

# Электромагнетизм

Кузнецов Сергей Иванович доцент кафедры ОФ ЕНМФ ТПУ

# Классическая электродинамика Дж. К. Максвелла

# Тема 11. ЯВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ

- 11.1. опыты Фарадея. Индукционный ток. Правило Ленца.
- 11.2. Величина Э.Д.С. индукции.
- 11.3. Природа Э.Д.С. индукции.
- 11.4. Циркуляция вектора напряжённости вихревого электрического поля.
- 11.5. Бетатрон.
- 11.6. Токи Фуко.
- 11.7. Скин-эффект.



# 11.1. 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 представить свои результаты.



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

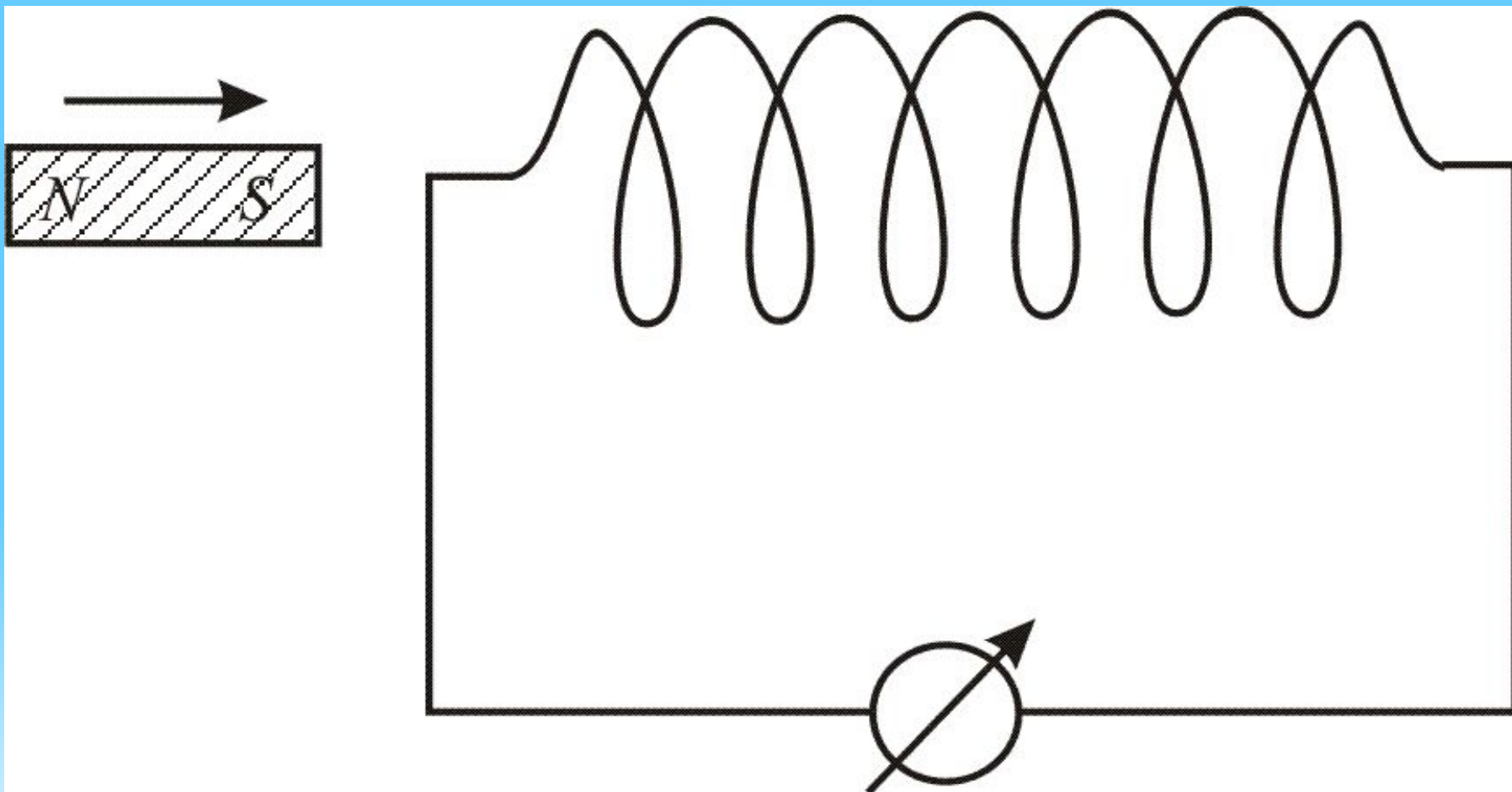
*Исследования  
электричества, магнетизма,  
оптикоакустики, электрохимии.*

теоретическую модель электродвигателя.  
направление. Открыл законы электролиза,  
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 возникнет 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 (Рис.11.2), но лучше всего этот эффект проявляется, если две катушки соединить сердечником (Рис.11.3).

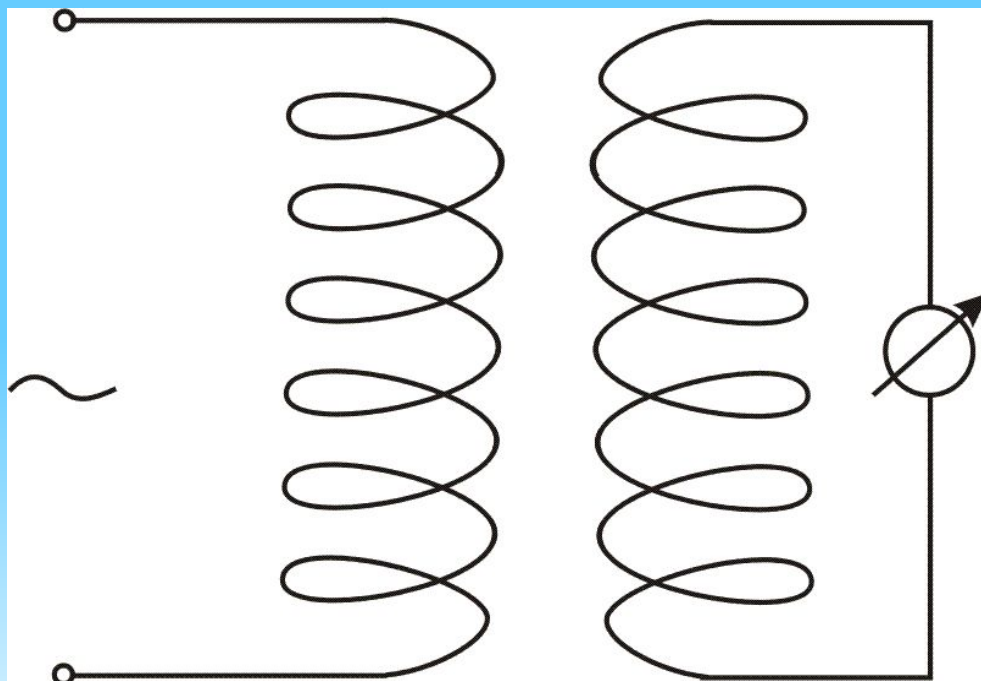
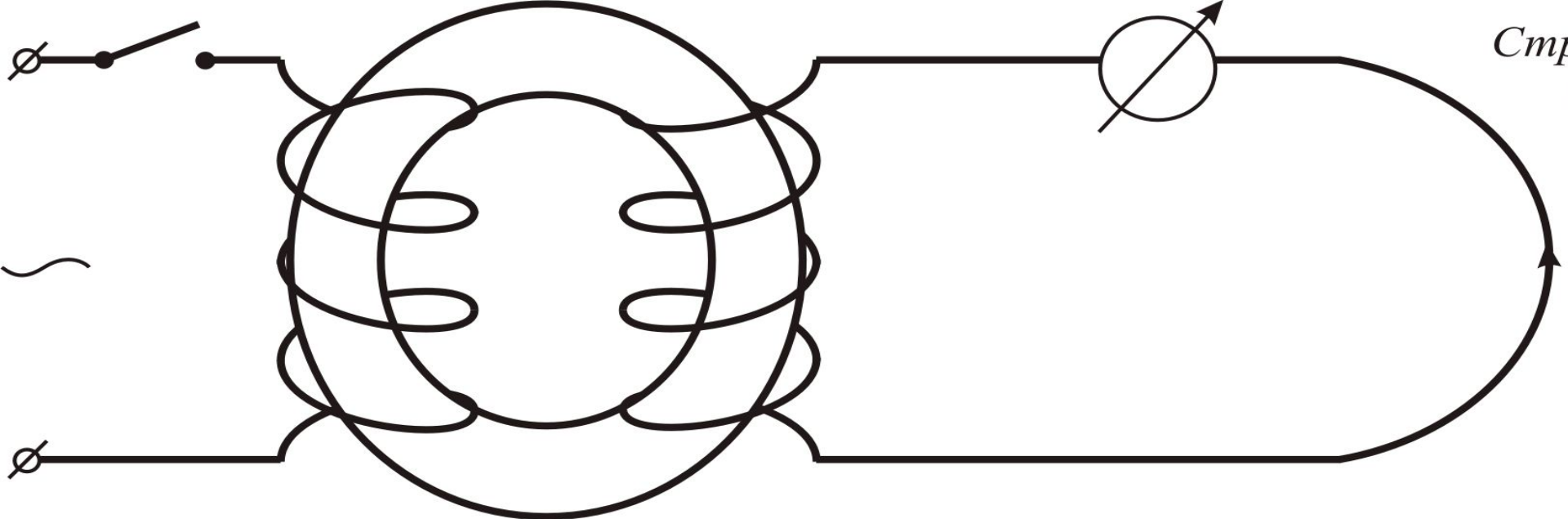


