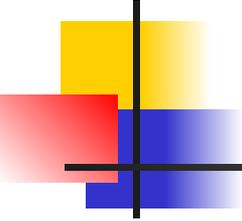


ЯВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ

- 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

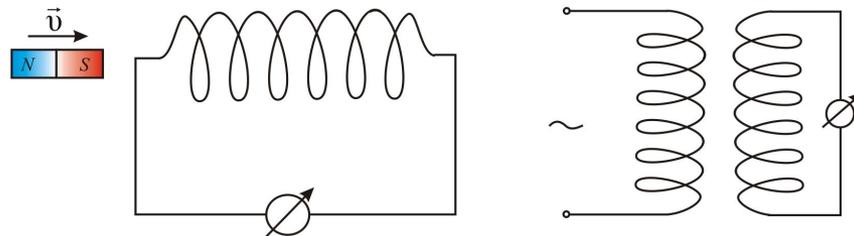
Опыты Фарадея. Индукционный ток. Правило Ленца

- 
- 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).

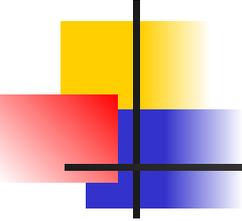
Опыты Фарадея. Индукционный ток. Правило Ленца

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

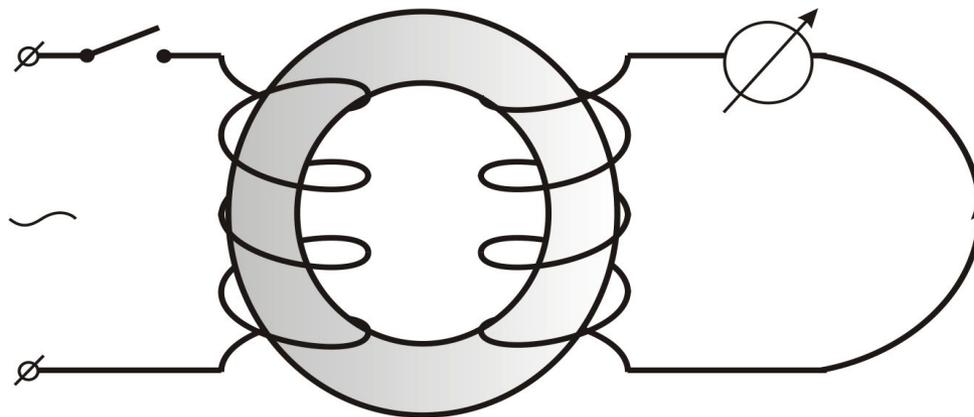


Опыты Фарадея. Индукционный ток. Правило Ленца

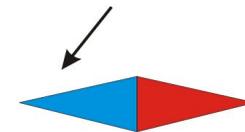
- 
- По определению Фарадея общим для этих опытов является то, что: *если поток вектора индукции, пронизывающий замкнутый, проводящий контур меняется, то в контуре возникает электрический ток.*
 - Это явление называют *явлением электромагнитной индукции, а ток – индукционным.*
 - При этом, явление совершенно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

Опыты Фарадея. Индукционный ток. Правило Ленца

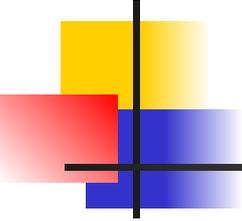
- **Лучше всего этот эффект проявляется, если две катушки соединить сердечником (рисунок)**



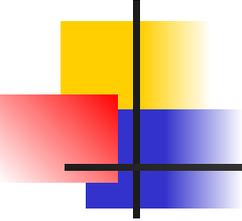
Стрелка компаса дергается при замыкании цепи



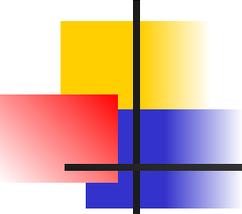
Опыты Фарадея. Индукционный ток. Правило Ленца

