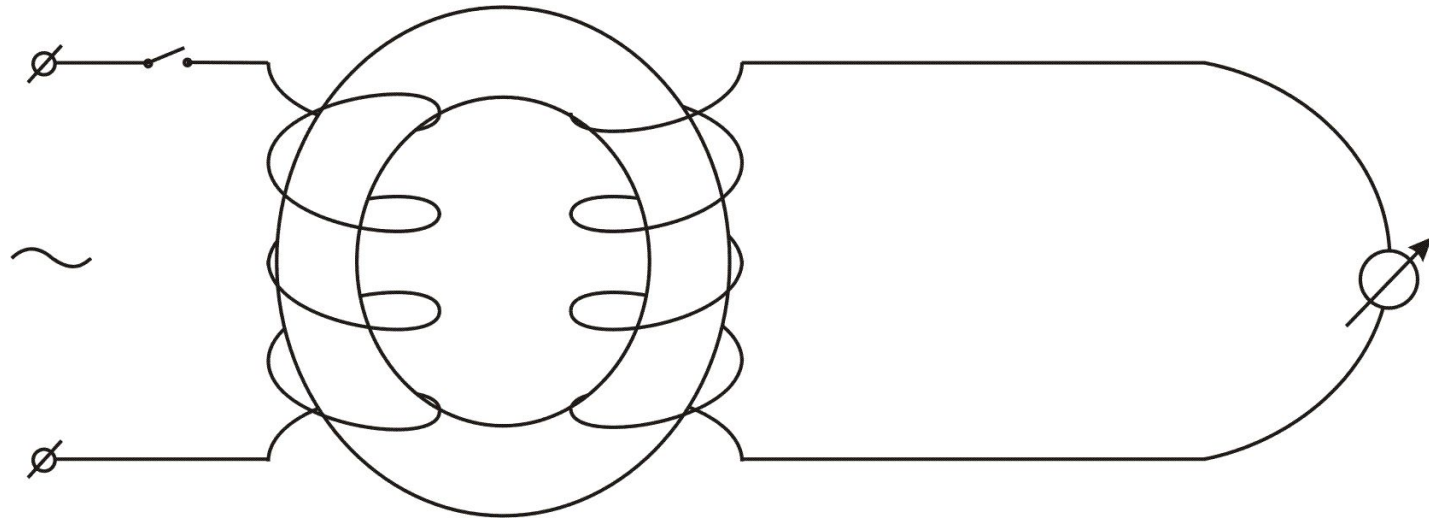


- 1) Если перемещать проводник в однородном магнитном поле \vec{B} , то под действием силы Лоренца, электроны будут отклоняться вниз, а положительные заряды вверх – возникает разность потенциалов \mathcal{E}_i .
- 2) Это и будет \mathcal{E}_i - **сторонняя сила**, под действием которой течет ток.
- 3)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



- 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:

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

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

ЭДС индукции пропорциональна скорости изменения магнитного поля:

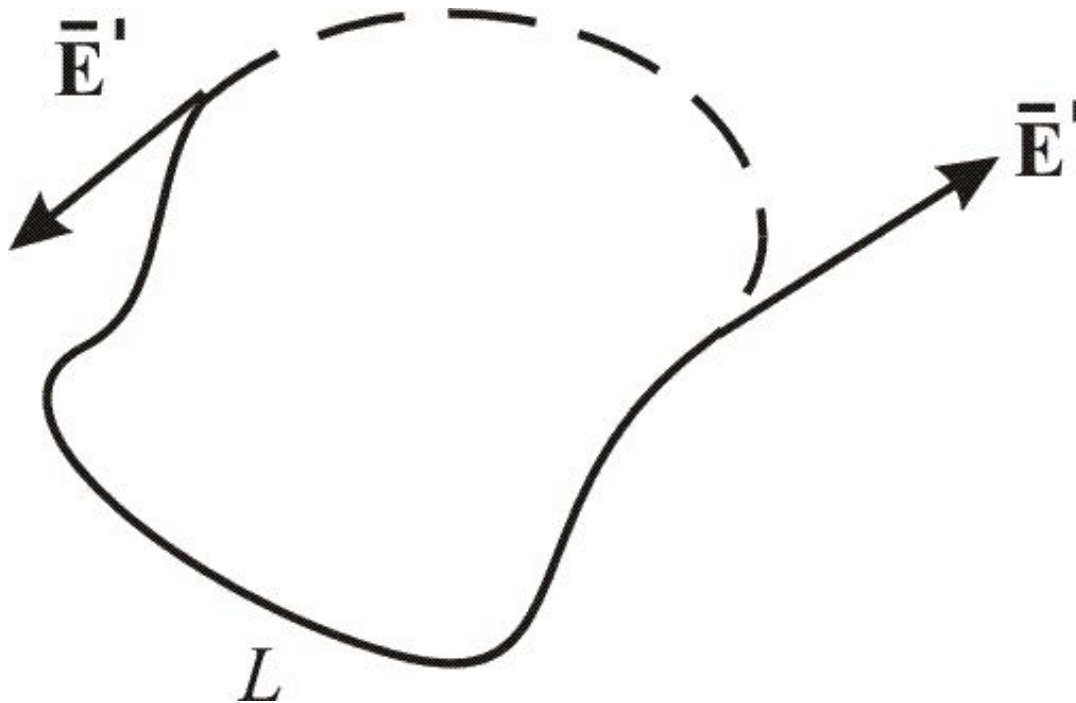
Так как $\mathbf{E}_i = -\frac{d\Phi}{dt}$ и если $S - \text{const}$,
то

