

ЛЕКЦИЯ 5.

ПЛАН ЛЕКЦИИ

- 1. Явление электромагнитной индукции.*
- 2. Электродвижущая сила индукции.*
- 3. Природа ЭДС электромагнитной индукции.*
- 4. Явление самоиндукции. Индуктивность. ЭДС самоиндукции.*

ЯВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ.

Электрические токи создают вокруг себя магнитные поля.

Иначе, существует связь магнитного поля с током.

Магнитные поля в свою очередь должны вызывать протекание тока в проводниках.

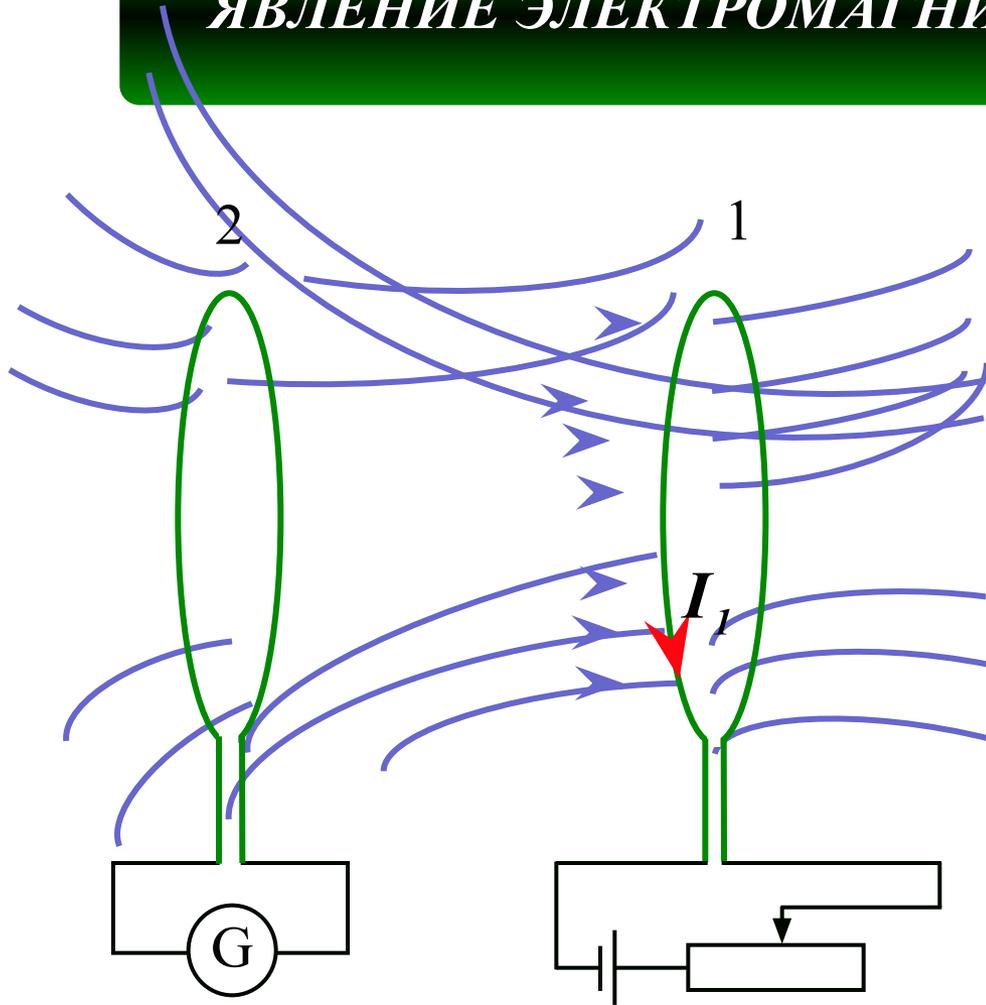
1831 год - открытие явления электромагнитной индукции (английский физик Фарадей).

Суть явления электромагнитной индукции:

в замкнутом проводящем контуре при изменении магнитного потока, охватываемого этим контуром, возникает электрический ток.