Рис. 11.2



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

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

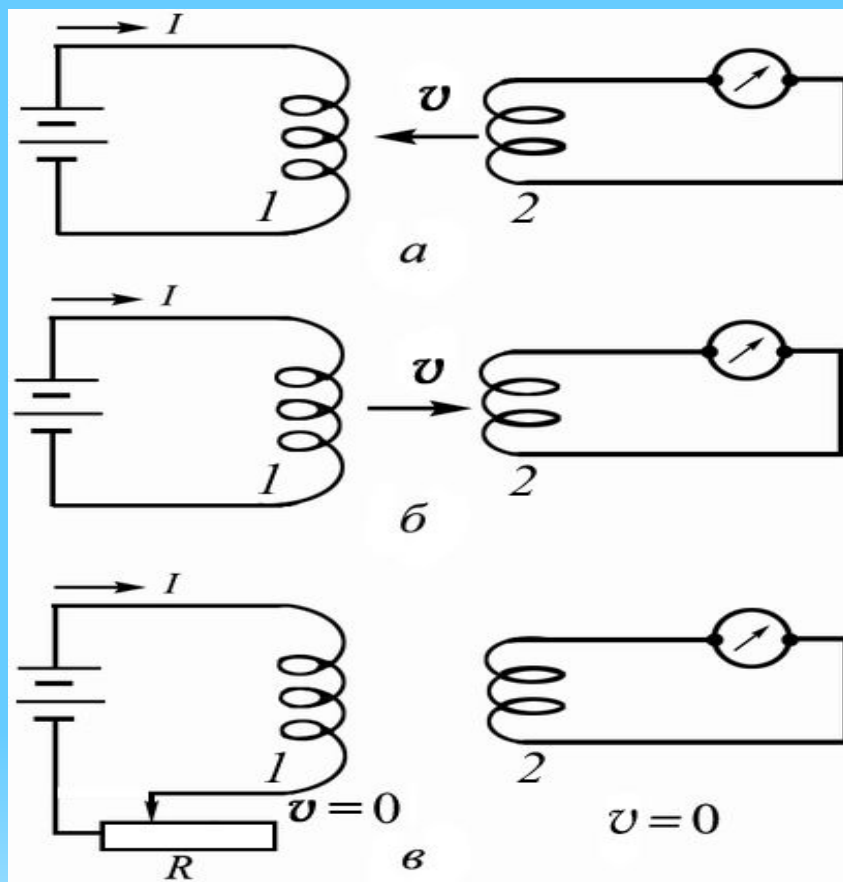


По определению Фарадея общим для этих опытов является то, что: *если поток вектора индукции, пронизывающий замкнутый, проводящий контур меняется, то в контуре возникает электрический ток.*

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



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



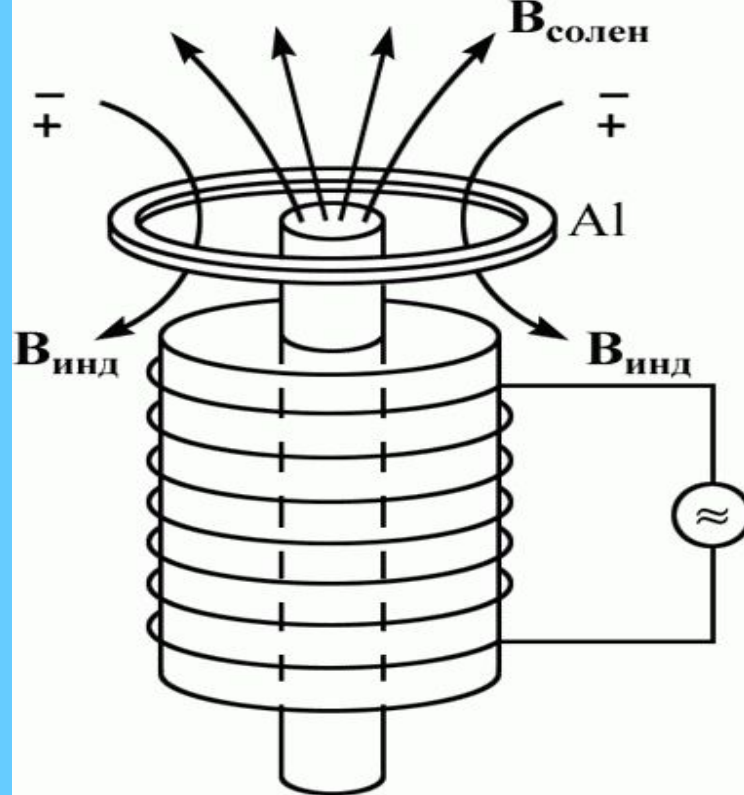
Итак, получается, что **движущиеся заряды (ток) создают магнитное поле, а движущееся магнитное поле создает (вихревое) электрическое поле или индукционный ток**

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 правило 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**