$$\mathbf{E}_i = -S \frac{dB}{dt}$$

где $\frac{dB}{dt}$ и есть скорость изменения магнитного поля.

Циркуляция вектора напряжённости вихревого электрического поля

Чему равна циркуляция вектора \vec{E}' в случае, изображенном на рисунке ?



Работу вихревого электрического поля по перемещению заряда можно подсчитать по формуле

$$dA = q \oint_L \vec{E}' d\vec{l}.$$

Вспомним: **работа по перемещению единичного заряда вдоль замкнутой цепи равна ЭДС, действующей в этой цепи.** Следовательно

$$\oint_L \vec{E}' d\vec{l} = \mathcal{E}_i,$$

так как никаких других сторонних сил в цепи, где течет индукционный ток, нет, то

$$\oint_L \vec{E}' d\vec{l} = - \frac{d\Phi}{dt}.$$

Эти выражения справедливы всегда, независимо от того, выполнен контур в виде линейного проводника, диэлектрика или речь идет о контуре (мысленном) в вакууме.

Если контур выполнен из диэлектрика, то каждый элемент его поляризуется в соответствии с действующим электрическим полем \mathbf{E} .

Если заряд движется в вакууме по контуру, то при каждом обходе контура механическая энергия его возрастает на величину

$$\frac{mv^2}{2} = \oint_L q \mathbf{E}' \cdot d\mathbf{l} = q E_i;$$

(при движении заряда в проводнике из-за сопротивления устанавливается динамическое равновесие).