Этот ток назван *индукционным*.

ЯВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ.



Опыты Фарадея — два контура.

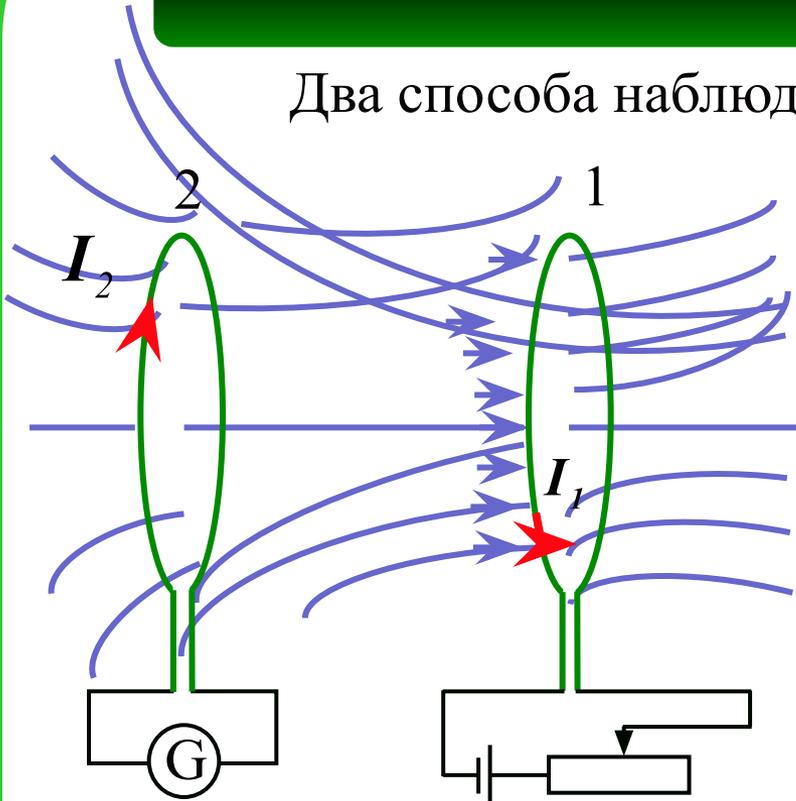
В первом ток регулировался реостатом.

Во второй контур включен гальванометр.

Ток в первом контуре создает магнитное поле, пронизывающее контур 2.

ЯВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ.

Два способа наблюдения индукционного тока:

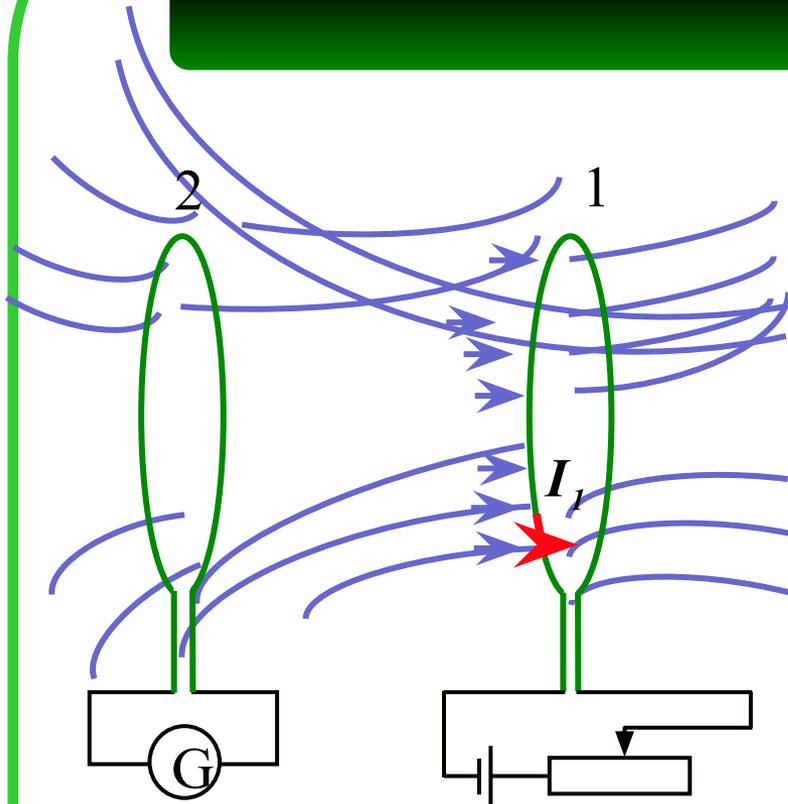


Способ 1. Контуры неподвижны. С увеличением тока I_1 растет поток магнитной индукции через контур 2.

В контуре 2 появляется индукционный ток I_2 , который регистрируется гальванометром **G**.

Уменьшение тока вызовет убывание магнитного потока через контур 2. В этом контуре появится индукционный ток противоположного направления.

ЯВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ.

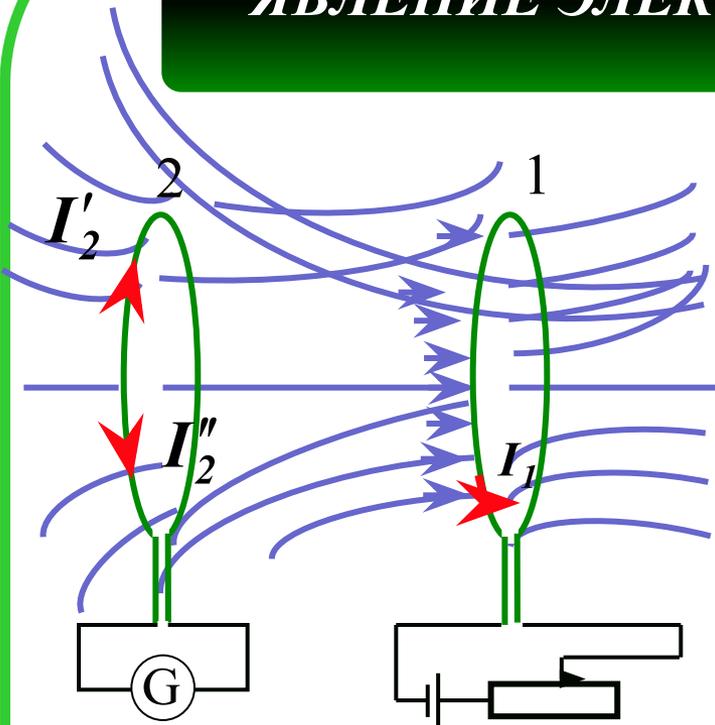


Способ 2. Один из контуров поворачивается или перемещается относительно другого так, чтобы менялся угол между нормалью контура 2 и направлением магнитного поля. $I_1 = const.$

Правило определения направления индукционного тока (правило Ленца):

Индукционный ток всегда направлен так, чтобы противодействовать причине, его вызывающей.

ЯВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ.



Пример. Пусть индукционный ток I_2 в контуре 2 вызывается изменением тока I_1 в контуре 1. В этом случае возникает ток такого направления, что создаваемый им собственный магнитный поток стремится ослабить изменения внешнего потока, вызвавшего появление индукционного тока:

- при увеличении тока магнитный поток контура 1, направленный вправо, возрастает, возникает ток I_2' , который создает поток, направленный влево.

- при уменьшении тока I_1 возникает ток I_2'' во втором контуре, собственный магнитный поток которого сонаправлен с внешним потоком. Этот поток стремится поддержать внешний поток неизменным.

Появление индукционного тока означает, что при изменении магнитного потока в контуре возникает ЭДС индукции.

Электродвижущая сила (ЭДС).

Необходимо создать условия для кругооборота зарядов в контуре. Должна быть совершена работа против сил электрического поля.

Такая работа совершается за счет сил, имеющих не электростатическую природу (напр. механическую, химическую, электромагнитную и т.д.).