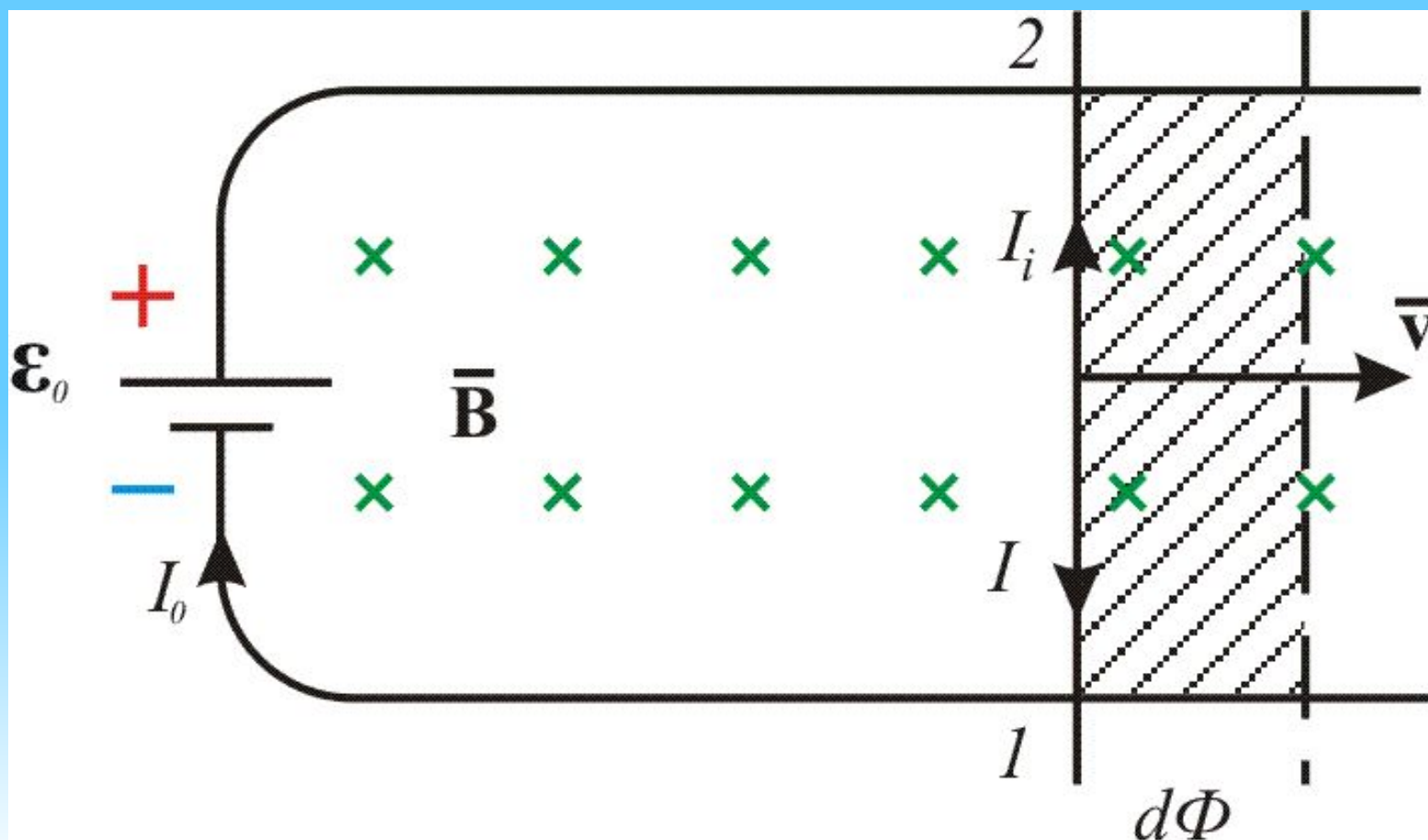
## 11.2. Величина Э.Д.С. индукции

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.

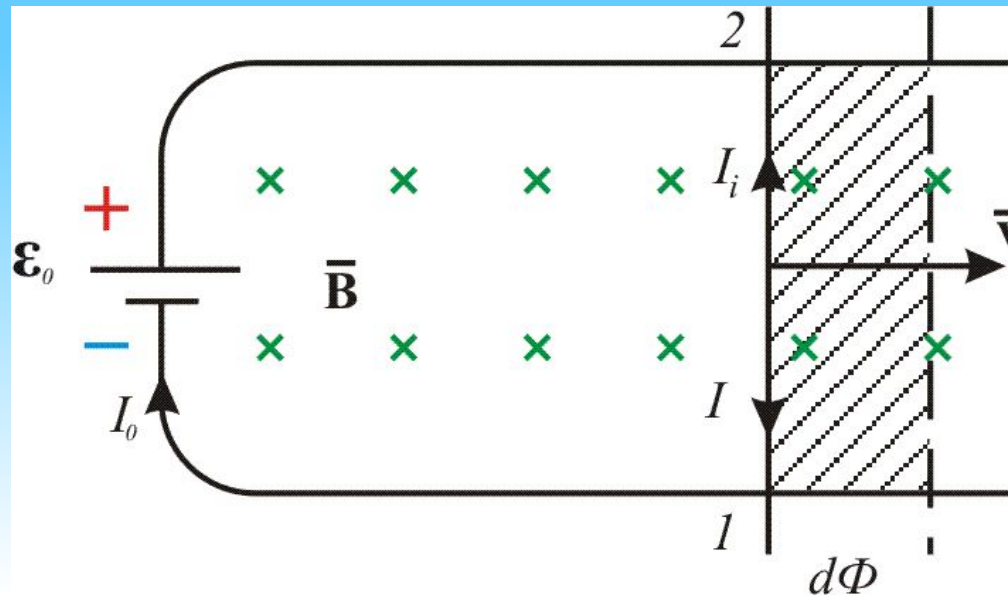
Батарея с ЭДС равной  $\mathcal{E}_0$  создает ток  $I_0$ . За время  $dt$ , батарея совершает работу

$$dA = \mathcal{E}_0 I_0 dt \quad (11.2.1)$$

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

$$Q = dA = \mathcal{E}_0 I_0 \cdot dt = I_0^2 \cdot R dt, \quad (11.2.2)$$

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



$\vec{B}$ 

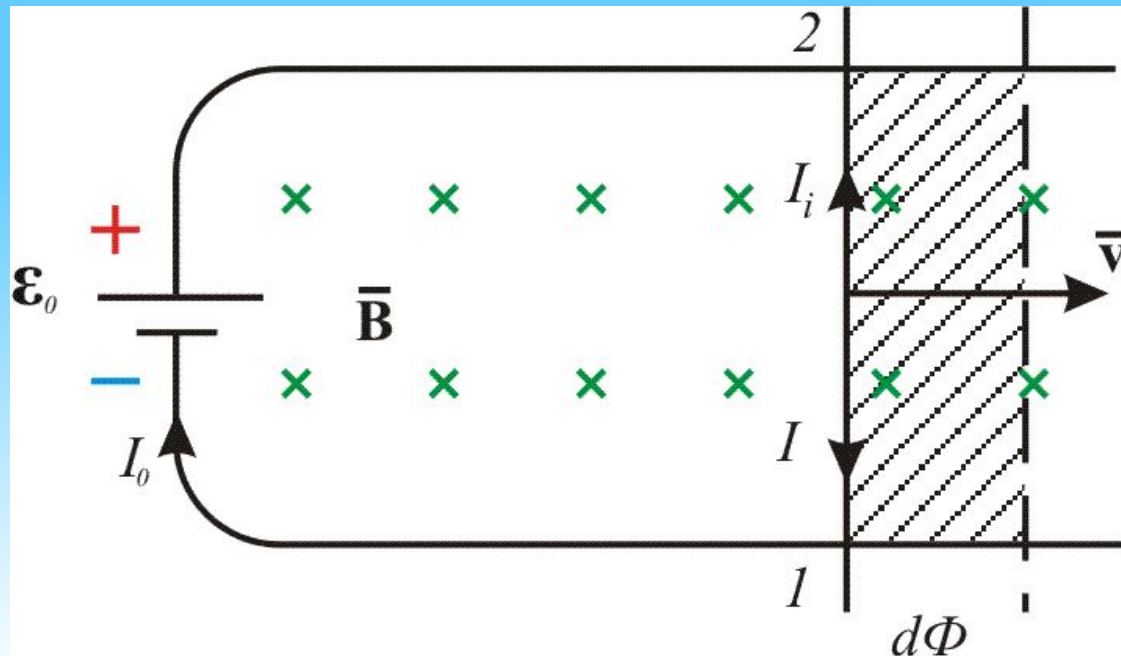
Теперь включим магнитное поле

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  $v = dx/dt$ .



