

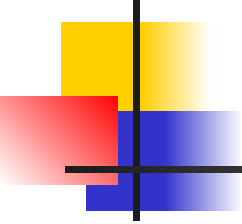


# ЯВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ

---

- 1. опыты Фарадея. Индукционный ток. Правило Ленца
- 2. Величина ЭДС индукции
- 3. Природа ЭДС индукции
- 4. Циркуляция вектора напряжённости вихревого электрического поля
- 5. Бетатрон
- 6. Токи Фуко
- 7. Скин-эффект

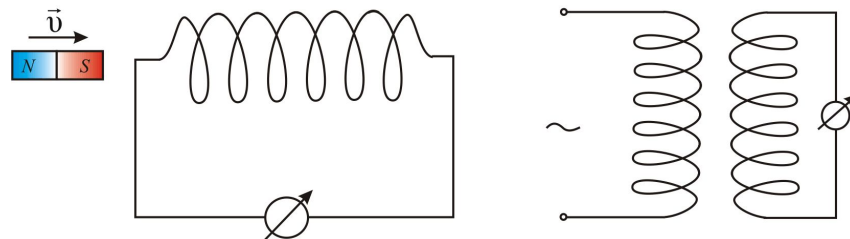
# Опыты Фарадея. Индукционный ток. Правило Ленца

- 
- 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 1831 г. (Американец Джозеф Генри тоже открыл, но не успел опубликовать свои результаты).
  - Ампер также претендовал на открытие, но не смог представить свои результаты).

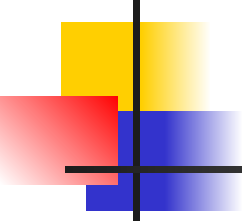
# Опыты Фарадея. Индукционный ток. Правило Ленца

Из школьного курса физики опыты Фарадея хорошо известны например, катушка и постоянный магнит (рисунок ).

- Если подносить магнит к катушке или наоборот, то в катушке возникнет электрический ток.
- Тоже самое происходит с двумя близко расположенными катушками: если к одной из катушек подключить источник переменного тока, то в другой так же возникнет переменный ток

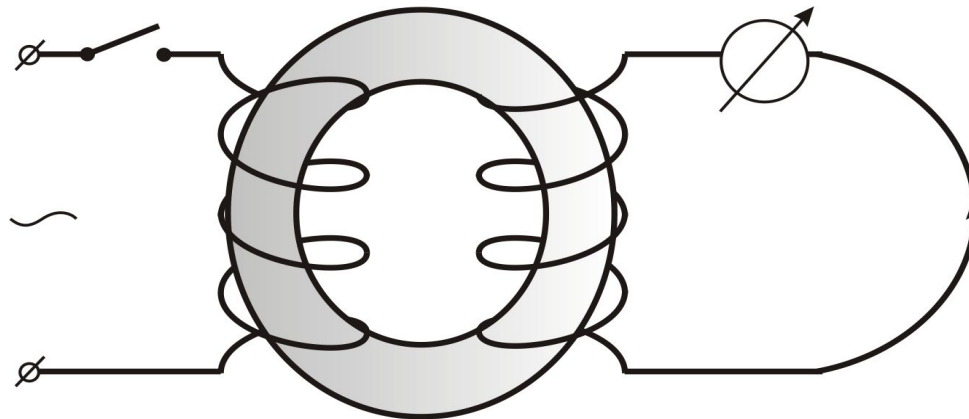


# Опыты Фарадея. Индукционный ток. Правило Ленца

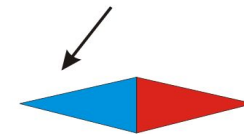
- 
- По определению Фарадея общим для этих опытов является то, что: *если поток вектора индукции, пронизывающий замкнутый, проводящий контур меняется, то в контуре возникает электрический ток.*
  - Это явление называют *явлением электромагнитной индукции, а ток – индукционным.*
  - При этом, явление совершенно не зависит от способа изменения потока вектора магнитной индукции.

# Опыты Фарадея. Индукционный ток. Правило Ленца

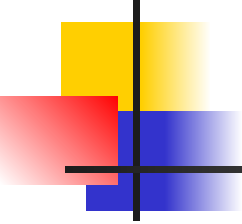
- **Лучше всего этот эффект проявляется, если две катушки соединить сердечником (рисунок)**



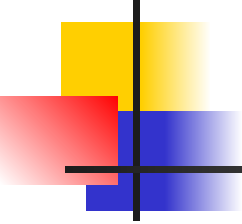
Стрелка компаса дергается при замыкании цепи



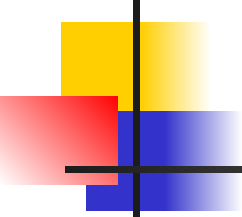
# Опыты Фарадея. Индукционный ток. Правило Ленца

- 
- **Итак, получается, что движущиеся заряды (ток) создают магнитное поле, а движущееся магнитное поле создает (вихревое) электрическое поле и, собственно индукционный ток.**
  - **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.**

# Опыты Фарадея. Индукционный ток. Правило Ленца

- 
- 
- **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 , а не потока вектора напряженности .**