Это сторонние электродвижущие силы (ЭДС)

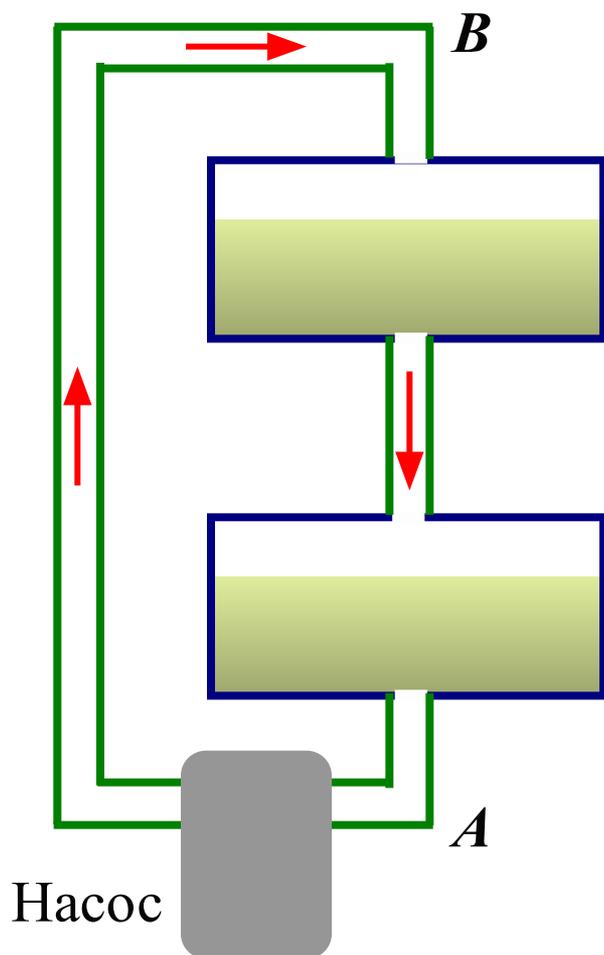
ЭДС определяется как циркуляция вектора напряженности электростатического поля по контуру.

$$E = \oint_L (\vec{E}, d\vec{l})$$

Электродвижущая сила E измеряется работой, совершаемой сторонними силами источника по перемещению единичного положительного заряда внутри источника от отрицательного полюса к положительному.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК

Электродвижущая сила (ЭДС) – аналогия с насосом.



Источник сторонних сил в цепи тока необходим, как, к примеру, насос для создания постоянной циркуляции жидкости в гидравлической системе.

От *A* до *B* вода движется *против* силы тяжести, под действием сторонних сил, создаваемых насосом.

От точки *B* до точки *A* вода движется под действием силы тяжести.

В электрической цепи: роль насоса играет источник сторонних сил.

ЭЛЕКТРОДВИЖУЩАЯ СИЛА ИНДУКЦИИ

Появление индукционного тока означает, что при изменении магнитного потока в контуре возникает ЭДС *индукции*.

Магнитный поток Φ_B - это поток вектора магнитной индукции:

$$\Phi_B(t) = \int_S (\vec{B}(t), d\vec{S})$$

Задача: записать связь между ЭДС \mathcal{E} и скоростью изменения магнитного потока Φ_B .

Из опытов: возникающая в контуре ЭДС индукции \mathcal{E} пропорциональна скорости изменения магнитного потока через контур, т.е. пропорциональна производной $d\Phi_B(t)/dt$

$$\mathcal{E} = - \frac{d\Phi_B(t)}{dt}$$

ЭЛЕКТРОДВИЖУЩАЯ СИЛА ИНДУКЦИИ

$$E = - \frac{d\Phi_B(t)}{dt}$$

Это закон электромагнитной индукции (закон Фарадея).

