

***Токи при замыкании и
размыкании цепи.
Энергия магнитного
поля.***

Лекция №8

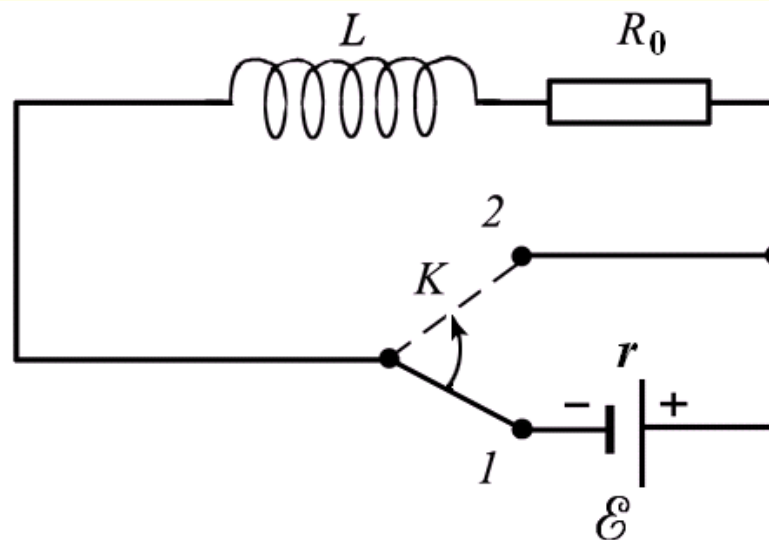


Содержание лекции:

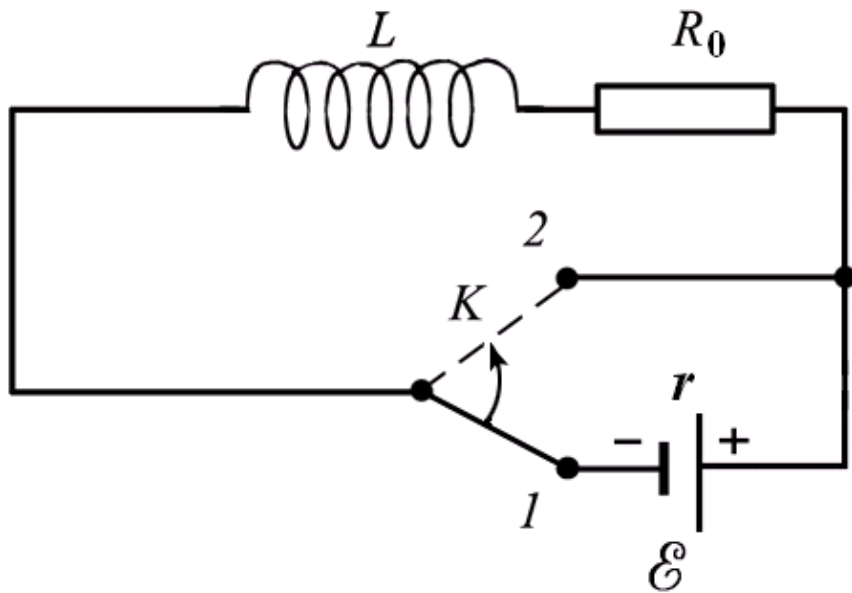
- ***Токи при замыкании и размыкании***
- ***Взаимная индукция***
- ***Трансформатор***
- ***Скин-эффект***
- ***Энергия магнитного поля***
- ***Магнитное поле в веществе***

Токи при замыкании и размыкании цепи

По правилу Ленца при включении и выключении тока в цепи, содержащей индуктивность L , возникает ток самоиндукции I_S , который направлен так, чтобы препятствовать изменению тока I в цепи.