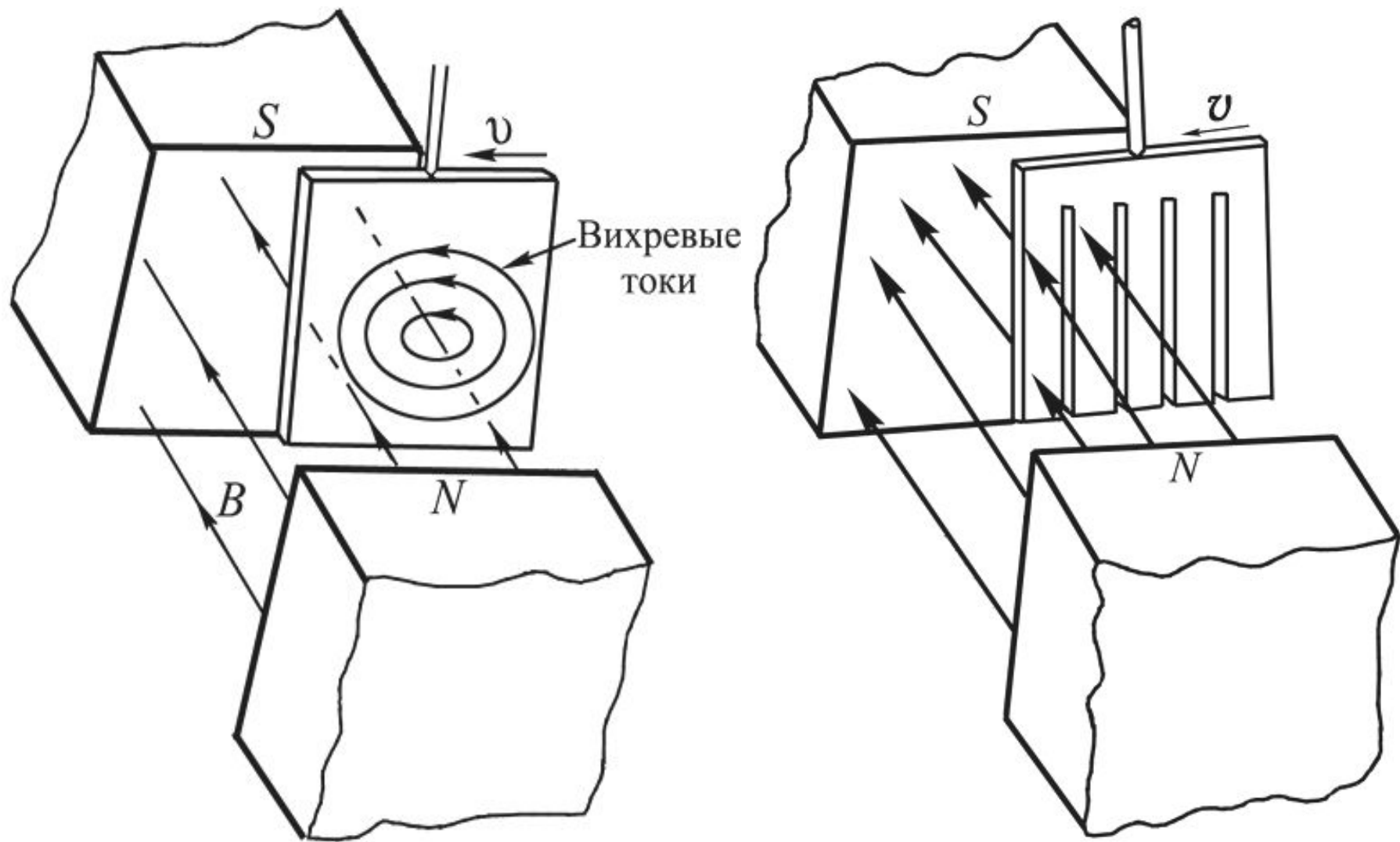
На использовании этого факта основан оригинальный ускоритель электронов – **бетатрон**.

Токи Фуко

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 \vec{E} 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.

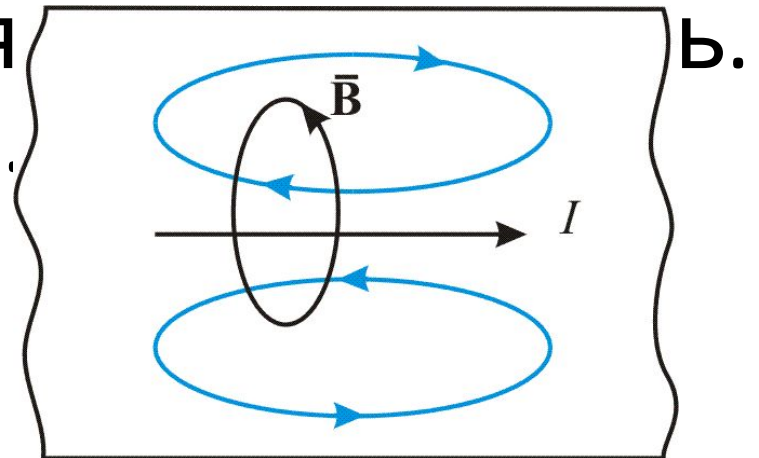
- **Токи Фуко применяются в электрометаллургии для плавки металлов.**
- **Металл помещают в переменное магнитное поле, создаваемое током частотой 500 ÷ 2000 Гц.**
- **В результате индуктивного разогрева металл плавится, а тигль, в котором он находится, при этом остается холодным.**
- **Например, при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