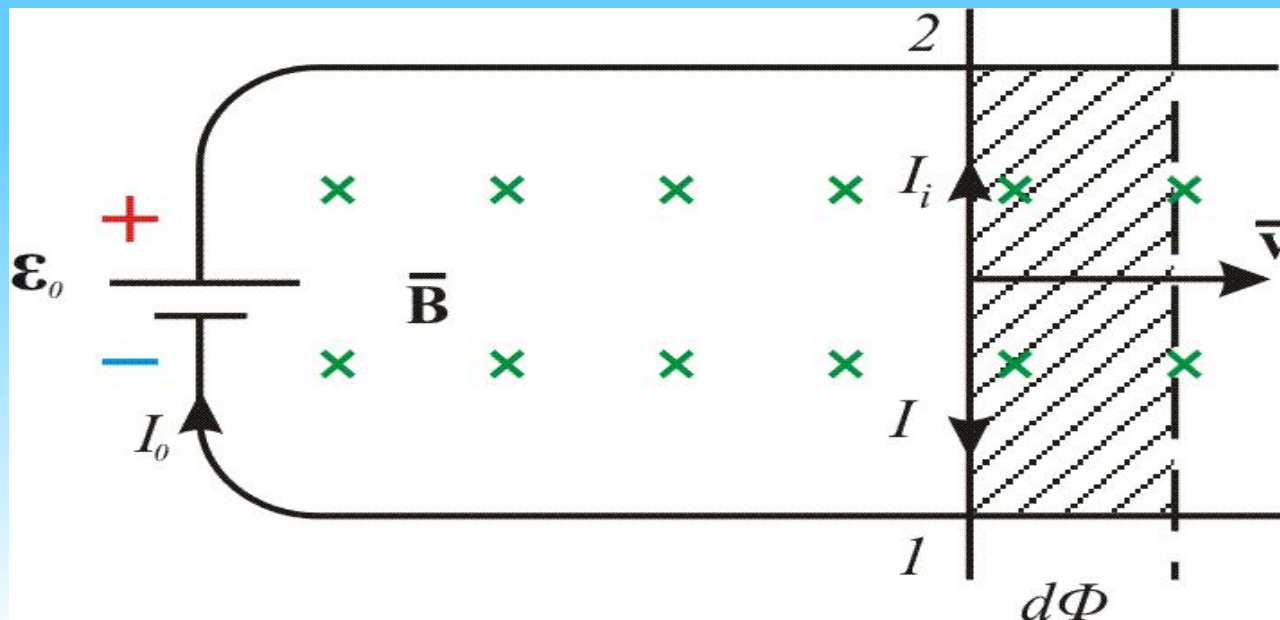


При движении проводника *изменится и поток магнитной индукции.*

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

Изменится и сила  $\vec{F}_0$ , которая теперь станет равна  $\vec{F}$  (сила  $\vec{F}$  – не добавочная, а результирующая).

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

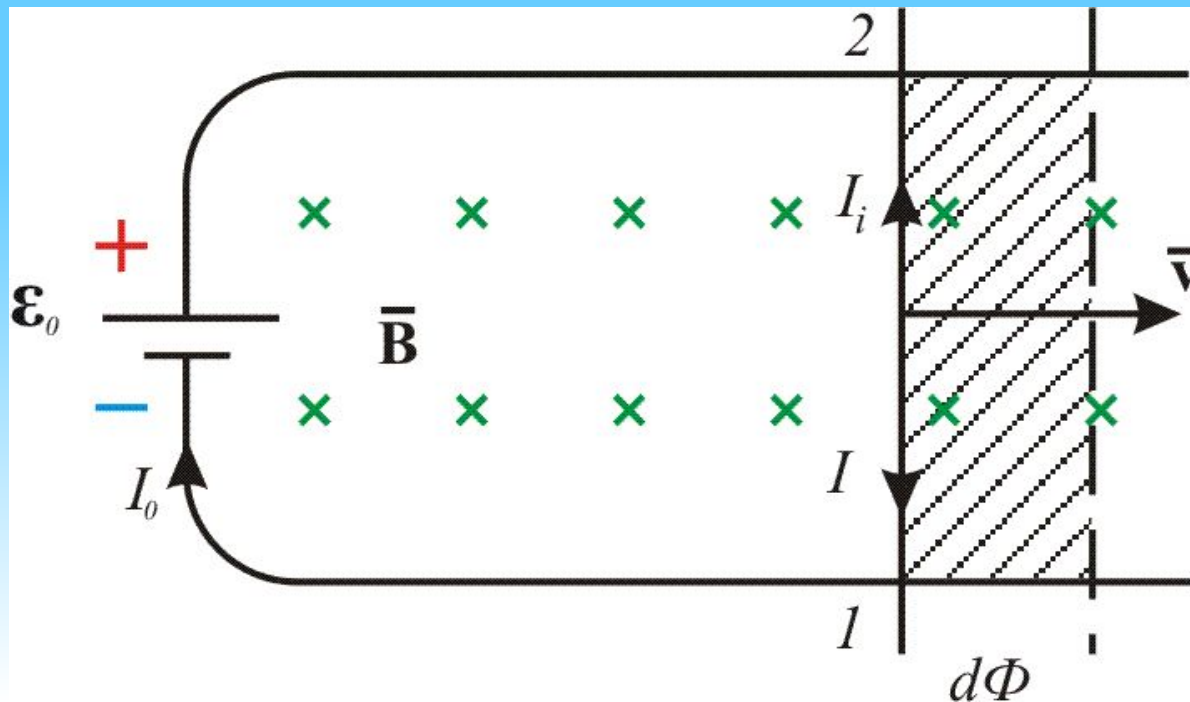


Как и в случае, когда все элементы рамки неподвижны, источником работы является  $\mathcal{E}_0$ .