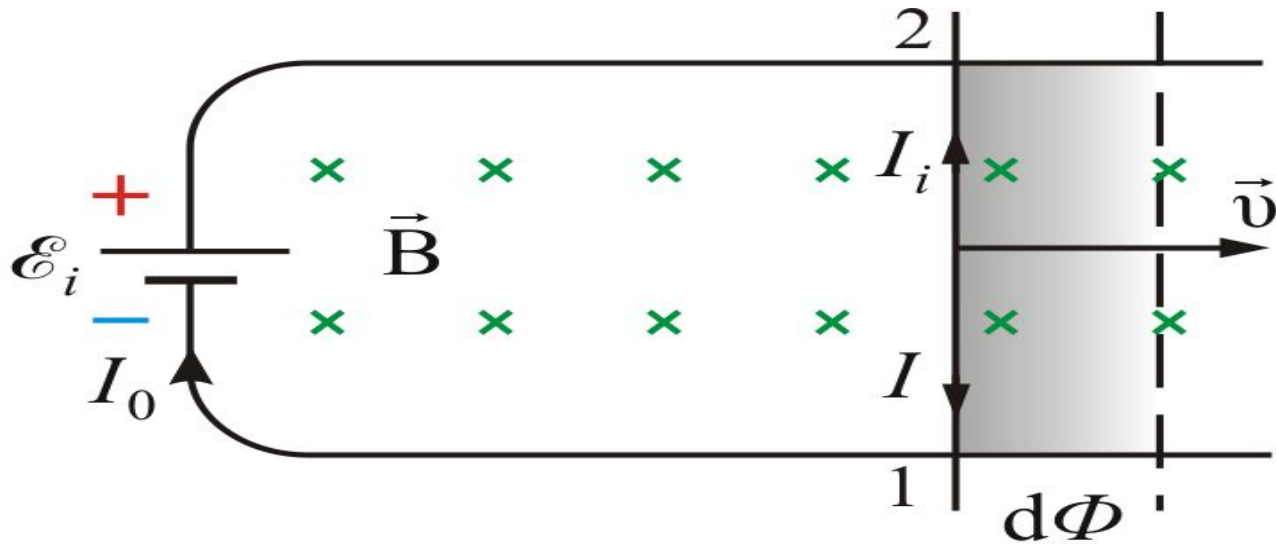
# Величина ЭДС индукции

- 
- 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 .
  - **Наша задача,** используя законы сохранения энергии, найти величину и выяснить ее природу.



# Величина ЭДС индукции

- Рассмотрим перемещение подвижного участка 1 – 2 контура с током в магнитном поле





# Величина ЭДС индукции

---

- Пусть сначала магнитное поле отсутствует.
  - Батарея с ЭДС равной  $\varepsilon_0$  создает ток  $I_0$ .
  - За время  $dt$ , батарея совершает работу
- $dA = \varepsilon_0 I_0 dt$
- – эта работа будет переходить в тепло которое можно найти по закону Джоуля-Ленца:

$$Q = dA = \varepsilon_0 I_0 dt = I_0^2 R dt,$$



# Величина ЭДС индукции

---

- Поместим контур в однородное магнитное поле с индукцией  $\vec{B}$ .
- Линии  $\vec{B}$  параллельны  $\vec{n}$  и связаны с направлением тока «правилом буравчика».
- Поток  $\Phi$ , сцепленный с контуром – положителен.



# Величина ЭДС индукции

---

- 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 этом изменится и поток магнитной индукции.
- Тогда в результате электромагнитной индукции, ток в контуре изменится и станет равным  $I = I_0 - I_i$  .



# Величина ЭДС индукции

---

- Изменится и сила  $\vec{F}_0$ , которая теперь станет равна  $\vec{F}$  – результирующая сила. Эта сила за время  $dt$  произведет работу  $dA$ :  
$$dA = Fdx = Id\Phi.$$
- Как и в случае, когда все элементы рамки неподвижны, источником работы является  $\varepsilon_0$ .
-



# Величина ЭДС индукции

---

- 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:

$$\varepsilon_0 Idt = I^2 R dt + Id\Phi.$$



# Величина ЭДС индукции

---

- Отсюда: 
$$I = \frac{\varepsilon_0 - \frac{d\Phi}{dt}}{R}.$$

- Полученное выражение мы вправе рассматривать как закон Ома для контура, в котором кроме источника действует эдс индукции, которая равна:

$$\varepsilon_i = - \frac{d\Phi}{dt}.$$

- *ЭДС индукции контура равна скорости изменения потока магнитной индукции, пронизывающей этот контур.*



# Величина ЭДС индукции

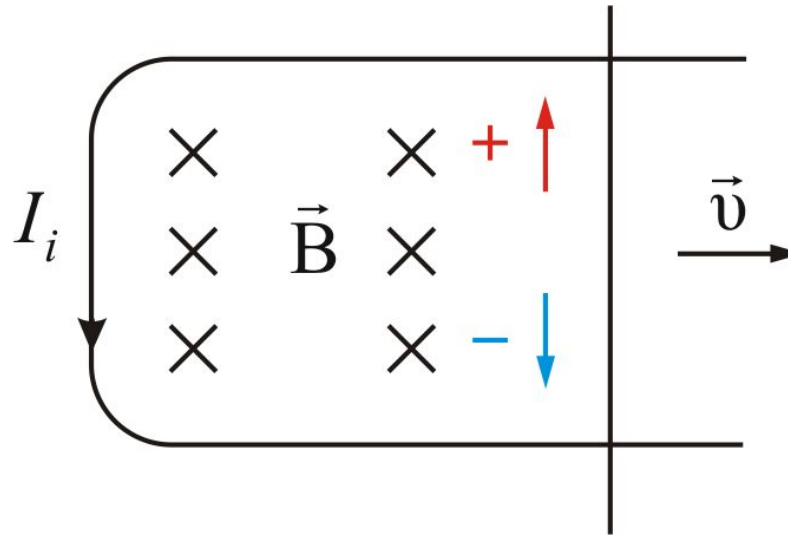
---

- Это выражение для ЭДС индукции контура является совершенно универсальным, не зависящим от способа изменения потока магнитной индукции и **носит название *закон Фарадея***.
- Знак минус – математическое выражение ***правила Ленца о направлении индукционного тока***: **индукционный ток всегда направлен так, чтобы своим полем противодействовать изменению начального магнитного поля.**