Токи при размыкании цепи



Ключ K в положении 1:

$$I_0 = \frac{\mathcal{E}}{R}, \quad R = R_0 + r.$$

Ключ K в положении 2
(размыкание цепи):

Возникает \mathcal{E}_S и

обусловленный ею ток

r обычно мало и $R \approx R_0$

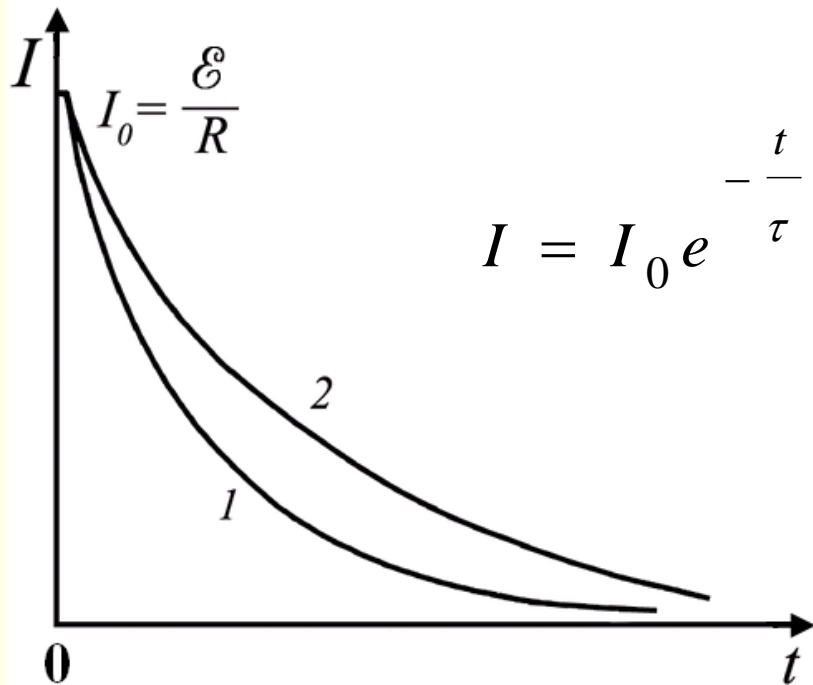
$$I_S = \frac{\mathcal{E}_S}{R} = -\frac{1}{R} L \frac{dI}{dt} \quad \Rightarrow \quad \int_{I_0}^I \frac{dI}{I} = \int_0^t -\frac{R}{L} dt \quad \Rightarrow$$

$$\ln I \Big|_{I_0}^I = -\frac{R}{L} t \quad \Rightarrow \quad I = I_0 e^{-\frac{R}{L} t}.$$

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

- постоянная, называемая **временем релаксации** – время, в течение которого сила тока I уменьшается в e раз.

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



Чем больше L , тем больше τ , и тем медленнее уменьшается ток I .

На рисунке $\tau_2 > \tau_1$.

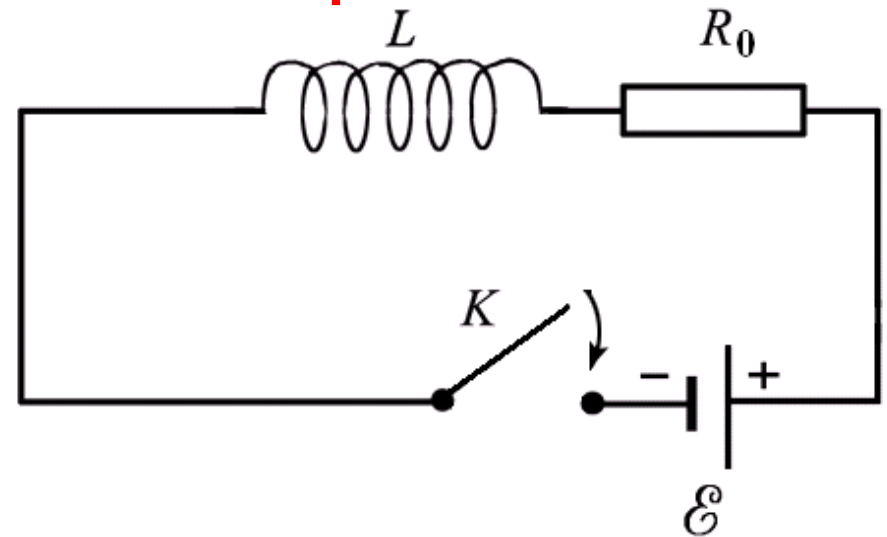
Токи при замыкании цепи

При замыкании цепи

помимо внешней э.д.с. \mathcal{E}

возникает э.д.с.