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



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

левую и правую часть выражения на

Умножим  
1  
, получим  
 $IRdt$

Отсюда

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

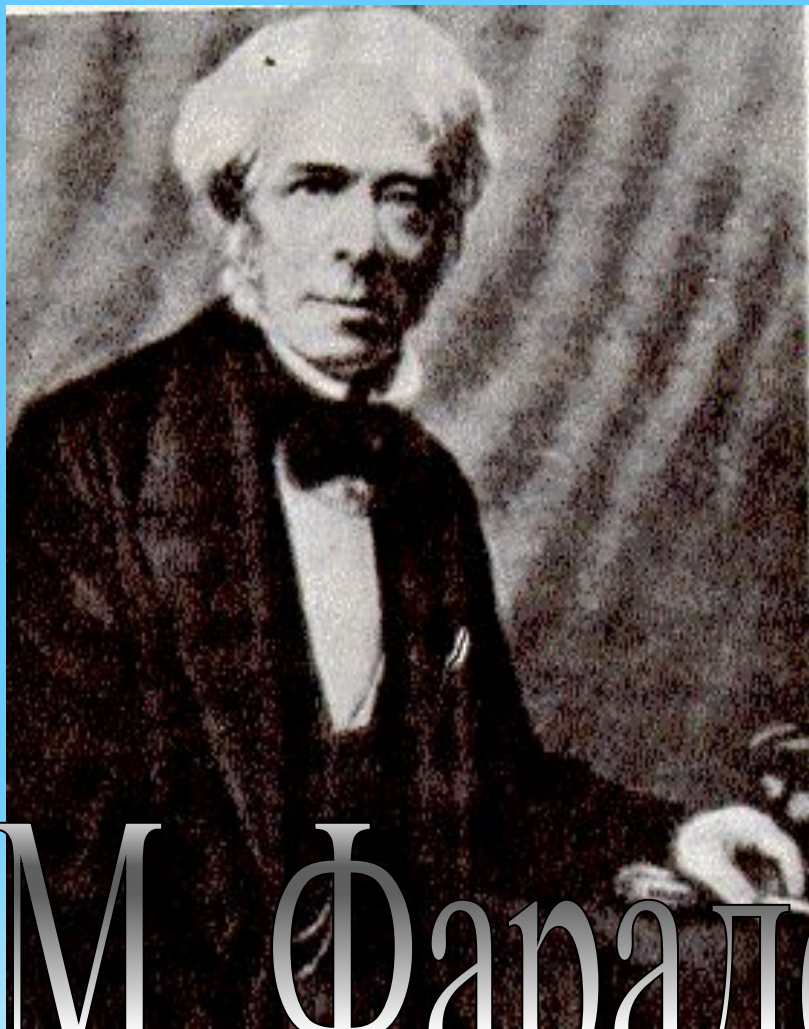
$$I = \frac{\mathcal{E}_0 - \frac{d\Phi}{dt}}{R} \quad (11.2.3)$$

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

$\mathcal{E}_i$

$\mathcal{E}_0$

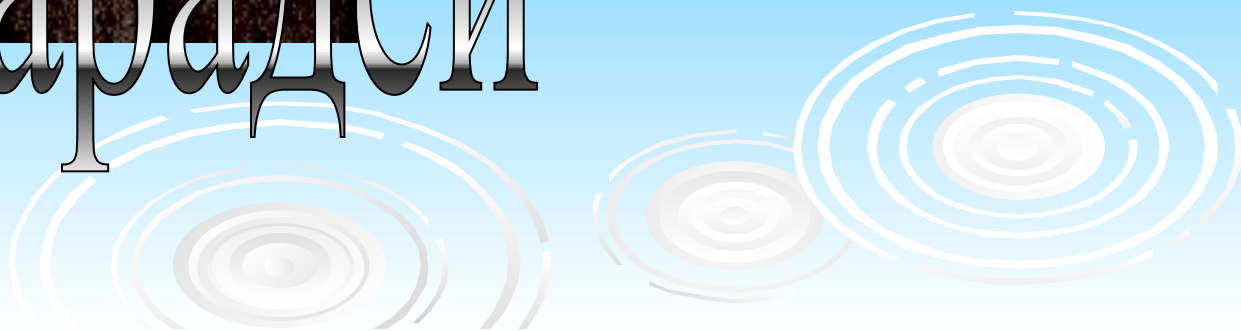
$$\mathcal{E}_i = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (11.2.4)$$



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

М. Фарадей

закон электромагнитной индукции



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

*Закон Фарадея.*

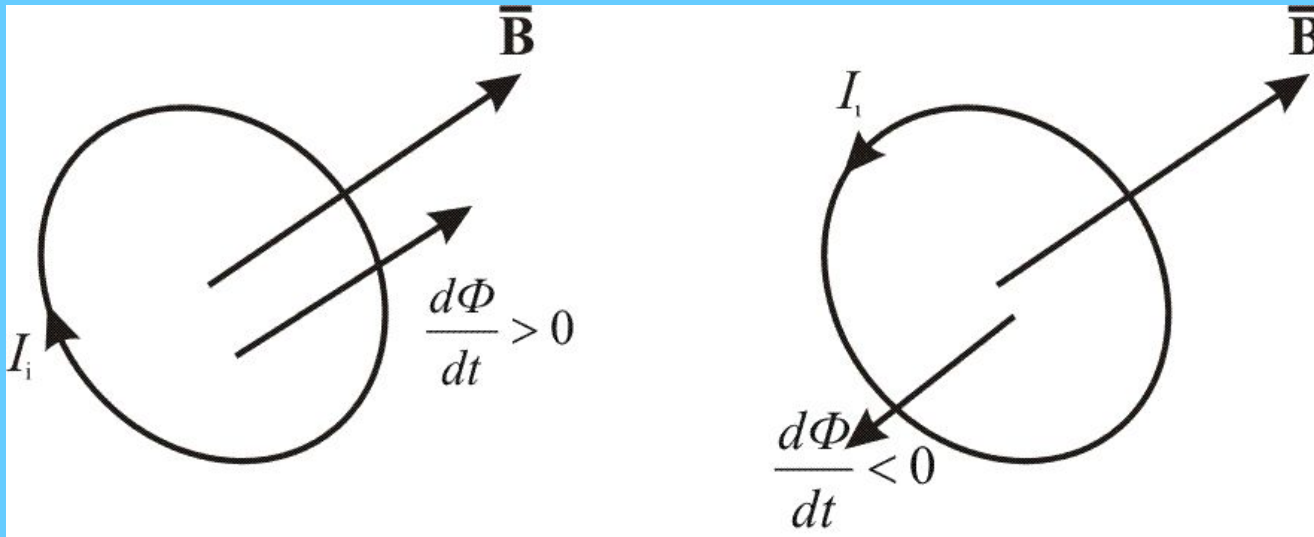
$$\mathcal{E}_i = - \frac{d\Phi}{dt}$$

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* :

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



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

Отсюда размерность ЭДС индукции:  $[E_i] = V$ .

$$[E_i] = \frac{[\Phi]}{[t]} = \frac{V \cdot c}{c} = V.$$

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

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

где  $N$  – число витков.