Формулировки закона электромагнитной индукции:

Какова бы ни была причина изменения потока магнитной индукции, охватываемого замкнутым проводящим контуром, возникающая в контуре ЭДС определяется формулой

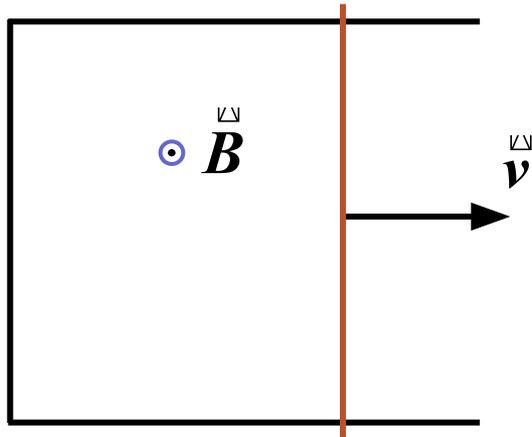
$$E = - \frac{d\Phi_B(t)}{dt}$$

ЭДС электромагнитной индукции в контуре численно равна и противоположна по знаку скорости изменения магнитного потока сквозь поверхность, ограниченную этим контуром.

ПРИРОДА ЭДС ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ

Два способа получения индукционного тока: в постоянном и переменном магнитных полях. Какова природа электромагнитной индукции в этих двух случаях?

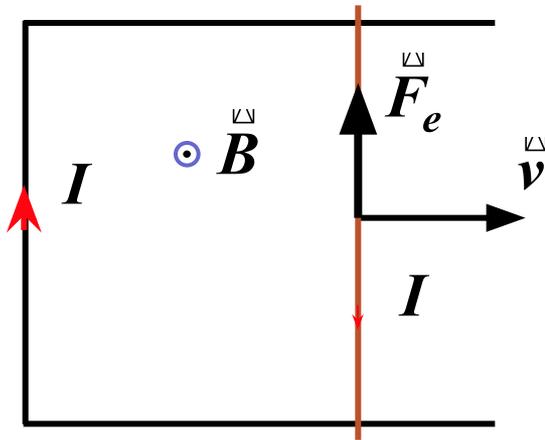
1. Контур движется в постоянном магнитном поле.



Пусть в контуре отсутствует источник ЭДС, тока нет.

Начнем двигать проводник с током вправо со скоростью \vec{v} . С такой же скоростью начнут двигаться вместе с проводником и носители тока – электроны.

ПРИРОДА ЭДС ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ



В результате на каждый электрон вдоль перемычки начнет действовать сила Лоренца

$$\vec{F} = -e[\vec{v}, \vec{B}]$$

Электроны начнут перемещаться – потечет ток.

На положительно заряженную частицу будет действовать сила, направленная вниз по проводнику, на электрон – вверх.

Электроны будут перемещаться вверх по проводнику, следовательно, индукционный ток направлен вниз.

Перераспределившиеся на поверхности проводника заряды создадут электрическое поле, которое возбудит ток и в остальных участках контура.

ПРИРОДА ЭДС ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ

В рассматриваемом случае магнитная сила \vec{F} играет роль сторонней силы.

Ей соответствует электрическое поле
$$\vec{E}^* = \vec{F} / (-e) = [\vec{v}, \vec{B}]$$

Таким образом, возбуждение ЭДС индукции при движении контура в постоянном магнитном поле объясняется действием на носители заряда магнитной силы, которая возникает при движении проводника.

ПРИРОДА ЭДС ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ

2. Контур покоится в переменном магнитном поле.

Если контур неподвижен, магнитная сила на заряды не действует.

Однако, индукционный ток возникает. Это свидетельствует о том, что переменное магнитное поле вызывает в контуре появление сторонних сил.

Но какова природа этих сил?

Заставить покоящуюся заряженную частицу двигаться может только одна сила: $q\vec{E}$ (сила $q[\vec{v}, \vec{B}]$ не действует на частицу с $\vec{v} = \vec{0}$).

Таким образом, остается предположить, что переменное магнитное поле каким-то образом приводит к появлению электрического поля, которым и обусловлен индукционный ток.

ПРИРОДА ЭДС ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ

Максвелл: изменяющееся во времени магнитное поле приводит к появлению в пространстве электрического поля. Контур позволяет обнаружить электрическое поле по возникающему в контуре индукционному току.