# Природа ЭДС индукции

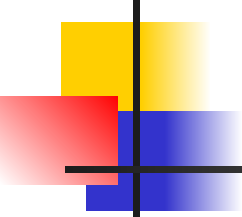
- Ответим на вопрос, что является причиной движения зарядов, причиной возникновения индукционного тока. Рассмотрим рисунок



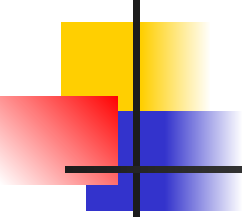
# Природа ЭДС индукции

- 1) Если перемещать проводник в однородном магнитном поле, то под действием силы Лоренца, электроны будут отклоняться вниз, а положительные заряды вверх – возникает разность потенциалов, под действием которой течет ток.
- Как мы знаем, для положительных зарядов  $F_{\perp} = q^+ [\mathbf{B}, \mathbf{v}]$ , для электронов  $F_{\perp} = -e [\mathbf{B}, \mathbf{v}]$ .

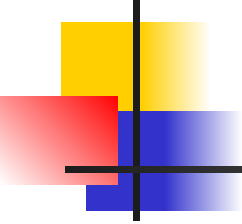
# Природа ЭДС индукции

- 
- **2) 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 причем, т.к. она действует на движущиеся заряды, а они в начале покоились (находились в тепловом, хаотическом движении).**

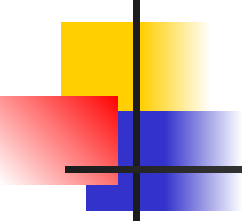
# Природа ЭДС индукции

- 
- Ответ был дан Дж. Максвеллом в 1860 г.: *всякое переменное магнитное поле возбуждает в окружающем пространстве электрическое поле.* Оно и является причиной возникновения индукционного тока в проводнике.
  - То есть, возникает только при наличии переменного магнитного поля (на постоянном токе трансформатор не работает).

# Природа ЭДС индукции

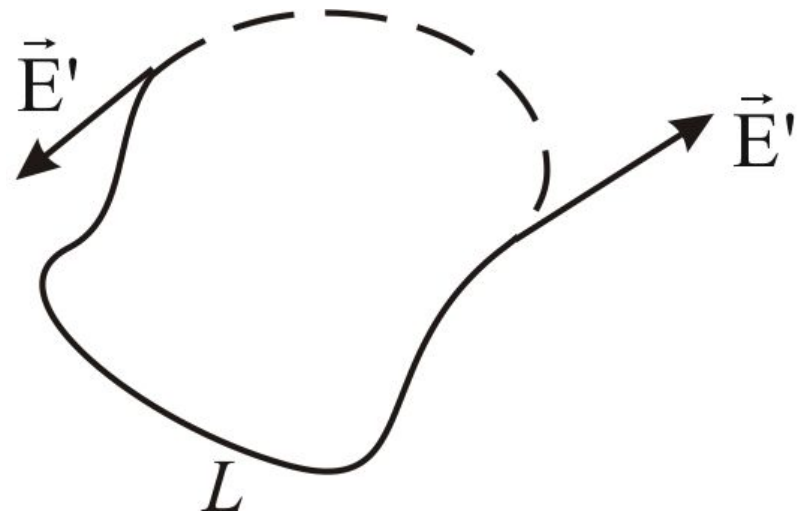
- 
- ***Сущность явления электромагнитной индукции*** совсем не в появлении индукционного тока (ток появляется тогда, когда есть заряды и замкнута цепь), а ***в возникновении вихревого электрического поля*** (не только в проводнике, но и в окружающем пространстве, в вакууме).

# Природа ЭДС индукции

- 
- **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 у нас в электростатике.**
  - **Это поле вихревое, силовые линии его замкнуты.**

# Циркуляция вектора напряженности вихревого электрического поля

- Чему равна циркуляция вектора вихревого электрического поля в случае изображенном на рисунке?



# Циркуляция вектора напряженности вихревого электрического поля

- Работу вихревого электрического поля по перемещению заряда вдоль замкнутого контура  $L$  можно подсчитать по формуле

$$dA = q \oint_L \mathbf{E}' \cdot d\mathbf{l}$$

- С другой стороны, *работа по перемещению единичного заряда вдоль замкнутой цепи равна ЭДС, действующей в этой цепи:*

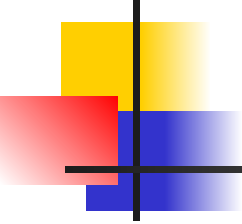
$$dA = \varepsilon_i$$

- **Следовательно:**

$$\oint_L \mathbf{E}' \cdot d\mathbf{l} = -\frac{d\Phi}{dt}$$



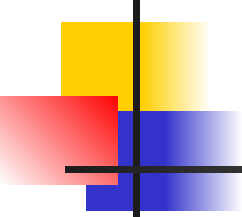
# Циркуляция вектора напряженности вихревого электрического поля

- 
- Эти выражения для циркуляции 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 .