- 
- **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

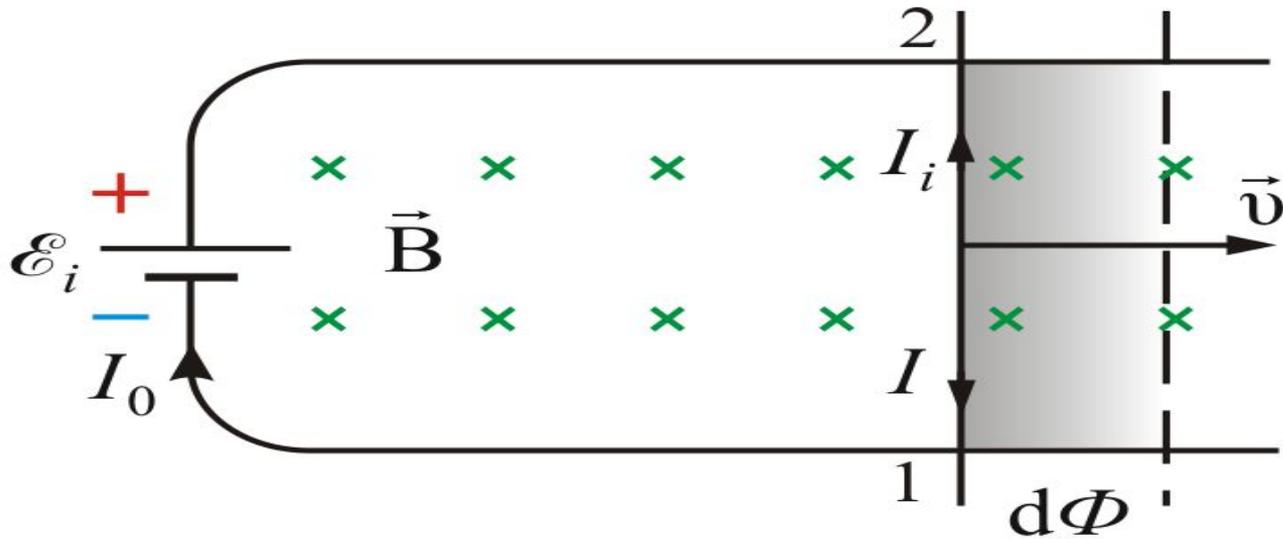
- 
-
- **Заполнение всего пространства однородным магнетиком приводит при прочих равных условиях к увеличению индукции в μ раз.**
 - **Этот факт подтверждает то, что индукционный ток обусловлен изменением потока вектора магнитной индукции , а не потока вектора напряженности .**

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

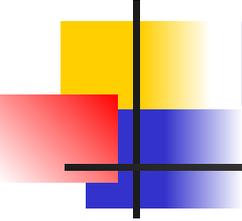




Величина ЭДС индукции

- Пусть сначала магнитное поле отсутствует.
 - Батарея с ЭДС равной ε_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:

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



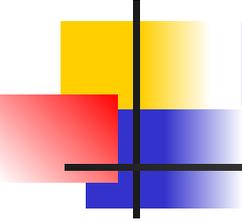
Величина ЭДС индукции

- Поместим контур в однородное магнитное поле с индукцией \vec{B} .
- Линии \vec{B} параллельны \vec{h} и связаны с направлением тока «правилом буравчика».
- Поток Φ , 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 ε_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.*