Итак, если

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

$$\Psi = \sum \Phi$$

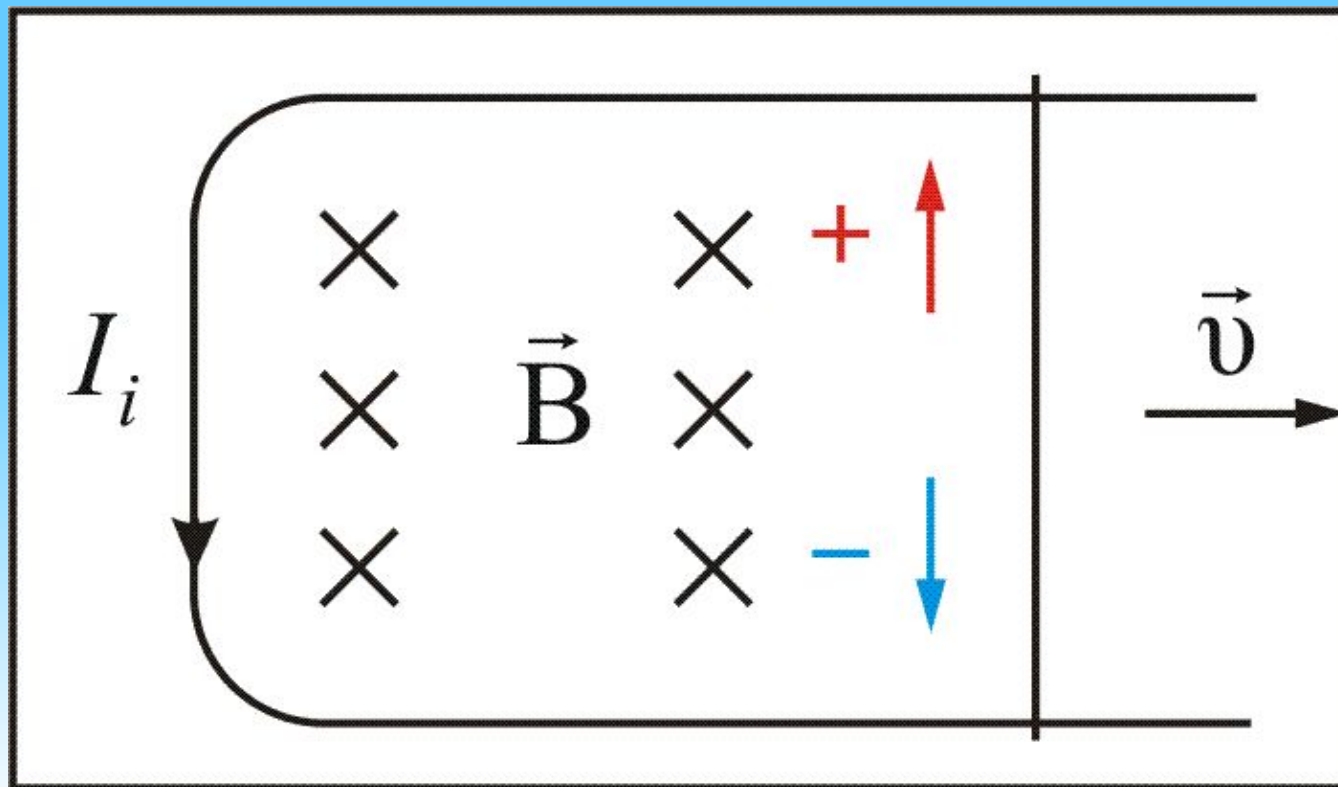
Тогда

$$\mathcal{E}_i = - \frac{d\Psi}{dt} \quad (11.2.5)$$

## 11.3. Природа Э.Д.С. индукции

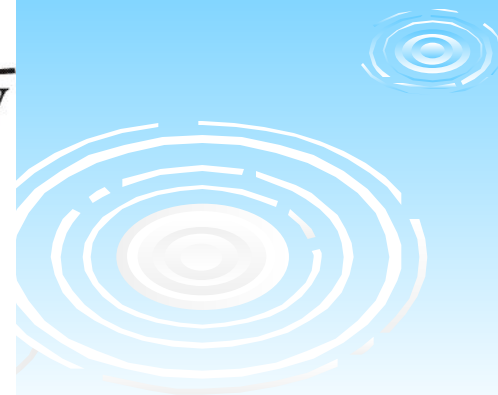
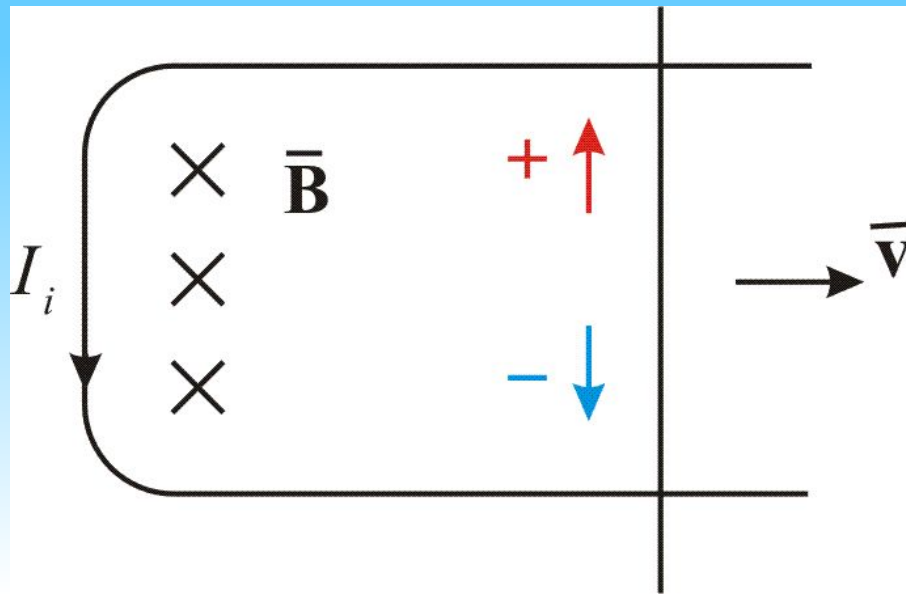
Ответим на вопрос, что является причиной движения зарядов, причиной возникновения индукционного тока?

Рассмотрим рисунок 11.6.



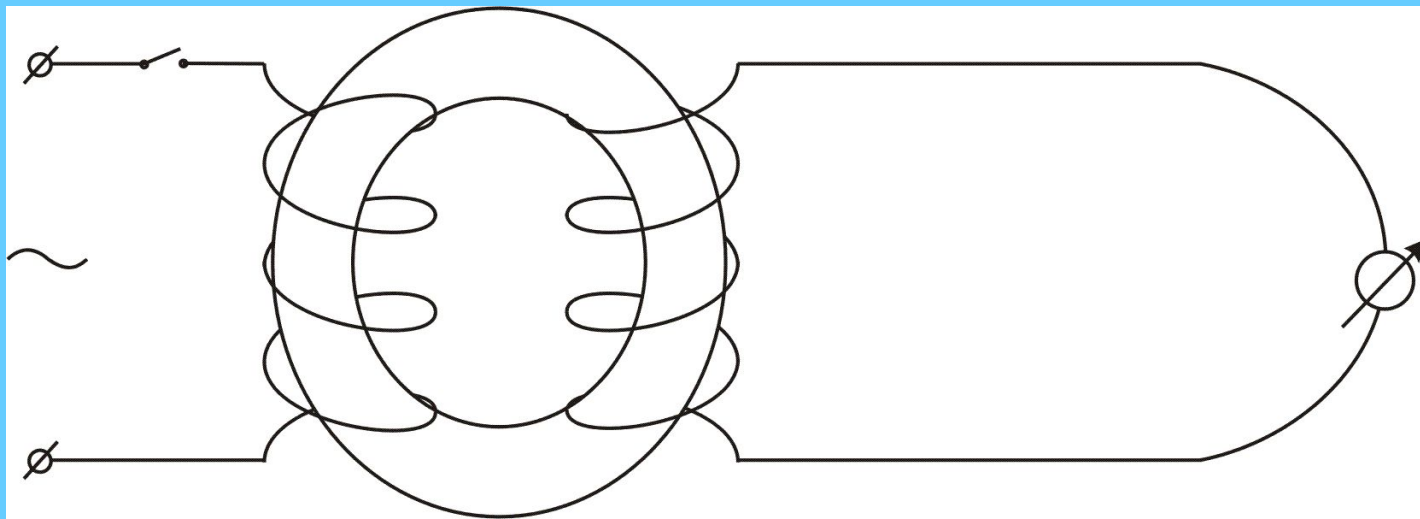


- 1) Если перемещать проводник в однородном магнитном поле  $\vec{B}$ , то под действием силы Лоренца, электроны будут отклоняться вниз, а положительные заряды вверх – возникает разность потенциалов.
- 2) Это и будет  $E_i$ - *сторонняя сила*, под действием которой течет ток.
- 3) Как мы знаем, для положительных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



- 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 линии его замкнуты.***

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.