Скин-эффект

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

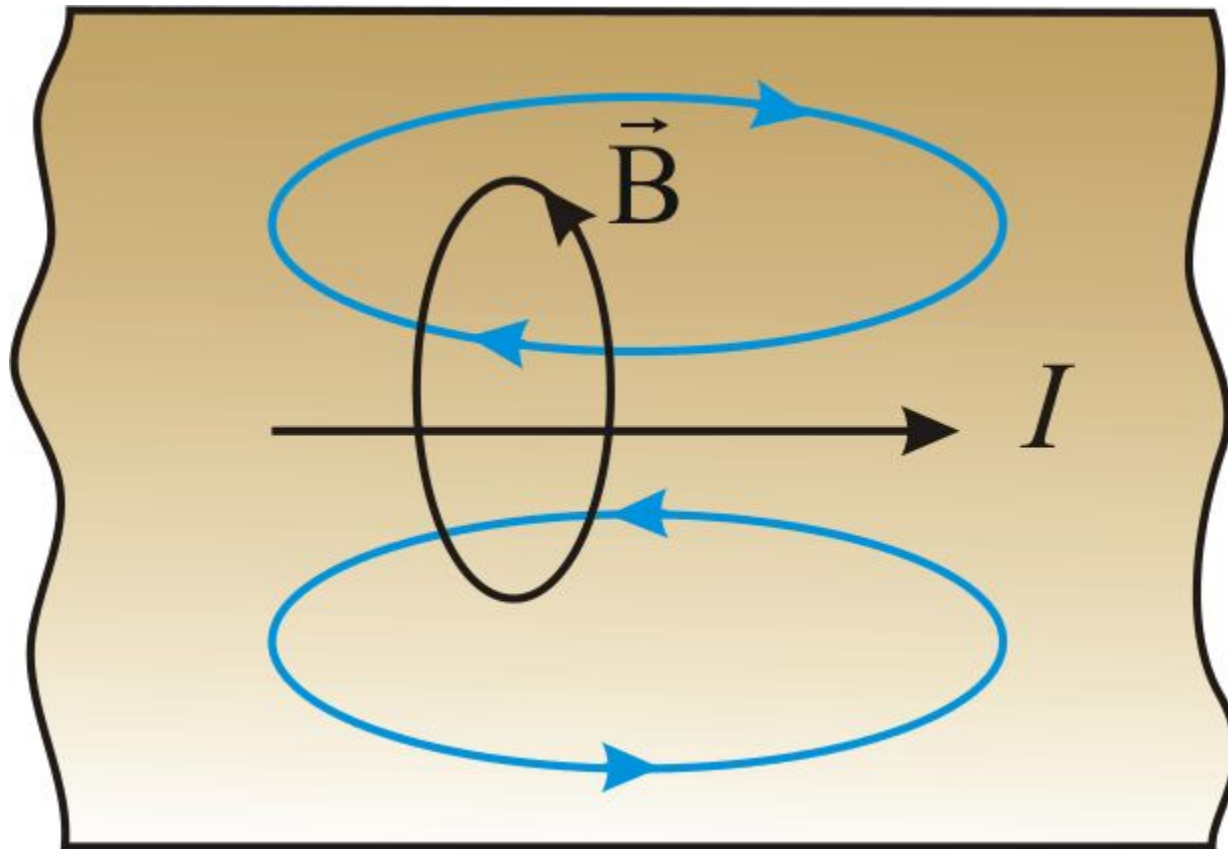
При этом **вихревые токи по оси проводника текут против направления основного тока, а на поверхности – в том же направлении**

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



Это явление называется **скин-эффектом** (от англ. *skin* – кожа, оболочка).

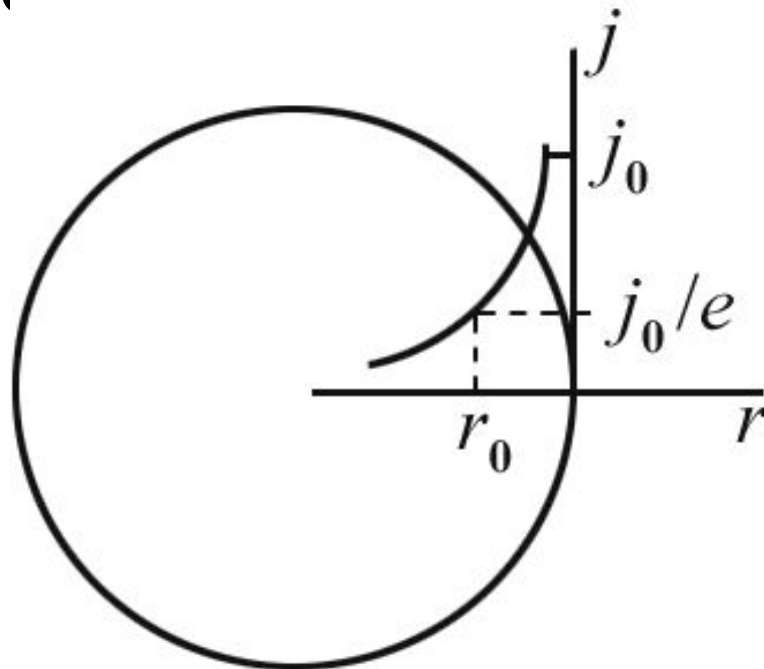
Впервые это явление описано в 1885–1886 гг. английским физиком О. Хевисайдом, а обнаружено на опыте его соотечественником Д. Юзом в 1886 г.