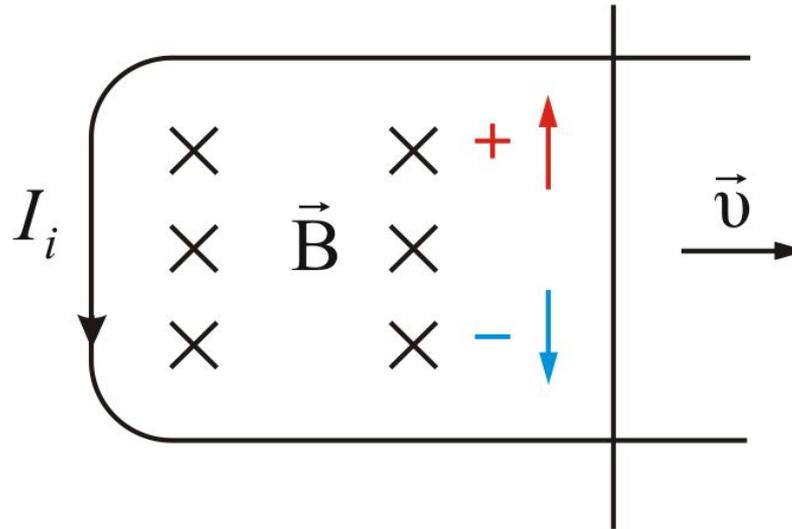


Величина ЭДС индукции

- 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

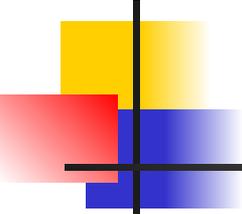
- Ответим на вопрос, что является причиной движения зарядов, причиной возникновения индукционного тока. Рассмотрим рисунок



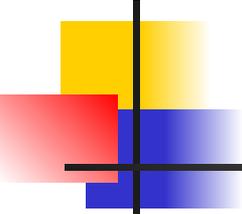
Природа ЭДС индукции

- 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 $F_{\text{л}} = q^+ [\vec{B}, \vec{v}]$, для электронов $F_{\text{л}} = -e [\vec{B}, \vec{v}]$.

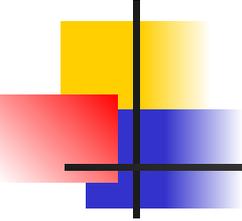
Природа ЭДС индукции

- 
- **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

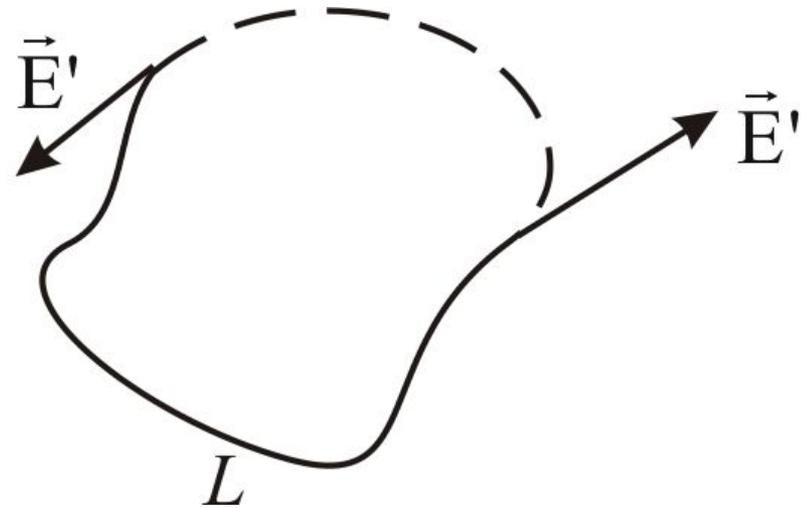
- 
- ***Сущность явления электромагнитной индукции*** совсем не в появлении индукционного тока (ток появляется тогда, когда есть заряды и замкнута цепь), а ***в возникновении вихревого электрического поля*** (не только в проводнике, но и в окружающем пространстве, в вакууме).

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 напряженности 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

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

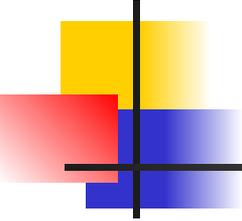
- С другой стороны, *работа по перемещению единичного заряда вдоль замкнутой цепи равна ЭДС, действующей в этой цепи:*

$$dA = \varepsilon_i$$

- Следовательно:

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

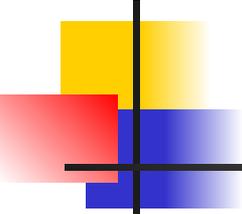
Циркуляция вектора напряженности вихревого электрического поля

- 
- 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.