ЭДС индукции пропорциональна скорости изменения магнитного поля:

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

$$\epsilon_i = -S \frac{dB}{dt}$$

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

## 11.4. Циркуляция вектора напряжённости вихревого электрического поля

Чему равна циркуляция вектора  $\vec{E}'$  в случае, изображенном на рисунке 11.8?



Рис. 11.8

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

$$\oint_L \vec{E}' d\vec{l} = \mathcal{E}_i, \quad (11.4.1)$$

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

$$\oint_L \vec{E}' d\vec{l} \stackrel{(11.4.2)}{=} - \frac{d\Phi}{dt}.$$

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*

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

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

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

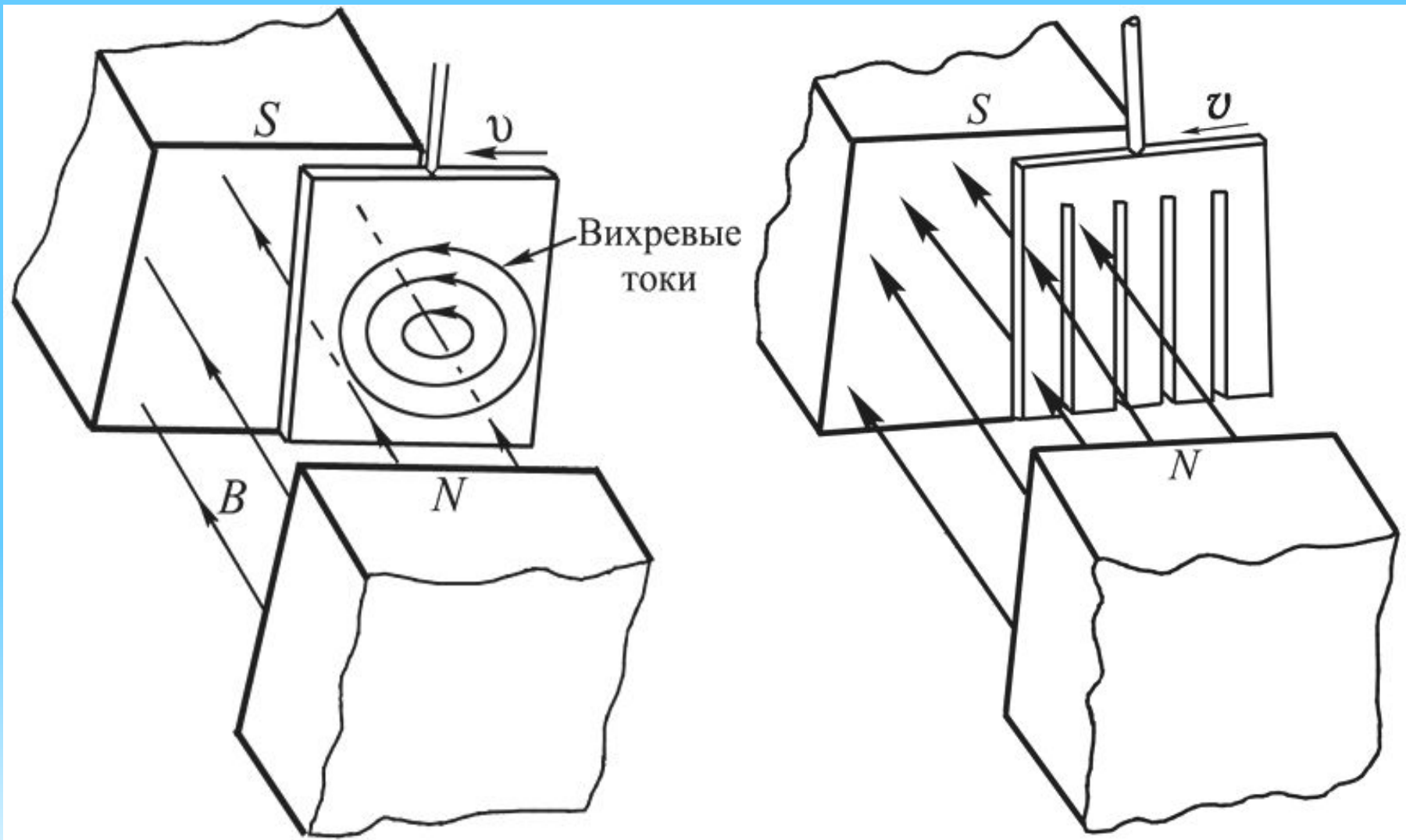


## 11.6. Токи Фуко

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  $\mathbf{B}$ .*

Они будут циркулировать в веществе проводника (напомним, что линии  $\mathbf{E}'$  – 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 ÷ 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.**