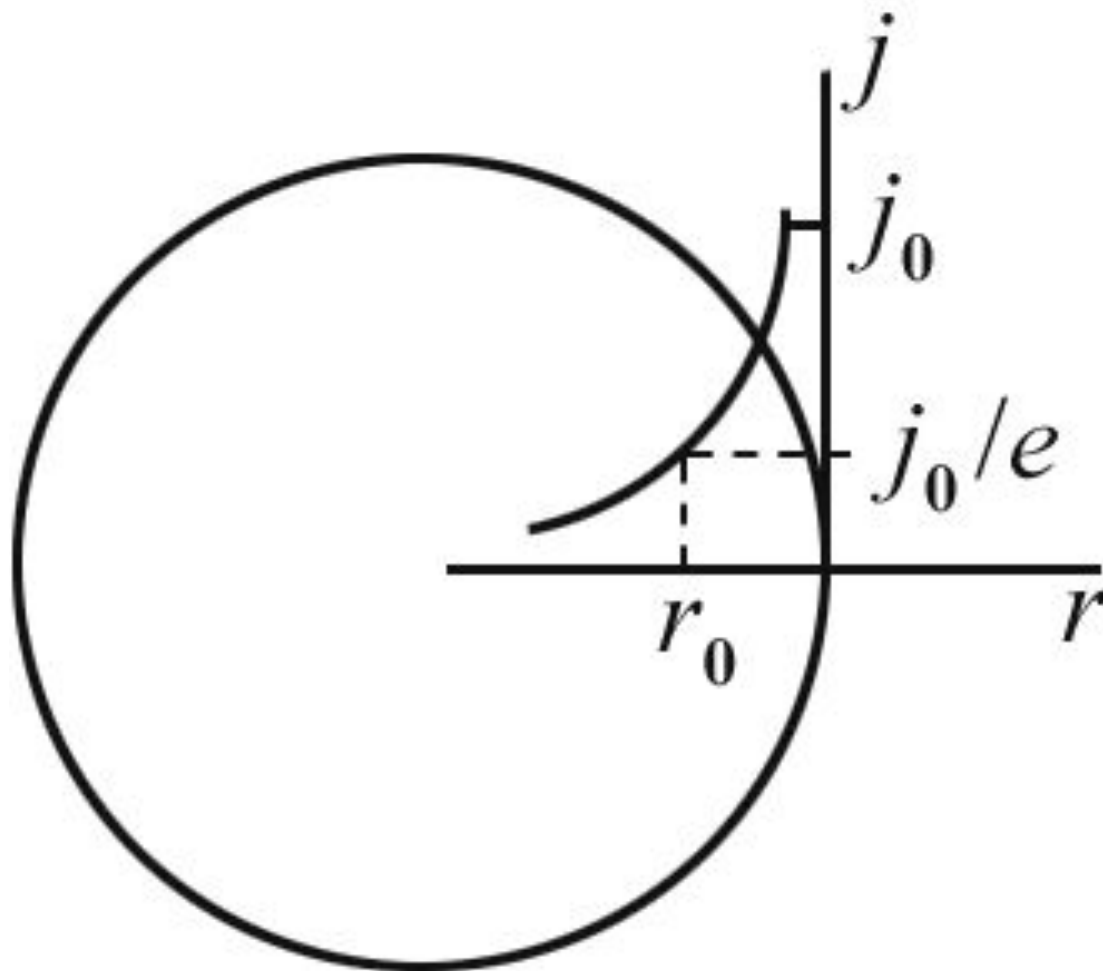
Проводники в ВЧ- схемах нет смысла делать сплошными:

в ВЧ-генераторах проводники выполнены в виде - волноводов - полых трубок.

Поверхностный слой проводника, по которому течет поверхностный ток называется – **скинслоем**.



Плотность тока убывает от поверхности к оси провода примерно по экспоненциальному закону



При частоте $\nu = 50 \text{ Гц}$ $r_0 = 10 \text{ мм}$

– ток практически равномерно распределен по объему проводов, исключая очень толстые кабели. Но при высокочастотных колебаниях

$\nu \approx 100 \text{ МГц} = 10^8 \text{ Гц}$ глубина проникновения

$$r_0 \approx 7 \cdot 10^{-3} \text{ мм}$$

и ток почти целиком течет по поверхности провода.

По этой причине с целью уменьшения потерь поверхность высокочастотных контуров серебрят.

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.