# Циркуляция вектора напряженности вихревого электрического поля

- Если заряд  $q$  движется в вакууме по контуру, то при каждом обходе контура механическая энергия его возрастает на величину
$$\frac{mv^2}{2} = \oint_L q \mathbf{E}' \cdot d\mathbf{l} = q \mathcal{E}_i;$$
- (при движении заряда в проводнике из-за сопротивления устанавливается динамическое равновесие).
- На использовании этого факта основан оригинальный ускоритель электронов – ***бетатрон.***

# Токи Фуко (вихревые токи)

- 
- 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 – замкнуты).
  - Так как электрическое поле вихревое и токи называются вихревыми – токи Фуко.

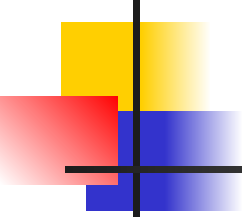
# Токи Фуко (вихревые токи)

- Если медную пластину отклонить от положения равновесия и отпустить так, чтобы она вошла со скоростью  $u$  в пространство между полосами магнита, то пластина практически остановится в момент ее вхождения в магнитное поле.
- Замедление движения связано с возбуждением в пластине вихревых токов, препятствующих изменению потока вектора магнитной индукции.
- Поскольку пластина обладает конечным сопротивлением, токи индукции постепенно затухают и пластина медленно двигается в магнитном поле.
- Если электромагнит отключить, то медная пластина будет совершать обычные колебания, характерные для маятника.

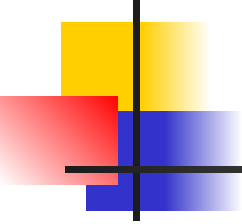
# Токи Фуко (вихревые токи)

- 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.

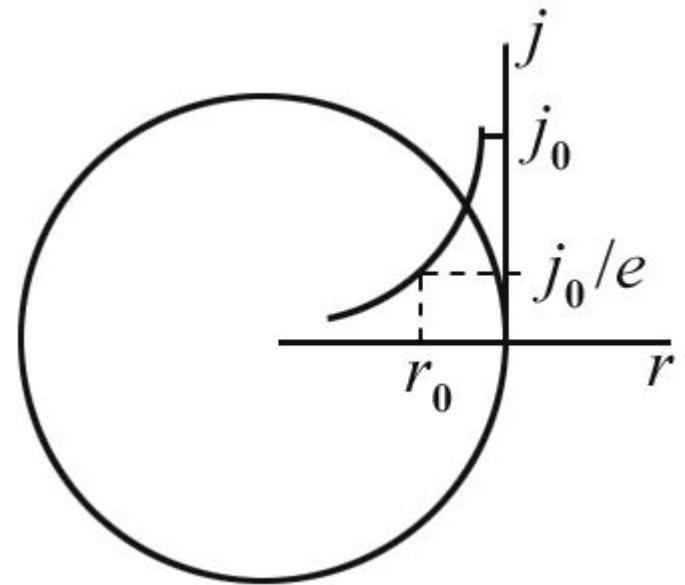
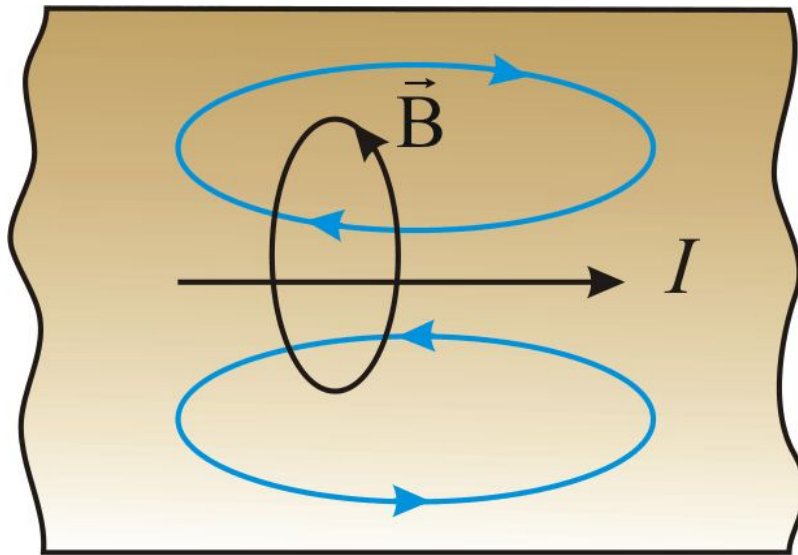
# Скин-эффект

- 
- Если быстропеременный высокочастотный ток протекает по проводнику, то вихревые токи, индуцируемые в проводнике, препятствуют равномерному распределению плотности тока по поперечному сечению проводника – плотность тока на оси провода оказывается меньше, чем у его поверхности.
  - Ток как бы вытесняется на поверхность провода, при этом вихревые токи по оси проводника текут против направления основного тока, а на поверхности – в том же направлении.
  - **Это явление называется скин-эффектом** (от англ. *skin* – кожа, оболочка).

# Скин-эффект

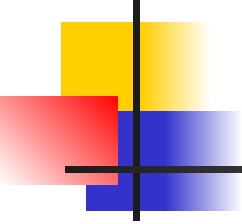
- 
- При нарастании тока в проводе ЭДС индукции направлена против тока.
  - Электрическое поле самоиндукции максимально на оси провода, что приводит к неравномерному распределению плотности тока.
  - Плотность тока убывает от поверхности к оси провода примерно по экспоненциальному закону.