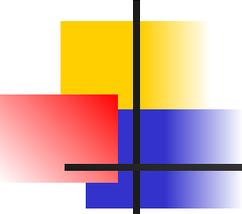
Токи Фуко (вихревые токи)

- 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.

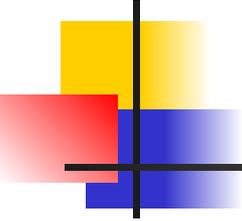
Токи Фуко (вихревые токи)

- 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.

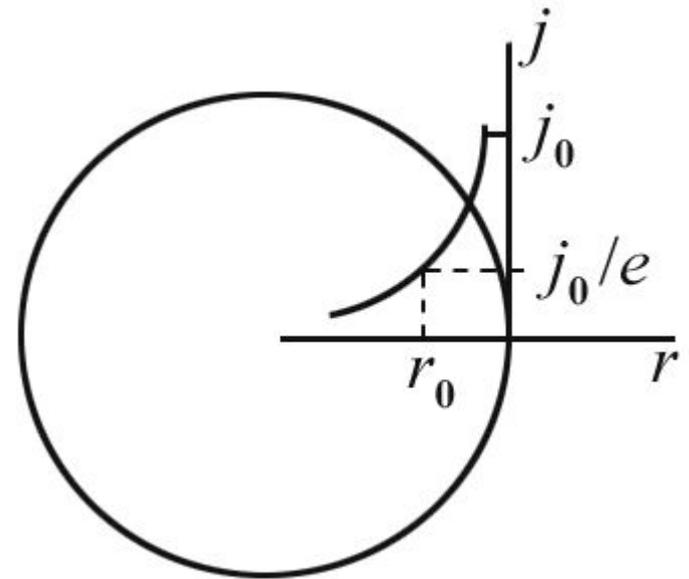
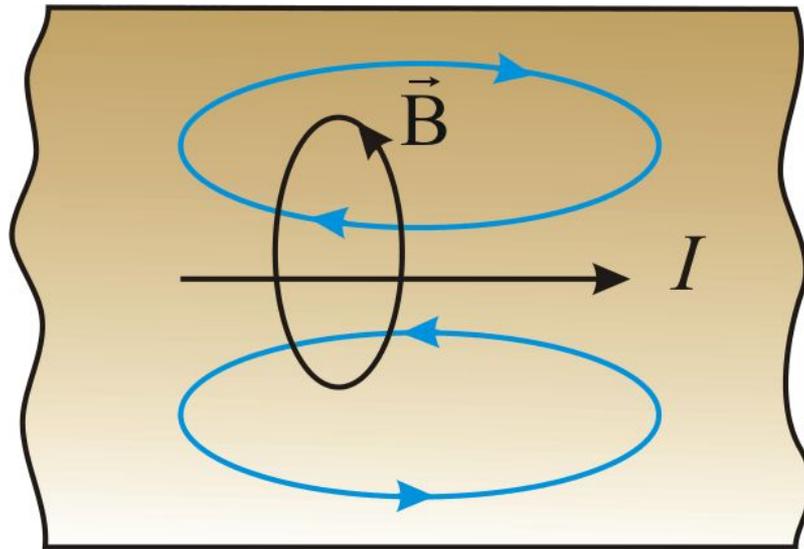
Скин-эффект

- 
- 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).

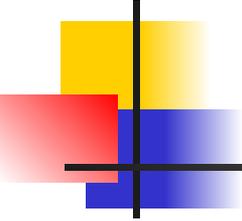
Скин-эффект

- 
- 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.

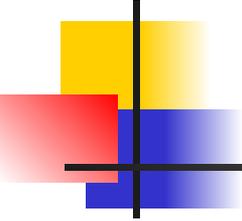
Скин-эффект

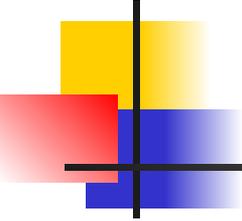


Скин-эффект

- 
- 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.



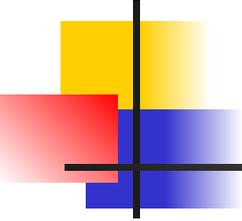
САМОИНДУКЦИЯ И ВЗАИМНАЯ ИНДУКЦИЯ

- 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*.