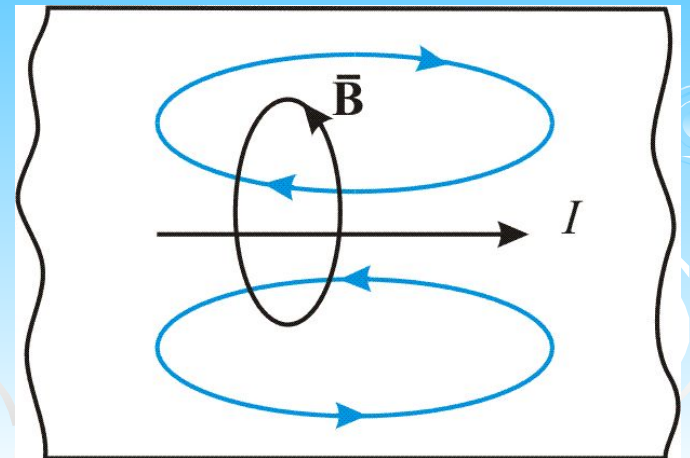
## 11.7. Скин-эффект

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*

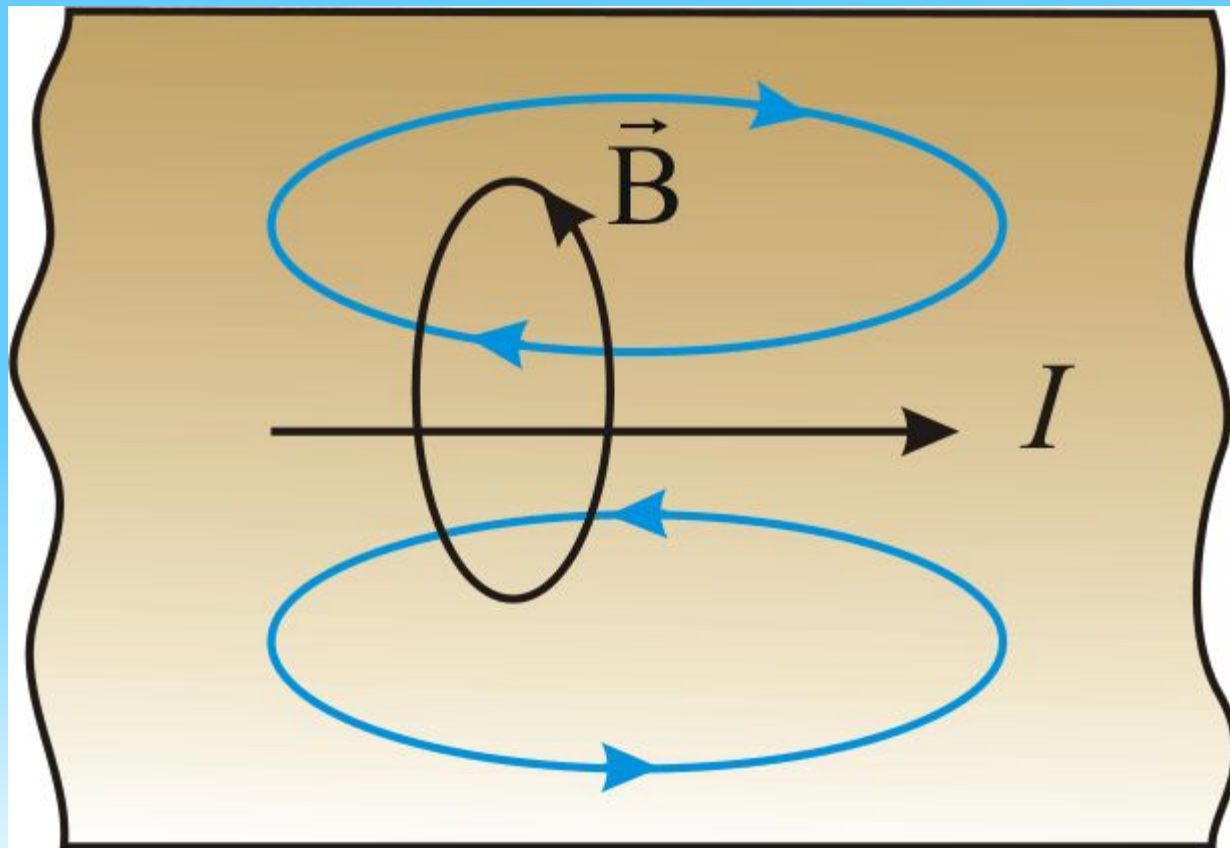
Ток как бы вытесняется на поверхность. Это и есть *скин-эффект*.

Рис. 11.10



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

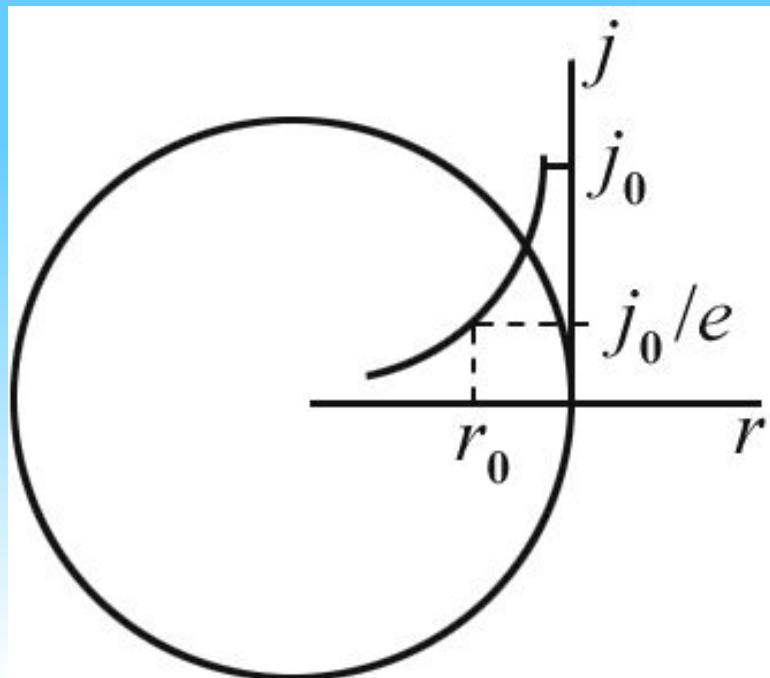
Впервые это явление описано в 1885–1886 гг. английским физиком О. Хевисайдом, а обнаружено на опыте его соотечественником Д. Юзом в 1886 г.



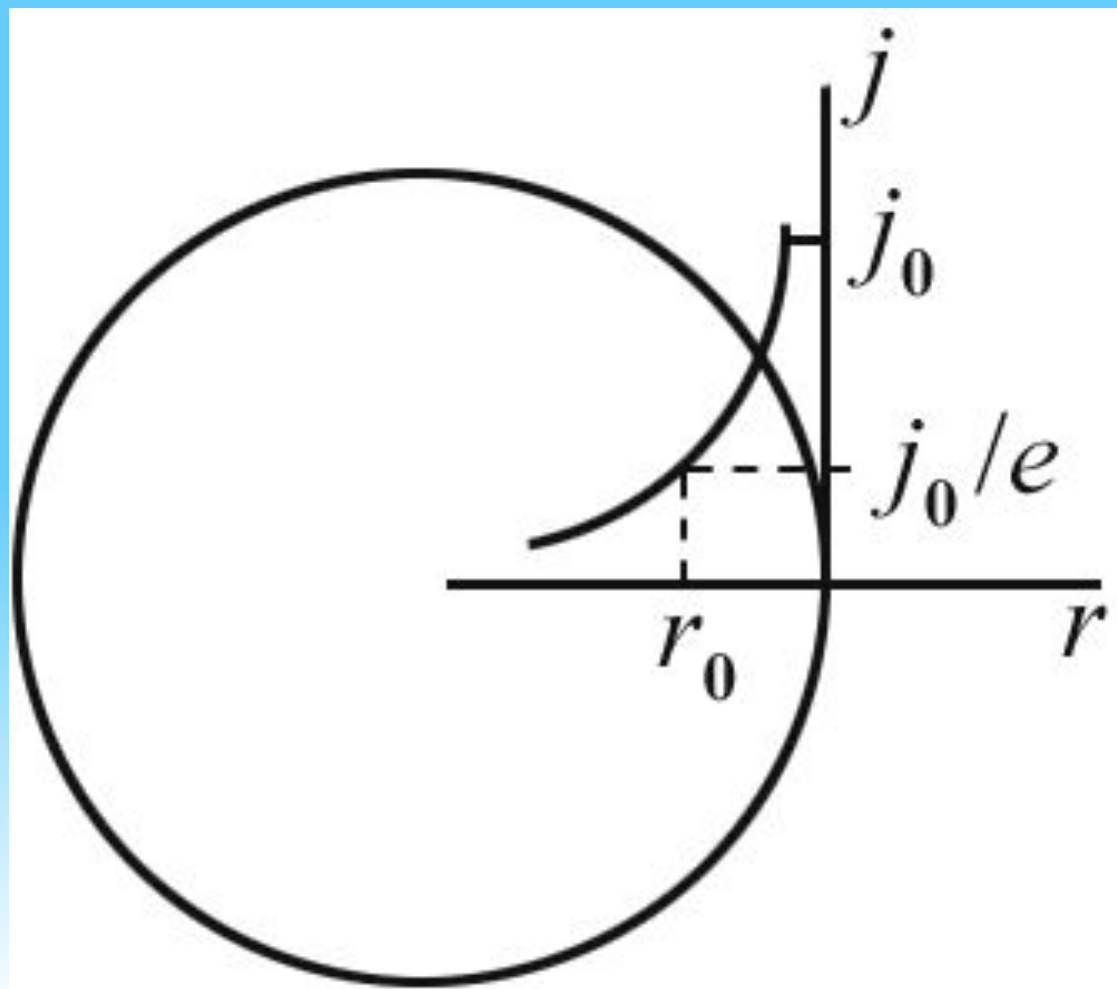
Проводники в ВЧ- схемах нет смысла делать СПЛОШНЫМИ:

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

Поверхностный слой проводника, по которому текут вихревые токи, 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.

Лекция окончена!