# Скин-эффект

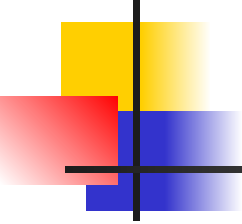




# Скин-эффект

- 
- 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 равна  $r_0 \approx 7 \cdot 10^{-3} \text{ мм}$   
– ток почти целиком течет по поверхности провода.

# Скин-эффект

- 
- 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.



# САМОИНДУКЦИЯ И ВЗАИМНАЯ ИНДУКЦИЯ

---

- 1. Явление самоиндукции
- 2. Влияние самоиндукции на ток при замыкании и размыкании цепи, содержащей индуктивность
- 3. Взаимная индукция
- 4. Индуктивность трансформатора
- 5. Энергия магнитного поля

# 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.
- 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*.

# Явление самоиндукции



---

- *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 использованы для того, чтобы подчеркнуть место возникновения ЭДС индукции.**

# Явление самоиндукции

- *Явление самоиндукции* открыл американский ученый Дж. Генри в 1831 г.
- Явление самоиндукции можно определить следующим образом.
- *Ток  $I$ , текущий в любом контуре создает магнитный поток  $\Psi$ , пронизывающий этот же контур. При изменении  $I$ , будет изменяться  $\Psi$ , следовательно в контуре будет наводиться ЭДС индукции.*



# Явление самоиндукции

---

- Т.к. магнитная индукция  $B$  пропорциональна току  $I$  ( $B = \mu\mu_0 nI$ ), следовательно  $\Psi = LI$ ,
- где  $L$  – коэффициент пропорциональности, названный ***ИНДУКТИВНОСТЬЮ КОНТУРА.***



# Явление самоиндукции

---

- **За единицу индуктивности в СИ принимается индуктивность такого контура, у которого при токе  $I=1\text{A}$  возникает полный поток**

$$\Psi = 1 \text{ Вб}$$

- **Эта единица называется **Генри (Гн)**.**





# Явление самоиндукции

---

- Вычислим индуктивность соленоида  $L$ .
- Если длина соленоида  $l$  гораздо больше его диаметра  $d$  (), то к нему можно применить формулы для бесконечно длинного соленоида.

- Тогда 
$$B = \mu\mu_0 I \frac{N}{l},$$

- здесь  $N$  – число витков.

- Поток через каждый из витков  $\Phi = BS$ .

- Потокосцепление

$$\Psi = NBS = \mu\mu_0 I \frac{N}{l} NS = \mu\mu_0 \frac{N^2 S}{l} I.$$



# Явление самоиндукции

---

- Так как  $\Psi = LI$

$$L_{\text{сол}} = \mu\mu_0 \frac{N^2 S}{l} = \mu\mu_0 n^2 l S,$$

$$n = N / l, \quad l S = V$$

$$L_{\text{сол}} = \mu\mu_0 n^2 V.$$

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

$$\varepsilon_i = -\frac{d\Psi}{dt} = -\frac{d}{dt}(IL) = -L \frac{dI}{dt},$$

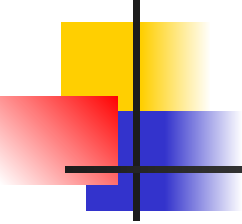


# Явление самоиндукции

---

- Явление самоиндукции играет важную роль в электротехнике и радиотехнике.
- Как мы увидим дальше, благодаря самоиндукции происходит перезарядка конденсатора, соединенного последовательно с катушкой индуктивности, в результате в такой  $LC$ -цепочке (колебательном контуре) возникают электромагнитные колебания.

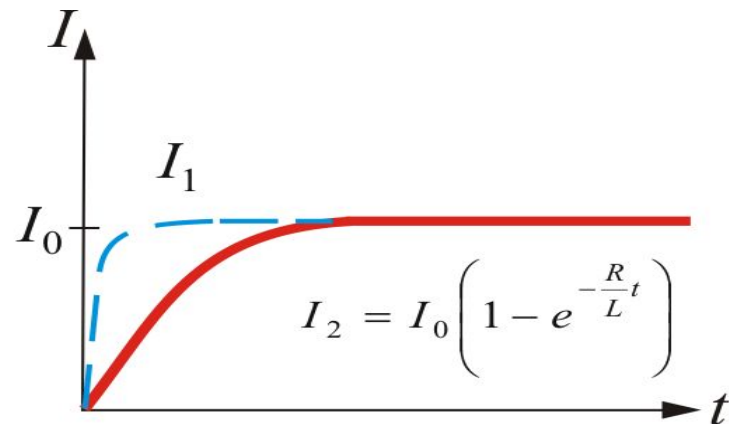
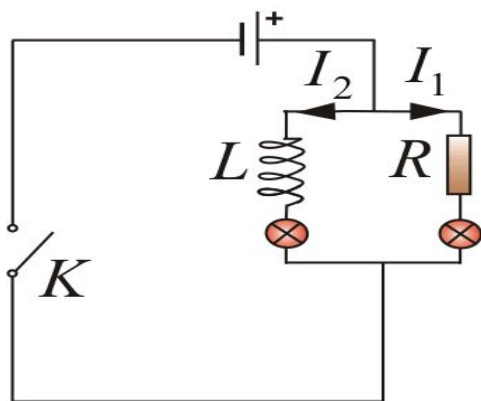
## Влияние самоиндукции на ток при замыкании и размыкании цепи, содержащей индуктивность

- 
- Рассмотрим несколько случаев влияния ЭДС самоиндукции на ток в цепи.
  - **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 К установление тока  $I_2$  в цепи содержащей индуктивность  $L$ , будет происходить не мгновенно, а постепенно.