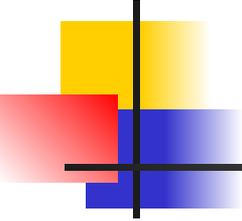
Явление самоиндукции



- *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.**

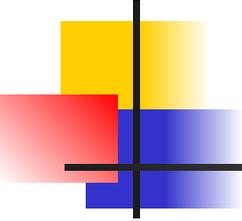
Явление самоиндукции

- ***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 Ψ , пронизывающий этот же контур. При изменении I , будет изменяться Ψ , 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.***

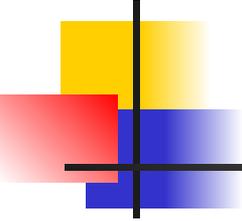


Явление самоиндукции

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

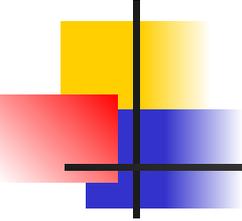
- Тогда
$$B = \mu\mu_0 I \frac{N}{l},$$

- 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 $\Psi = LI$

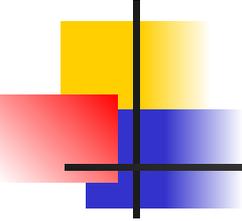
$$L_{\text{сол}} = \mu\mu_0 \frac{N^2 S}{l} = \mu\mu_0 n^2 l S,$$

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

$$L_{\text{сол}} = \mu\mu_0 n^2 V.$$

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

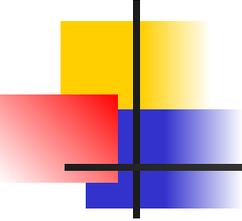
$$\varepsilon_i = -\frac{d\Psi}{dt} = -\frac{d}{dt}(IL) = -L \frac{dI}{dt},$$



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.

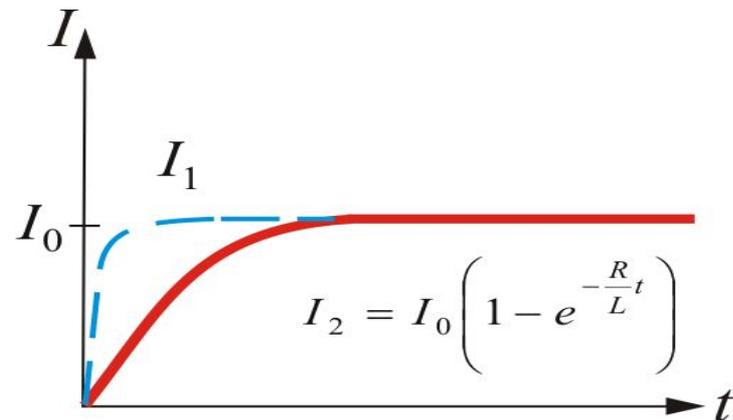
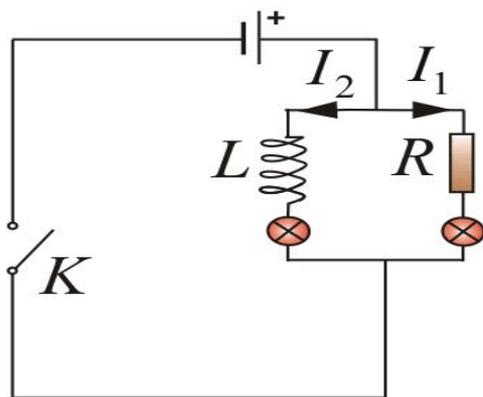
Влияние самоиндукции на ток при замыкании и размыкании цепи, содержащей индуктивность