самоиндукции \mathcal{E}_S .



$$I = \frac{\mathcal{E} + \mathcal{E}_S}{R} = \frac{\mathcal{E} - L \frac{dI}{dt}}{R} = \underbrace{I_0}_{\mathcal{E}/R} - \frac{L}{R} \frac{dI}{dt} \quad \Rightarrow \quad \frac{dI}{I - I_0} = -\frac{R}{L} dt$$

Замена переменных : $I - \underbrace{I_0}_{const} = \underbrace{a}_{переменная} \Rightarrow dI = da$

$$\int_{a_0}^a \frac{da}{a} = \int_0^t -\frac{1}{\tau} dt \quad \Rightarrow$$

$$\int_{a_0}^a \frac{da}{a} = \int_0^t -\frac{1}{\tau} dt$$

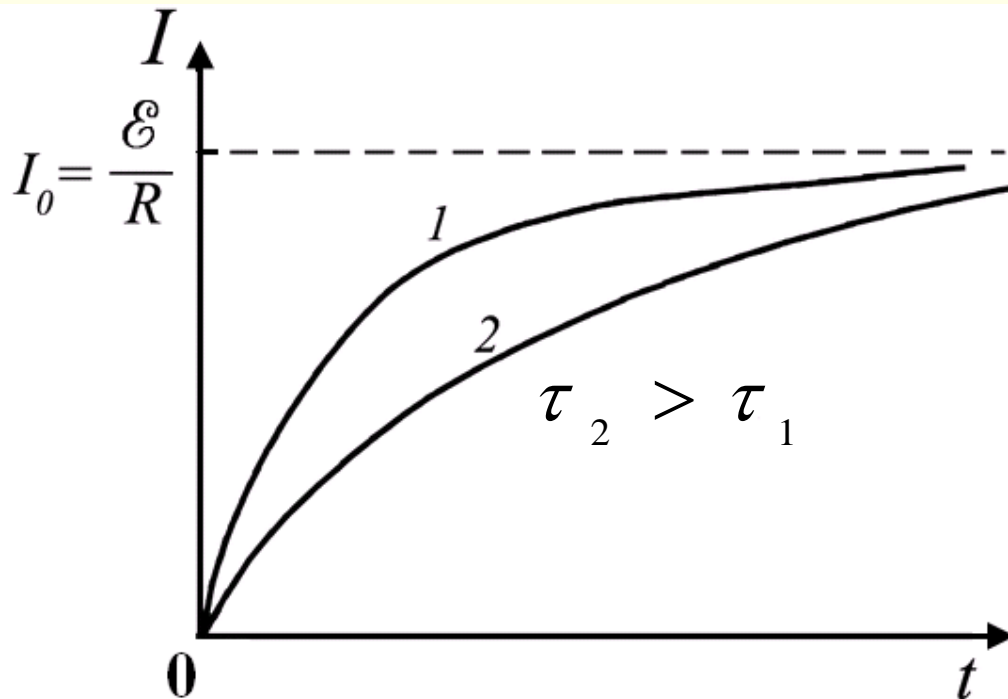
В момент замыкания $t = 0$ сила тока $I = 0$,
переменная $a_0 = -I_0$, в момент времени t сила тока
 I , переменная $a = I - I_0$

$$\ln a \Big|_{a_0}^a = -\frac{t}{\tau} \Big|_0^t \Rightarrow \ln (I - I_0) \Big|_0^I = -\frac{t}{\tau} \Rightarrow$$

$$\ln \frac{I - I_0}{-I_0} = -\frac{t}{\tau} \Rightarrow \frac{I - I_0}{-I_0} = e^{-\frac{t}{\tau}} \Rightarrow$$

$$I - I_0 = -I_0 e^{-\frac{t}{\tau}}; I = I_0 - I_0 e^{-\frac{t}{\tau}} = I_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right).$$

$$I = I_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right).$$



I_0 – установившийся
ТОК.

$$I_0 = \frac{\mathcal{E}}{R}$$

Установление тока
происходит тем
быстрее, чем меньше L
цепи и больше её
сопротивление R

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

- Мгновенное увеличение сопротивления цепи от R_0 до R .

Установившийся ток был $I_0 = \frac{\mathcal{E}}{R_0}$.