## Влияние самоиндукции на ток при замыкании и размыкании цепи, содержащей индуктивность

- Сила тока в этой цепи будет удовлетворять уравнению

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



## Влияние самоиндукции на ток при замыкании и размыкании цепи, содержащей индуктивность

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

$$\tau = \frac{L}{R}.$$

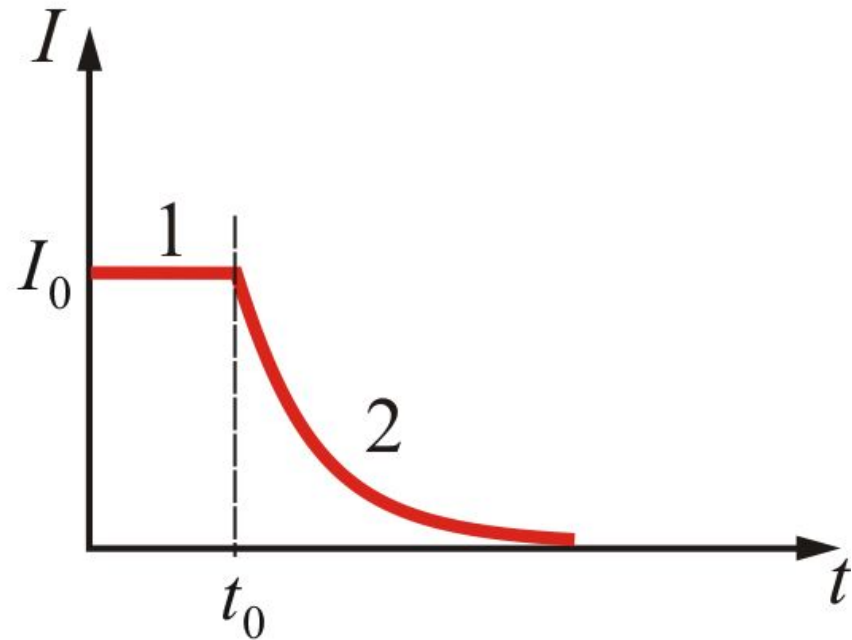
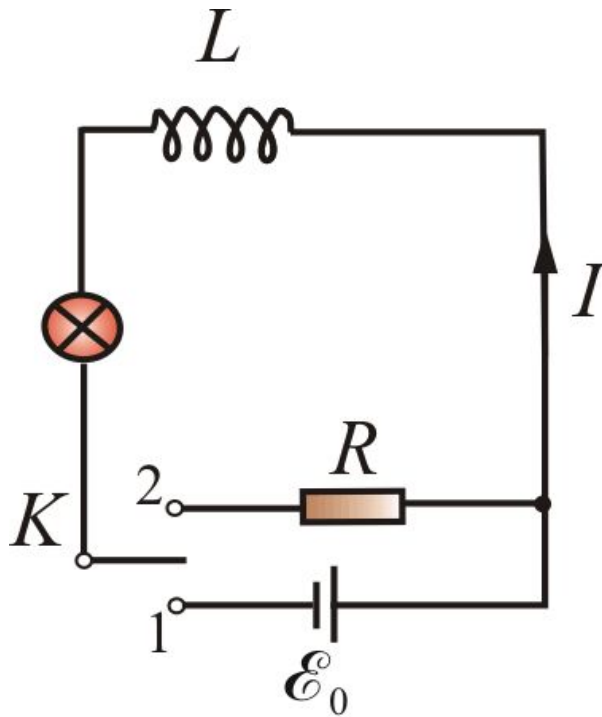
- В цепи, содержащей только активное сопротивление  $R$  ток установится практически мгновенно (пунктирная кривая ).