- 
- 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***

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

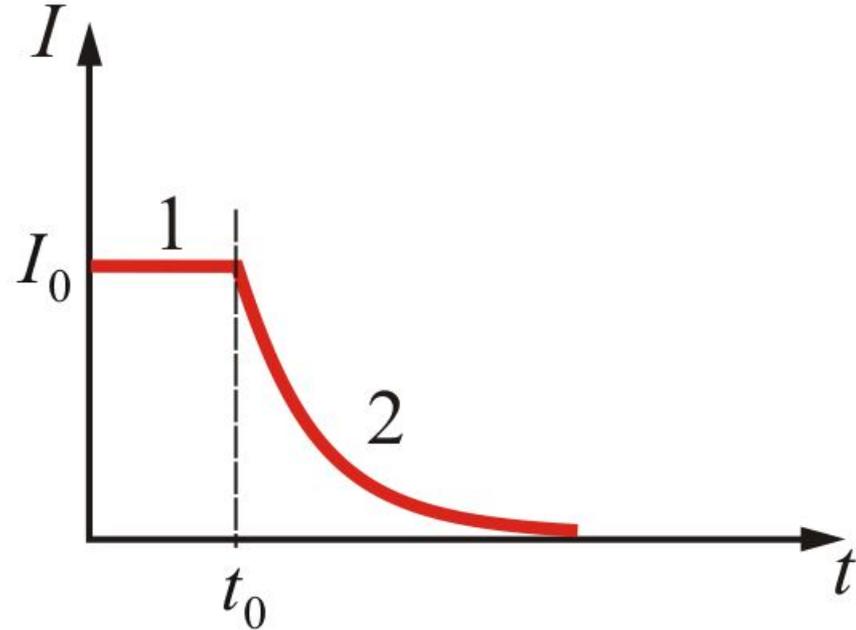
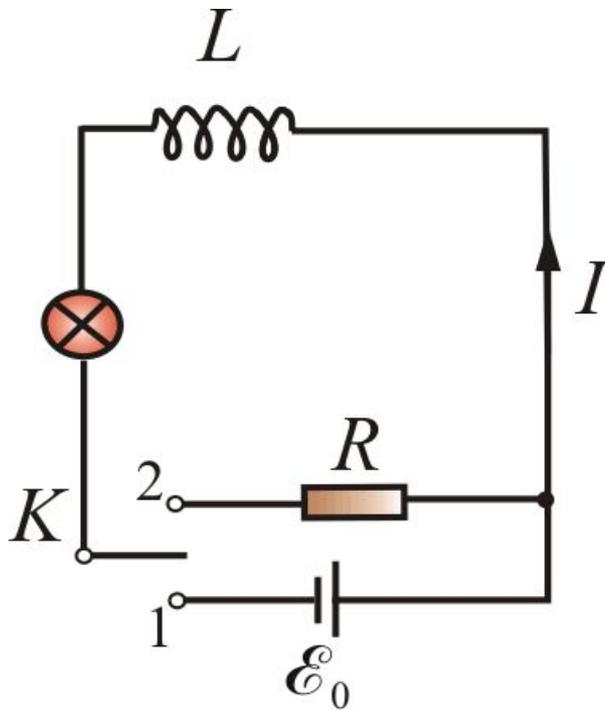
- В цепи, содержащей только активное сопротивление R ток установится практически мгновенно (пунктирная кривая).