Таким образом, причиной возникновения индукционного тока в покоем контуре в переменном магнитном поле является электрическое поле, порождаемое меняющимся во времени магнитным полем.

Свойство этого поля: оно способно перемещать заряды в замкнутом контуре, вызывая появление тока. Т.е., для этого поля циркуляция вектора напряженности по замкнутому контуру не равна нулю.

Линии напряженности такого электрического поля - замкнутые линии. Такое поле называется *вихревым*. Итак, *переменное магнитное поле порождает вихревое электрическое поле*.

ЯВЛЕНИЕ САМОИНДУКЦИИ. ИНДУКТИВНОСТЬ

Электромагнитная индукция возникает при изменении магнитного потока через контур. Причина изменения магнитного потока неважна. Если в контуре течет изменяющийся во времени ток, то магнитное поле этого тока также будет изменяться. Это вызывает изменение магнитного потока через контур и появление ЭДС индукции в этом же контуре. Это явление называется *самоиндукцией*.

Магнитная индукция B пропорциональна силе тока, вызвавшего поле. Электрический ток в контуре создает пронизывающий этот контур магнитный поток.

Следовательно, ток I в контуре и создаваемый им полный магнитный поток Ψ (пси) через контур пропорциональны друг другу:

$$\Psi = LI$$

ЯВЛЕНИЕ САМОИНДУКЦИИ. ИНДУКТИВНОСТЬ

$$\Psi = LI$$

L - индуктивность контура.

Единица индуктивности - *генри* (Гн). Индуктивностью 1 Гн обладает контур, магнитный поток сквозь который при токе 1 А равен 1 Вб, значит $1 \text{ Гн} = 1 \text{ Вб/А}$.

ЭДС САМОИНДУКЦИИ

При изменении силы тока в контуре в соответствии с законом электромагнитной индукции возникает ЭДС самоиндукции:

$$E = -\frac{\partial \Phi_B}{\partial t} = -\frac{d}{dt}(LI)$$

Если индуктивность L не зависит от силы тока ($L = \text{const}$), то

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

Знак минус - E всегда стремится воспрепятствовать изменению силы тока (правило Ленца). ЭДС противодействует току, когда он увеличивается и поддерживает ток, когда он уменьшается. В явлениях самоиндукции ток обладает «инерцией».

ЭДС САМОИНДУКЦИИ

Примеры проявления самоиндукции.

Замыкание и размыкание тока в электрической цепи. По правилу Ленца дополнительные токи, возникающие вследствие самоиндукции, всегда направлены так, чтобы противодействовать изменениям тока в цепи. *Результат:* установление тока при замыкании цепи и убывание тока при размыкании цепи происходят не мгновенно, а постепенно.

САМОИНДУКЦИЯ

Запишем выражение для изменения тока при *размыкании* цепи.

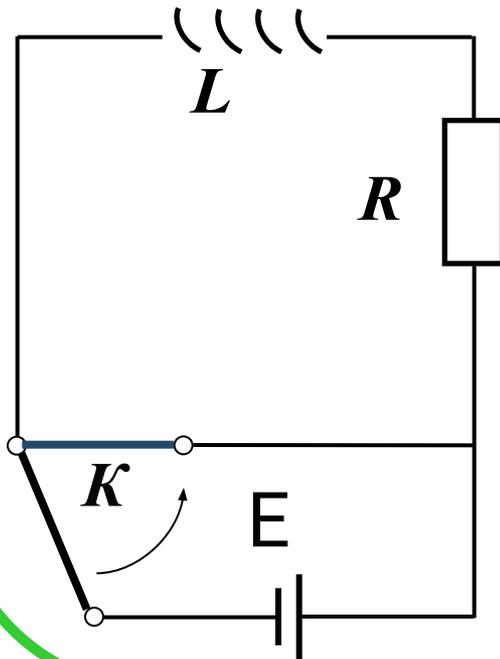
$t = 0$. Ключ отключает источник ЭДС от электрической цепи.