При *отключении источника Э.Д.С.*

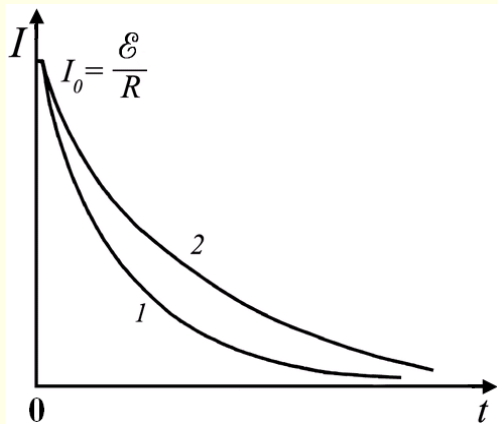
(размыкание цепи) ток изменяется

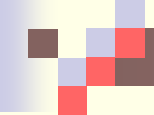
по закону

$$I = I_0 e^{-\frac{R}{L}t} = \frac{\mathcal{E}}{R_0} e^{-\frac{R}{L}t}.$$

Величина Э.Д.С. самоиндукции

$$\mathcal{E}_s = -L \frac{dI}{dt} = \frac{\mathcal{E}}{R_0} \frac{LR}{L} e^{-\frac{R}{L}t} = \frac{R}{R_0} \mathcal{E} e^{-\frac{R}{L}t}.$$



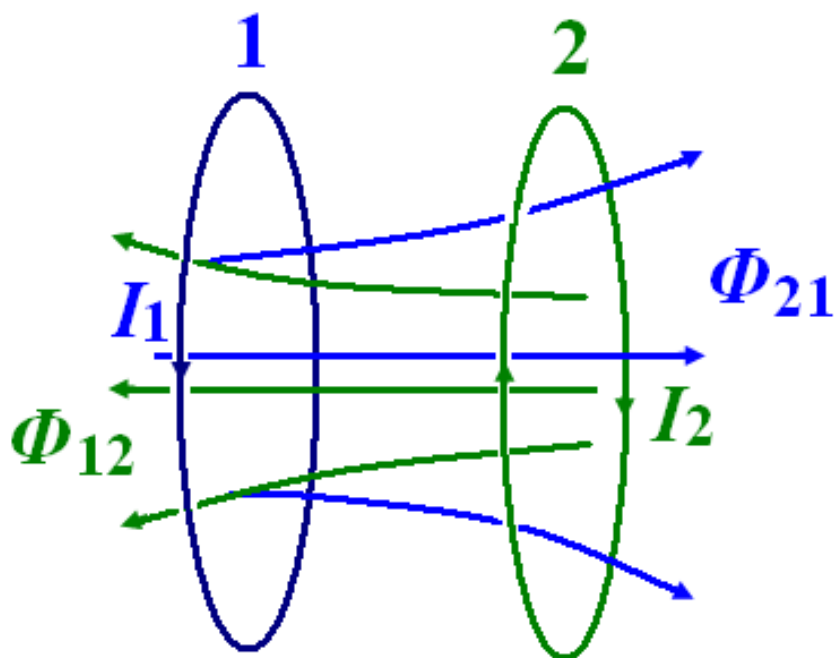

$$\mathcal{E}_s = \frac{R}{R_0} \mathcal{E} e^{-\frac{R}{L}t}.$$

- Если цепь переключается на очень большое внешнее сопротивление R , например, происходит разрыв цепи ($R \gg R_0$), то \mathcal{E}_s может стать огромным и образуется вольтова дуга между разомкнутыми концами выключателя
- В цепи, обладающей большой индуктивностью, \mathcal{E}_s может оказаться больше э.д.с. источника \mathcal{E} , включенного в цепь, что может привести к пробое изоляции и выходу из строя оборудования.

Поэтому сопротивление в контур надо вносить постепенно, уменьшая величину отношения dI/dt .

Взаимная индукция

Два контура.



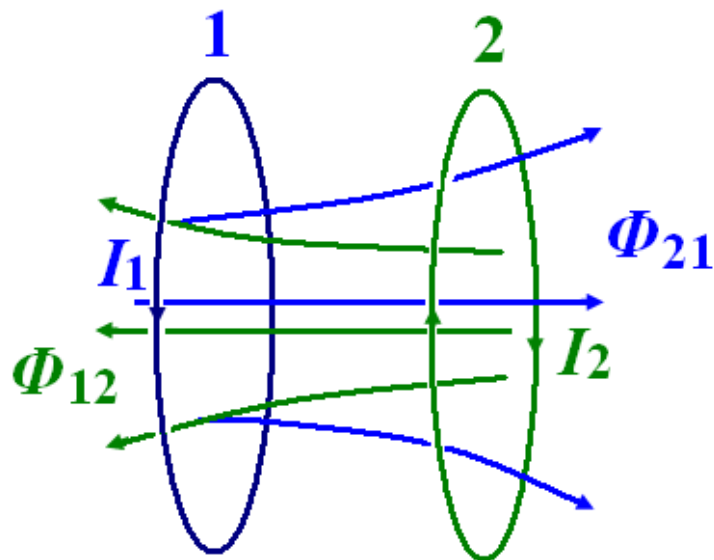
Магнитный поток, образованный контуром 1, пронизывает контур 2:

$$\Phi_{21} = L_{21} I_1,$$

L_{21} – коэффициент пропорциональности.

Если I_1 изменяется, то в контуре 2 индуцируется Э.д.с.

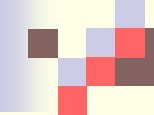
$$\mathcal{E}_{i2} = - \frac{d\Phi_{21}}{dt} = -L_{21} \frac{dI_1}{dt}.$$



Аналогично, если в контуре 2 изменяется I_2 , то в первом контуре изменение магнитного потока индуцирует э.д.с.:

$$\mathcal{E}_{i1} = - \frac{d\Phi_{12}}{dt} = -L_{12} \frac{dI_2}{dt}.$$

Явление возникновения э.д.с. в одном из контуров при изменении силы тока в другом называется ***взаимной индукцией***.



Коэффициенты $L_{12} = L_{21}$ – *взаимная индуктивность* контуров зависит от

1. геометрической формы,
2. размеров,
3. взаимного расположения,
4. магнитной проницаемости среды μ .

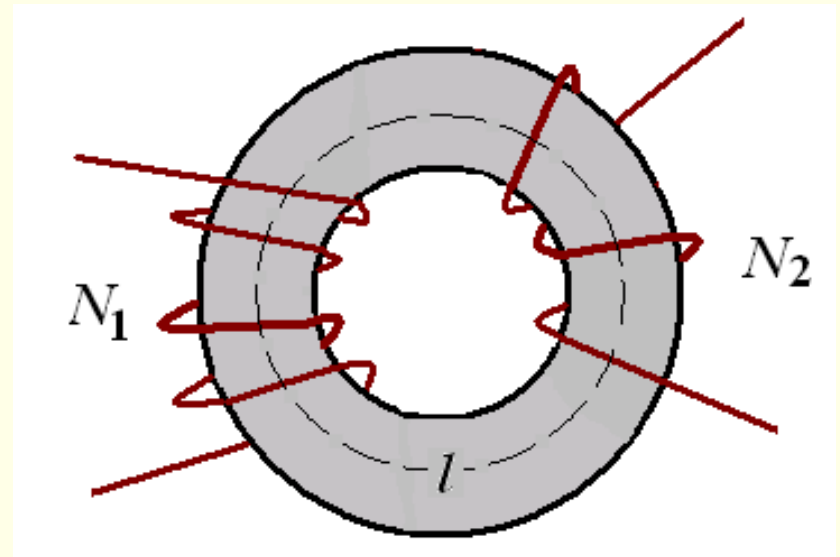
Для двух катушек на общем тороидальном сердечнике

$$L_{12} = L_{21} = \mu\mu_0 \frac{N_1 N_2 S}{l},$$

N_1, N_2 – число витков первого и второго контура, соответствен,

l – длина сердечника (тороида) по средней линии,

S – сечение сердечника.