## Влияние самоиндукции на ток при замыкании и размыкании цепи, содержащей индуктивность

- **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

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

# Влияние самоиндукции на ток при замыкании и размыкании цепи, содержащей индуктивность



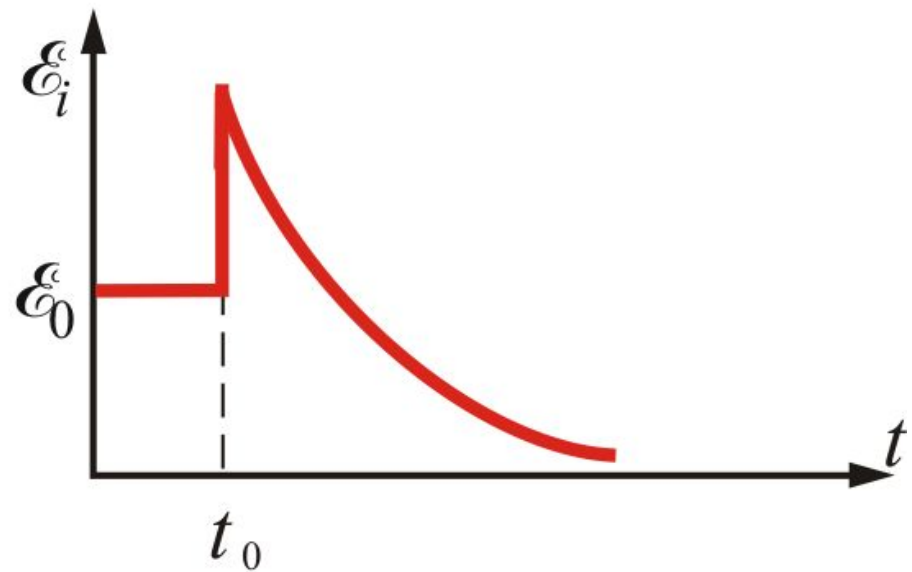
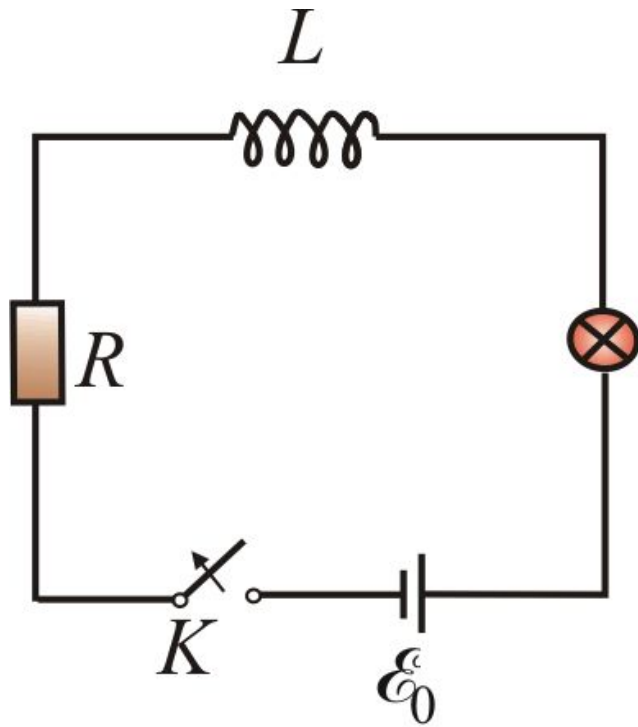


## Влияние самоиндукции на ток при замыкании и размыкании цепи, содержащей индуктивность

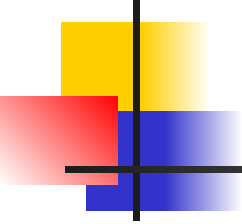
- Оба эти случая говорят, что чем больше индуктивность цепи  $L$  и чем меньше сопротивление  $R$ , тем больше постоянная времени  $\tau$  и тем медленнее изменяется ток в цепи.
- **Случай 3.**
- **Размыкание цепи содержащей индуктивность  $L$ .**
- Сначала цепь замкнута. В цепи течет установившийся ток. Поэтому рисуем зависимость  $i(t)$ . При размыкании цепи в момент времени  $t_0$ ,  $R \rightarrow \infty$  Это приводит к резкому возрастанию ЭДС индукции, определяемой по формуле:

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

# Влияние самоиндукции на ток при замыкании и размыкании цепи, содержащей индуктивность

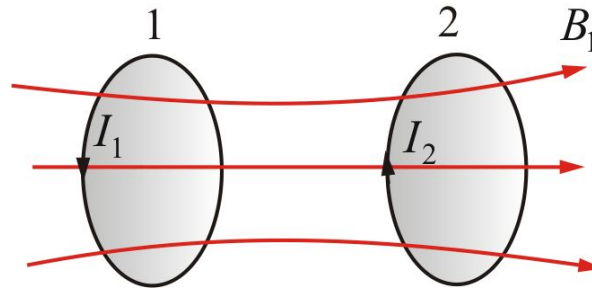


## Влияние самоиндукции на ток при замыкании и размыкании цепи, содержащей индуктивность

- 
- Происходит этот скачок вследствие большой величины скорости изменения тока  $\frac{dI}{dt}$
  - $\varepsilon_i$  резко возрастает по сравнению с  $\varepsilon_0$  и даже может быть в несколько раз больше . (Нельзя резко размыкать цепь, состоящую из трансформатора и других индуктивностей).

# 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.

$$\Psi_2 = L_{21}I_1.$$



# Взаимная индукция

---

- При изменении тока  $I_1$  во втором контуре наводится ЭДС индукции

$$\varepsilon_{i2} = -L_{21} \frac{dI_1}{dt}.$$

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

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

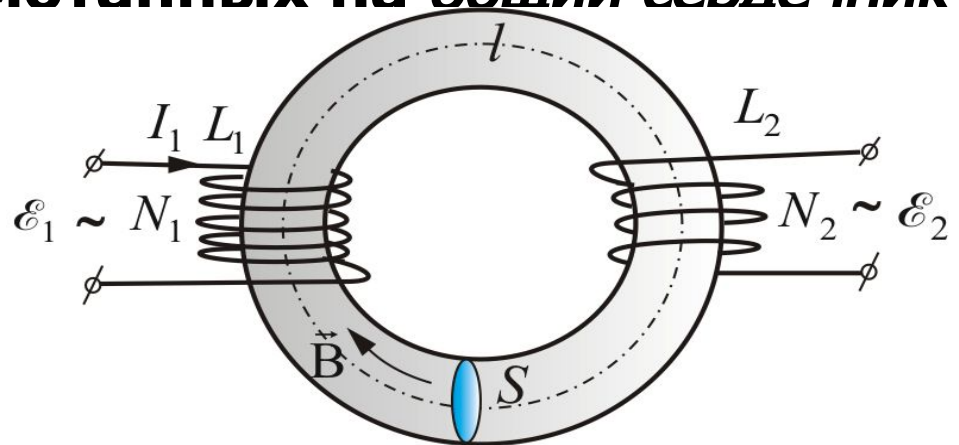
- И при изменении тока  $I_2$  наводится ЭДС

$$\varepsilon_{i1} = -L_{12} \frac{dI_2}{dt}.$$

- Контуров называются **связанными**, а явление — **взаимной индукцией**.