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

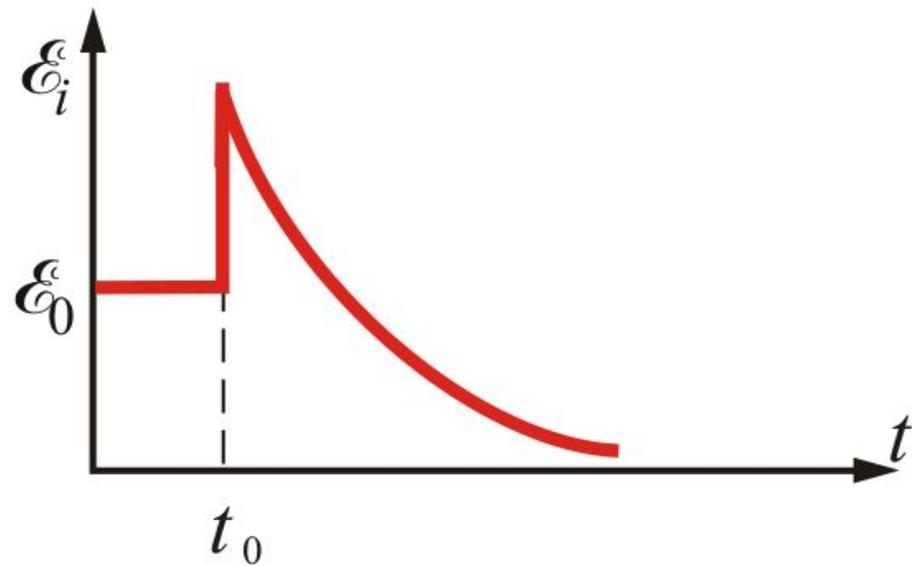
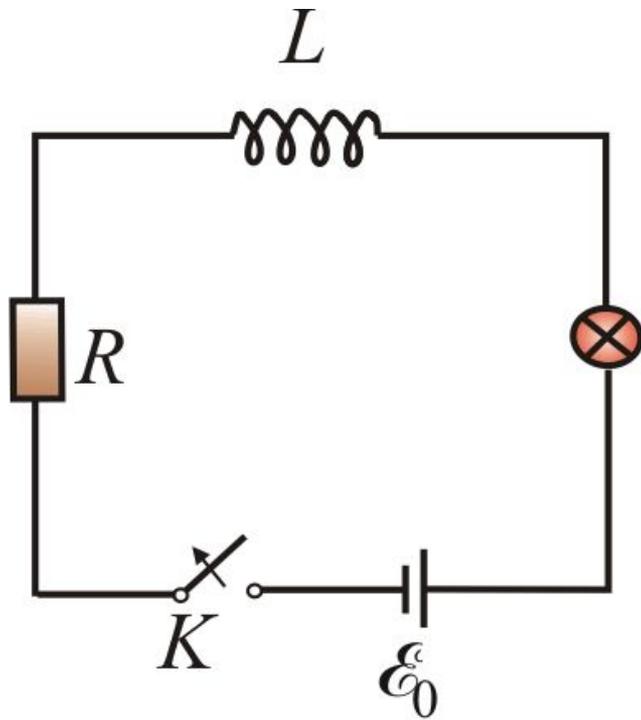


Влияние самоиндукции на ток при замыкании и размыкании цепи, содержащей индуктивность

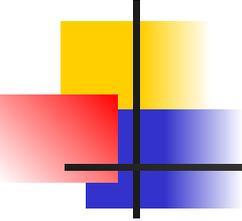
- Оба эти случая говорят, что чем больше индуктивность цепи L и чем меньше сопротивление R , тем больше постоянная времени τ и тем медленнее изменяется ток в цепи.
- **Случай 3.**
- **Размыкание цепи содержащей индуктивность L .**
- Сначала цепь замкнута. В цепи течет установившийся ток. Поэтому рисуем 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

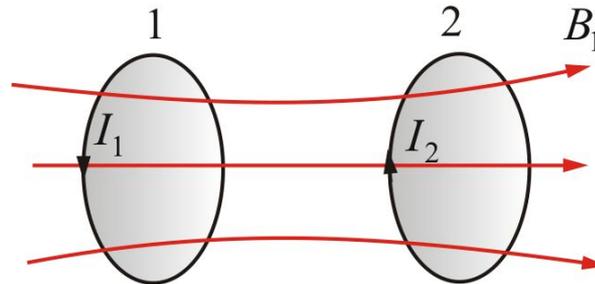


Влияние самоиндукции на ток при замыкании и размыкании цепи, содержащей индуктивность

- 
- Происходит этот скачок вследствие большой величины скорости изменения тока $\frac{dI}{dt}$
 - ε_i резко возрастает по сравнению с ε_0 и даже может быть в несколько раз больше . (Нельзя резко размыкать цепь, состоящую из трансформатора и других индуктивностей).