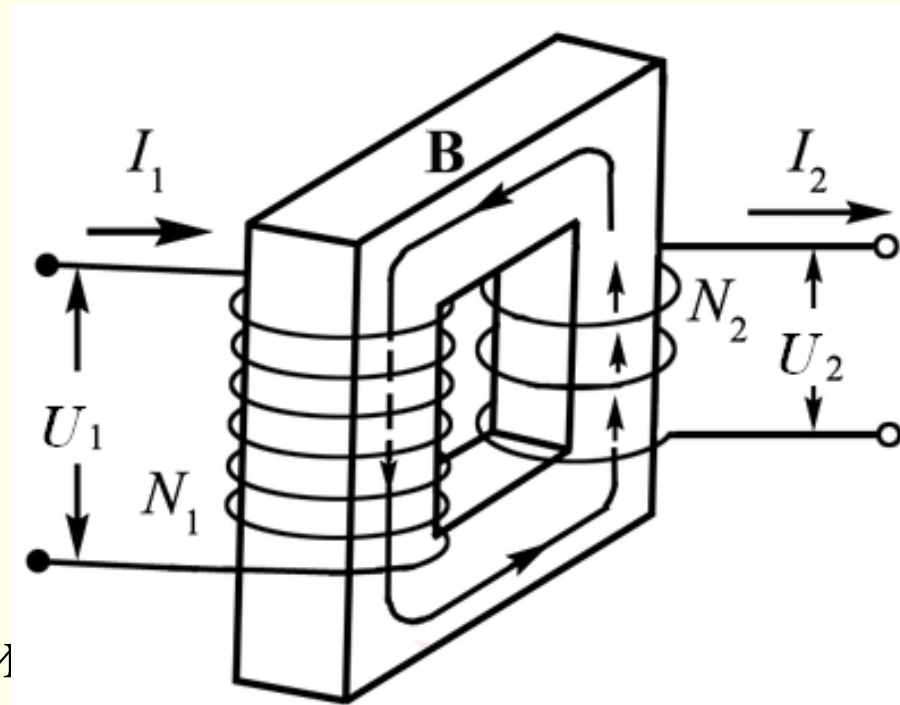
Трансформатор

– устройство, состоящее из двух и более катушек, намотанных на один общий сердечник.

Служат для повышения или понижения напряжения переменного тока:

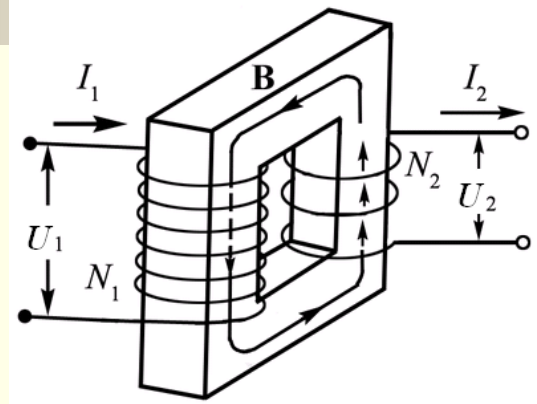
$$\frac{\mathcal{E}_2}{\mathcal{E}_1} = \frac{N_2}{N_1} = K$$

коэффициент трансформации



$K > 1$ – повышающий трансформатор.

$K < 1$ – понижающий трансформатор.



Конструктивно трансформаторы выполняют так, что магнитное поле почти полностью сосредоточено в сердечнике.

В большинстве трансформаторов вторичная обмотка наматывается поверх первичной обмотки.

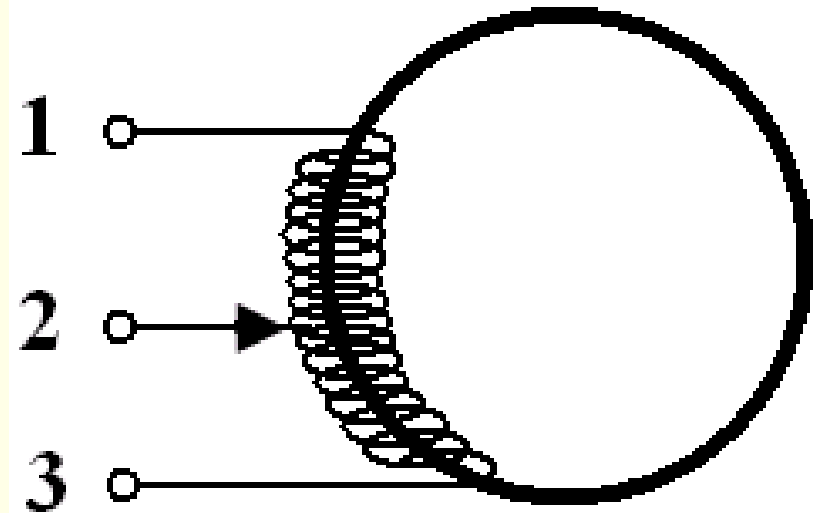
Автотрансформатор – трансформатор, состоящий из одной обмотки.

Повышающий:

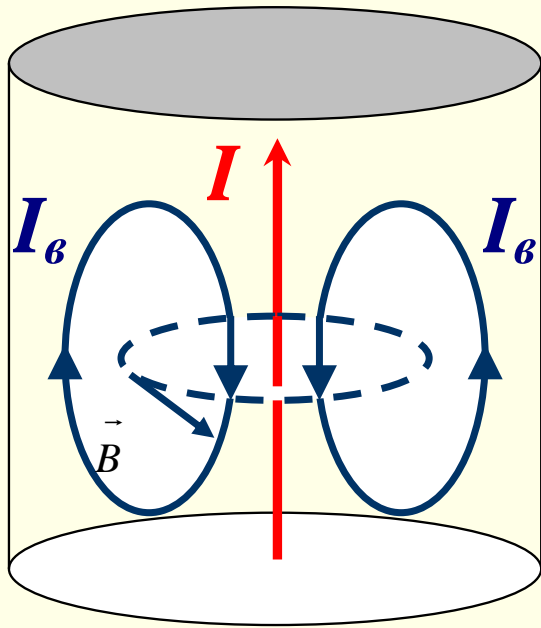
1-2 U подводится,
1-3 U снимается.

Понижающий:

1-3 U подводится,
1-2 U снимается.



Скин-эффект



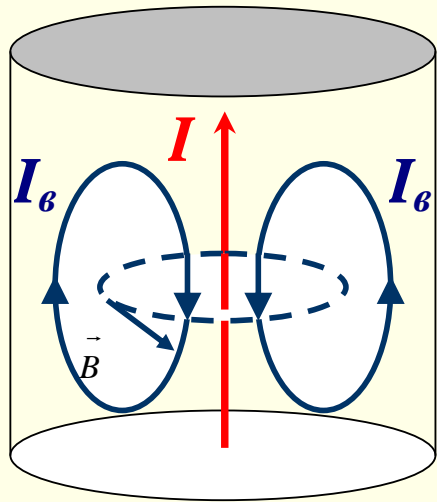
$$dI/dt > 0$$

цилиндрического проводника.

По правилу Ленца, вихревые токи препятствуют изменению основного тока внутри проводника и способствуют его изменению вблизи поверхности.

При прохождении переменного тока по проводнику внутри проводника магнитное поле изменяется. Изменяющееся во времени магнитное поле порождает в проводнике **вихревые токи самоиндукции**.

Плоскости вихревых токов в случае проводника проходят через ось

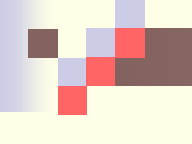


$$dI/dt > 0$$

Следовательно, для переменного тока сопротивление внутри проводника больше сопротивления на поверхности ($R_{\text{внутри}} > R_{\text{поверх}}$).

По этой причине плотность переменного тока неодинакова по сечению: j_{max} на поверхности, j_{min} внутри на оси.

Это явление называется *скин-эффектом*.



Следствием *скин-эффекта* является то, что ВЧ - токи текут по тонкому поверхностному слою, поэтому проводники для ВЧ - токов делают полыми, а часть внешней поверхности покрывают серебром. Применение: метод поверхностной закалки металлов, у которых при нагреве токами высокой частоты происходит разогрев только поверхностного слоя. Это позволяет получить изделия с высокой стойкостью к истиранию поверхности, но не обладающие хрупкостью, как при обычной закалке.

Энергия магнитного поля электрического тока

При возрастании тока в контуре возникает э.д.с самоиндукции, противодействующая увеличению тока.

$$IR = \varepsilon - L \frac{dI}{dt}$$

Отсюда: $\varepsilon = IR + L \left(\frac{dI}{dt} \right)$

Работа источника за время dt :

$$\mathcal{E} I dt = I^2 R dt + L I dI$$

Здесь первое слагаемое – обычная ленц-джоулева работа, расходуемая на нагревание проводника. Второе – дополнительная работа A , затрачиваемая на увеличение тока в контуре от 0 до I :

$$A = \int_0^I L I dI = \frac{L I^2}{2}$$

Энергия магнитного поля равна работе, которая затрачивается током на создание этого поля.

Работа, обусловленная индукционными явлениями

$$\frac{LI^2}{2} \quad - \text{собственная энергия тока } I \text{ в контуре с индуктивностью } L.$$

Увеличение тока в проводнике вызывает соответствующее усиление магнитного поля, обладающего энергией. Собственная энергия тока в контуре – есть *энергия магнитного поля* этого контура с током.