# Индуктивность трансформатора

- Трансформатор является типичным примером двух связанных контуров. Рассмотрим индуктивность трансформатора и найдем коэффициент трансформации.
- Рассчитаем **взаимную индуктивность двух катушек** и , намотанных на **общий сердечник**



# Индуктивность трансформатора

- Когда в первой катушке идет ток , в сердечнике возникает магнитная индукция и магнитный поток  $\Phi$  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  $\Psi_2$  сцепленный со второй обмоткой

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

# Индуктивность трансформатора

- здесь  $\Psi_2 = N_2\Phi$  – потокосцепление которое можно найти по формуле:

$$\Psi_2 = L_{21}I_1.$$

- По определению взаимная индуктивность двух катушек равна:

$$L_{12} = L_{21} = \frac{\Psi_2}{I_1} = \mu\mu_0 \frac{N_1N_2}{l} S.$$

- К первичной обмотке подключена переменная ЭДС  $E_1$ . По закону Ома ток в этой цепи будет определяться алгебраической суммой внешней ЭДС и ЭДС индукции.





# Индуктивность трансформатора

---

- К первичной обмотке подключена переменная ЭДС  $\varepsilon_1$
- По закону Ома ток в этой цепи будет определяться алгебраической суммой внешней ЭДС и ЭДС индукции.

$$\varepsilon_1 = -\frac{d(N_1\Phi)}{dt} + I_1R_1,$$

- где  $R_1$  – сопротивление обмотки, которое делают малым, так что

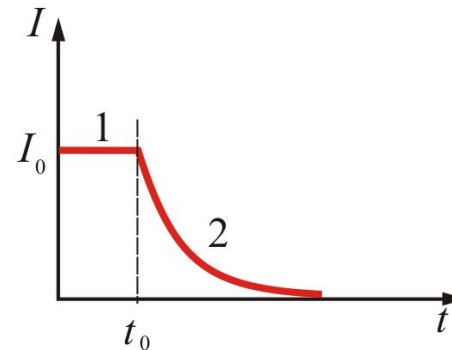
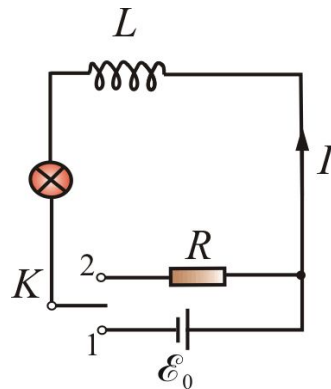
$$I_1R_1 \rightarrow 0$$

# Индуктивность трансформатора

- Тогда  $\varepsilon_1 \approx \frac{d(N_1\Phi)}{dt} \approx N_1 \frac{d\Phi}{dt}$ .
- Во второй обмотке, по аналогии  $\varepsilon_2 \approx N_2 \frac{d\Phi}{dt}$
- Отсюда  $\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \approx \frac{N_1}{N_2}$ .
- Если пренебречь потерями, т.е. предположить, что  $R \approx 0$ , то
$$\varepsilon_1 I_1 \approx \varepsilon_2 I_2.$$
- Коэффициент трансформации  $\eta = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = \frac{N_2}{N_1}$ .

# Энергия магнитного поля

- Сначала замкнем соленоид  $L$  на источник ЭДС, в нем будет протекать ток.
- Затем переключим ключ в положение 2 – замкнем соленоид на сопротивление  $R$ .
- В цепи будет течь убывающий ток  $I$ .
- При этом будет совершена работа:



# Энергия магнитного поля

- Определим ее

$$dA = \varepsilon_i Idt;$$

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

$$A = -L \int_I^0 IdI = \frac{LI^2}{2};$$

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



# Энергия магнитного поля

---

- 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, что энергия была локализована в магнитном поле.
- Значит, проводник, с индуктивностью  $L$ , по которой течет ток  $I$ , обладает энергией

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



# Энергия магнитного поля

---

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

$$w = \frac{W}{V} = \frac{\mu\mu_0 H^2}{2}, \quad w = \frac{B^2}{2\mu\mu_0}, \quad w = \frac{BH}{2}$$

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

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



# Контрольные вопросы

---

1. **Дайте определение явления электромагнитной индукции.**
2. **Сформулируйте правило Ленца.**
3. **Циркуляция вектора напряженности вихревого электрического поля.**
4. **Определение: токи Фуко, скин – эффект.**
5. **Явление самоиндукции.**
6. **Взаимная индукция**



# Контрольные вопросы

---

- **1. Взаимная индуктивность двух катушек – трансформатора.**
- **2. Энергия магнитного поля, объемная плотность энергии магнитного поля, объемная плотность энергии магнитного поля соленоида.**
- **3. Диамагнетики, парамагнетики, ферромагнетики.**
- **4. Орбитальный магнитный момент электрона, орбитальный момент импульса электрона.**
- **5. Гиромагнитное отношение орбитальных моментов, гиромагнитное отношение спиновых моментов.**