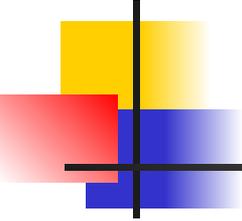
Взаимная индукция

- 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

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

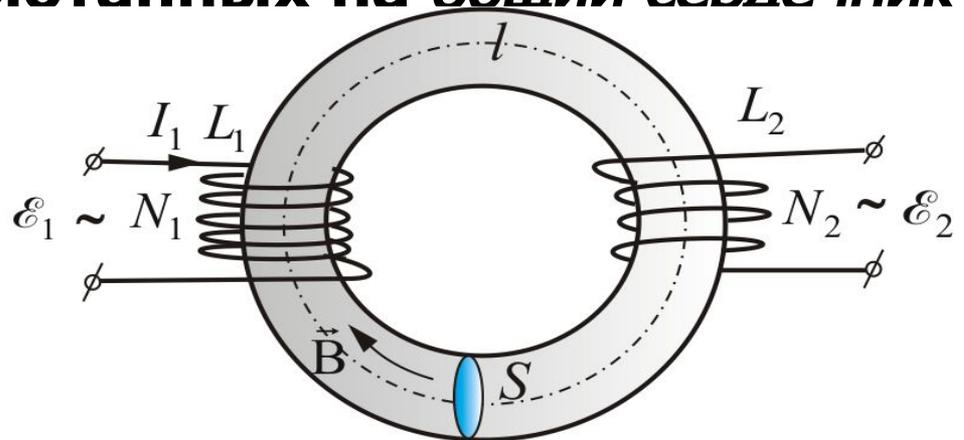
- И при изменении тока I_2 наводится ЭДС

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

- 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 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

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

Индуктивность трансформатора

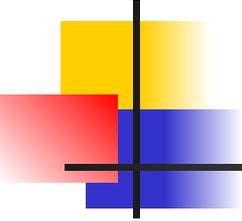
- здесь $\Psi_2 = N_2\Phi$ – потокосцепление которое можно найти по формуле:

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

- 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 ε_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

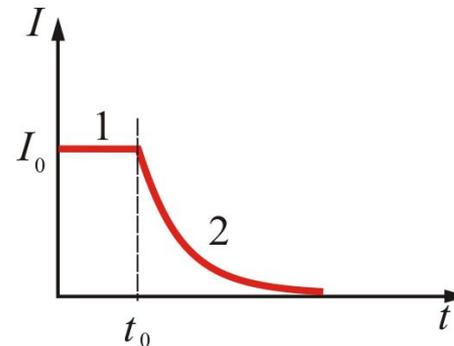
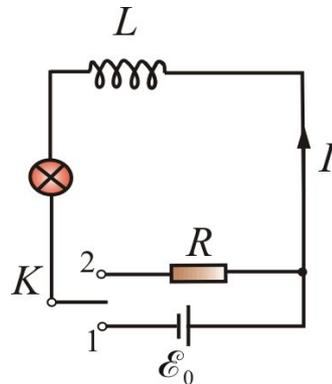
$$I_1R_1 \rightarrow 0$$

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

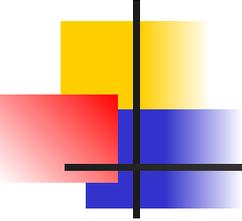
- Определим ее

$$dA = \varepsilon_i Idt;$$

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

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

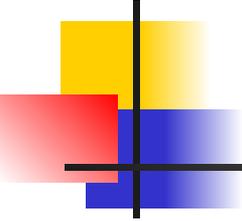
$$A = \frac{LI^2}{2}.$$



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

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



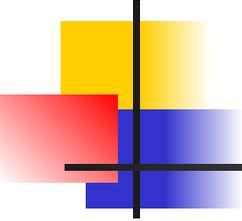
Энергия магнитного поля

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

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

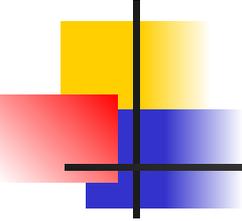
- Энергия однородного магнитного поля в длинном соленоиде может быть рассчитана по формуле:

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



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.**