В случае однородного магнитного поля длинного соленоида индуктивностью

$$L = \mu\mu_0 \left(\frac{N}{l} \right)^2 V$$

где V – объем поля соленоида, получим:

$$B = \mu\mu_0 nI \quad \Rightarrow \quad I = \frac{B}{\mu\mu_0} \frac{1}{n}$$

Подставляя значения L и I , найдем энергию магнитного поля длинного соленоида:

$$W_m = \frac{LI^2}{2} = \frac{B^2}{2\mu\mu_0} V$$

Т.к. рассматриваемое поле – однородно, оно распределено по объему V равномерно с объемной плотностью

$$\omega_m = \frac{W_m}{V} = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu\mu_0}$$

С учетом связи **B** и **H**:

$$\omega_m = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu\mu_0} = \frac{1}{2} BH = \frac{1}{2} \mu\mu_0 H^2$$

Для *анизотропной* среды:

$$\omega_m = \frac{1}{2} BH$$

Магнитное поле в веществе

*Экспериментальные исследования показали,
что:*

все известные вещества проявляют в магнитном поле магнитные свойства и являются *магнетиками*.

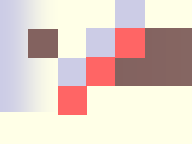
Разнообразие типов магнетиков обусловлено различием магнитных свойств микрочастиц, образующих вещество, особенностями их взаимодействий, фазовыми состояниями вещества и другими факторами.

Типы магнетиков

B – индукция магнитного поля в веществе,

B_0 – индукция магнитного поля в вакууме

- Если магнитное поле **слабо усиливается** в веществе ($B/B_0 > 1$), то такое вещество называется **парамагнетиком** (Ce^{3+} , Ti^{3+} , Na, Li).
- Если **ослабевает** ($B/B_0 < 1$), то это **диамагнетик** (Bi, Cu, Ag, Au).
- Вещества, способные сохранять магнитные свойства и в **отсутствии** внешнего магнитного поля, представляя собой постоянные магниты – **ферромагнетики** (Fe, Co, Ni).




Диамagnetизм (от греч. *dia* – расхождение и *магнетизм*) – свойство веществ намагничиваться навстречу приложенному магнитному полю.

Парамагнетизм (от греч. *para* – возле, рядом и *магнетизм*) – свойство веществ во внешнем магнитном поле намагничиваться в направлении этого поля, поэтому внутри парамагнетика к действию внешнего поля прибавляется действие наведенного внутреннего поля.

Ферромагнетизм

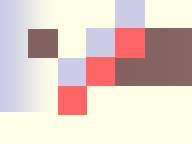
Ферромагнетики – такие вещества, в которых внутреннее (собственное) магнитное поле может в сотни тысяч раз превышать вызвавшее его внешнее магнитное поле.

В отсутствие внешнего магнитного поля в ферромагнитных материалах существуют области со спонтанной намагниченностью – **домены** (от французского *domaine* – владение, область, среда).



Векторы магнитного поля отдельных доменов ориентированы так, что суммарный магнитный момент равен нулю.

Во внешнем магнитном поле домены выстраиваются по направлению магнитного поля. Поле в веществе резко усиливается, это еще сильнее заставляет ориентироваться домены, и магнитное поле в ферромагнетиках резко возрастает.



Существенное отличие ферромагнетиков от диа- и парамагнетиков – наличие у ферромагнетиков самопроизвольной (спонтанной) намагниченности в отсутствие внешнего магнитного поля.

Ферромагнитные свойства материалов проявляются только у веществ в твердом состоянии, атомы которых обладают постоянным спиновым или орбитальным магнитным моментом.

Намагниченность

Магнитные свойства вещества характеризуются средним магнитным моментом единицы объема – *намагниченностью*.

$$J = \frac{\sum \mathbf{P}_m}{V}$$

Здесь \mathbf{P}_m – вектор магнитного момента атомов, заключенных в объеме V_m ; V – величина всего объема:

$$V = \sum_m V_m$$

Единицей измерения вектора \mathbf{J} – намагниченности - в СИ является ампер, деленный на метр:

$$[J] = \frac{[p]}{[V]} = \frac{[A \cdot m^2]}{[m^3]} = \frac{[A]}{[m]}$$