После отключения источника ЭДС сила тока не обращается мгновенно в нуль, а уменьшается по экспоненциальному закону:

$$I = I_0 \exp\left(-\frac{R}{L}t\right)$$

I_0 - исходный ток в электрической цепи.

Скорость убывания силы тока определяется величиной $\tau = L/R$ - *постоянной времени* цепи.



Итог:

$$I = I_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)$$

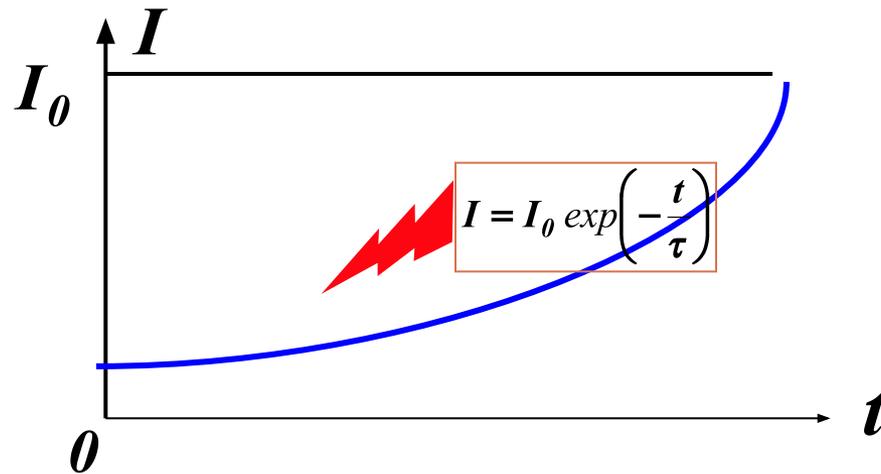
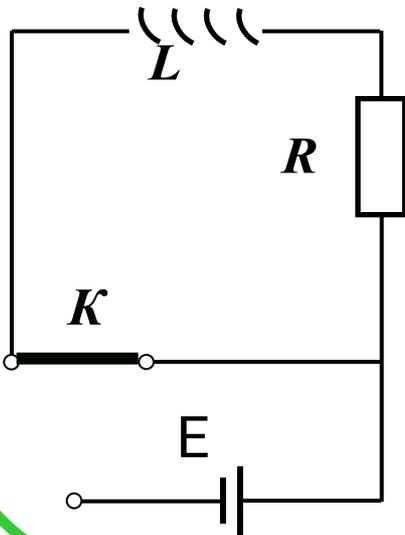
САМОИНДУКЦИЯ

$$I = I_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)$$

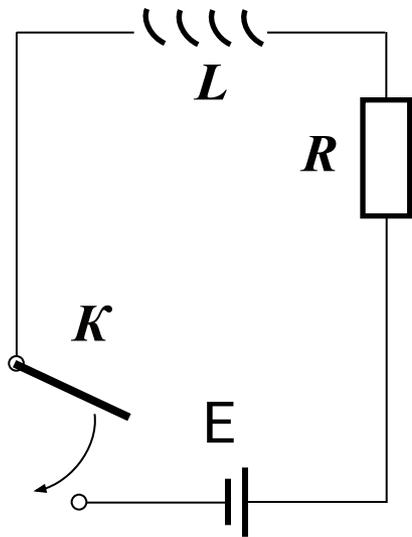
τ - это время, в течение которого сила тока уменьшается в e раз.

Чем больше индуктивность цепи L и меньше сопротивление R , тем больше постоянная времени τ и тем медленнее спадает ток в цепи.

График убывания тока:



САМОИНДУКЦИЯ



Обратный процесс – *подключение* источника ЭДС к электрической цепи, содержащей индуктивность.

Ток в цепи начнет нарастать, возникнет ЭДС самоиндукции, препятствующая мгновенному нарастанию тока. Быстрота установления тока определяется той же постоянной времени τ .

Функция, описывающая нарастание тока, выглядит так:

$$I = I_0 \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right]$$

График:

