

ЛЕКЦИЯ 3

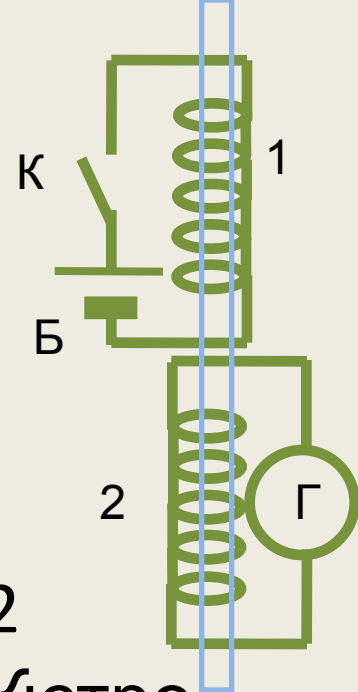
ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ

В 1824 году французом Араго было обнаружено, что колебания свободно подвешенной магнитной стрелки затухают значительно быстрее, если под ними находится магнитная пластина. Более поздние опыты показали, что при быстром вращении медной пластины, расположенная над ней магнитная стрелка начинает колебаться в том же направлении.

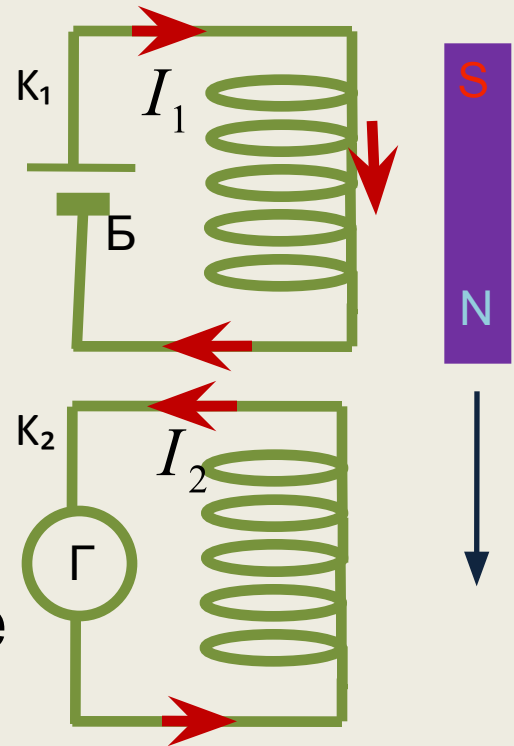
Объяснение этому было дано англичанином Фарадеем (1831). Он исходил из того что электрическое и магнитное поля взаимосвязаны, и если вокруг проводника с электрическим током возникает магнитное, то справедливо и обратное:

ВОЗНИКНОВЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА В ЗАМКНУТОМ ПРОВОДНИКЕ, ПОД ДЕЙСТВИЕМ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Фарадей провел ряд опытов. На немагнитный стержень намотаны два куска медного про-вода. Один(1) подсоединен к батарее Б вто-рой (2)к гальванометру Г. При постоянном токе в проводе 1 стрелка гальванометра не отклоняется,и это значит, тока в проводе 2 нет. При размыкании и замыкании ключа К стрелка гальванометра отклонялась и быстро возвращалась в исходное положение, что показывало возникновение в цепи 2 кратковременного тока наз-ванного **ИНДУКЦИОННЫМ ТОКОМ**. Направление этого тока при размыкании и замыкании ключа было проти-воположным. Было неясным, что является причиной возникновения индукционного тока: изменение ис-ходного тока или магнитного поля.



Если к катушке K_2 с гальванометром Γ подвести катушку K_1 с батареей $Б$ создающей ток I_1 , то в K_2 возникнет ток I_2 . При удалении катушки K_1 от K_2 ток I_2 возникает, но направлен противоположно.



Индукционный ток возникает, так же если к катушке с гальванометром подвести магнит и перемещать его вдоль катушки. Направление индукционного тока зависит от того ка-ким концом был обращен магнит к катушке, и от того приближался ли он или удалялся.

I_2

Причиной появления индукционного тока является изменение магнитного поля

ЗАКОН ФАРАДЕЯ

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ

Открытое Фарадеем явление получило название :

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ –
возникновение электродвижущей силы в
проводнике движущемся в магнитном поле, или в
замкнутом проводящем конту-ре при изменении
его потокосцепления. (вследствие движения
контура в магнитном поле или изменения самого
поля).

Возникновение индукционного тока в цепи указывает на наличие в цепи электродвижущей силы (ЭДС), называ-емой электродвижущей силой электромагнитной индукции (ЭДС индукции).

Значение индукционного тока, а значит и ЭДС индукции определяются только скоростью

ЗАКОН ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ ФАРАДЕЯ

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

Закон универсален E_i не зависит от способа изменения магнитного потока.

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

ОСНОВНОЙ ЗАКОН ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ

Единица измерения E_i

$$\left[\frac{V}{dt} \right] = \frac{V}{c} = \frac{V \cdot m^2}{c} = \frac{V \cdot m^2}{A \cdot m \cdot c} = \frac{V \cdot m}{A \cdot c} = \frac{A \cdot B \cdot c}{A \cdot c} = B$$

ПРАВИЛО ЛЕНЦА

Знак «-» – показывает что увеличение потока $d\Phi/dt > 0$ вызывает ЭДС индукции меньше нуля $d\Phi/dt > 0 \Rightarrow E_i < 0$ то есть поле индукционного тока направлено навстречу потоку, и наоборот, $E_i > 0$ то есть направление потока и поля индуцированного тока совпали.

Знак «-» – математическое выражение **ПРАВИЛА ЛЕНЦА** – общего правила для нахождения направления индукционного тока.

Индукционный ток в контуре всегда имеет такое направление, что создаваемое им магнитное поле препятствует изменению магнитного потока вызвавшего этот индукционный ток.

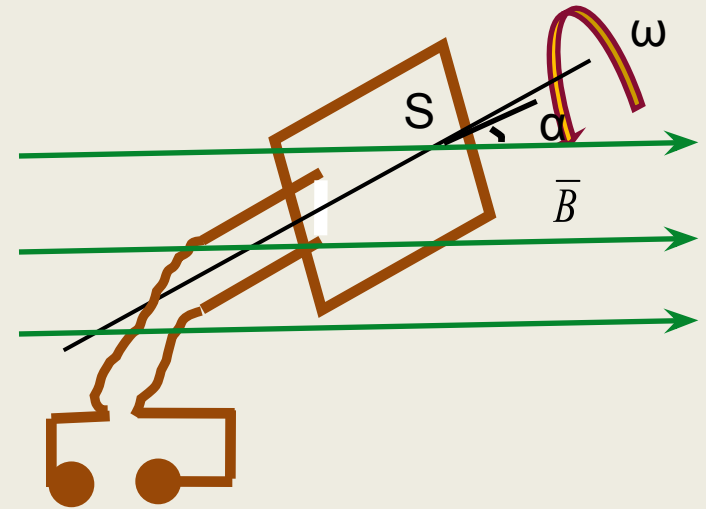
Для объяснения возникновения ЭДС индукции в неподвижных проводниках Максвелл предположил, что всякое переменное магнитное поле возбуждает в окружающем пространстве электрическое поле, которое и является причиной возникновения индукционного тока в проводнике.

Циркуляция вектора напряженности этого поля по любому неподвижному контуру представляет собой ЭДС электромагнитной индукции.

$$E_i = \oint_{\bar{L}} \bar{E}_B dl = - \frac{d\Phi}{dt}$$

ВРАЩЕНИЕ РАМКИ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Пусть рамка равномерно вращается с угловой скоростью $\omega = \text{const}$ в однородном магнитном поле с индукцией B .



Магнитный поток сцепленный с рамкой в любой момент

$$\Phi = B_n S = BS \cos \alpha = BS \cos \omega t$$

$\alpha = \omega t$ — угол поворота рамки в момент времени t .

При вращении рамки в ней будет возникать ЭДС индукции $\mathcal{E} = -d\Phi/dt = BS\omega \sin \omega t$ изменяющаяся по гармо-ническому закону.

$$\mathcal{E}_{i \max} = BS\omega \Rightarrow \mathcal{E}_i = \mathcal{E}_{i \max} \sin \omega t$$

Если в однородном магнитном поле вращается рамка, то в ней возникает переменная ЭДС изменяющаяся по гармоническому закону.

Явление электромагнитной индукции явилось основой, на базе которой были созданы электрические двига-тели, генераторы и трансформаторы.

ГЕНЕРАТОРЫ – применяются для преобразования одного вида энергии в другой.

Простейший генератор, преобразующий механическую энергию в энергию электрического поля – рассмотрен-ная выше рамка вращающаяся в однородном магнит-ном поле. Процесс преобразования механической энергии в электрическую **обратим**. На этом принципе

ВИХРЕВЫЕ ТОКИ (ТОКИ ФУКО)

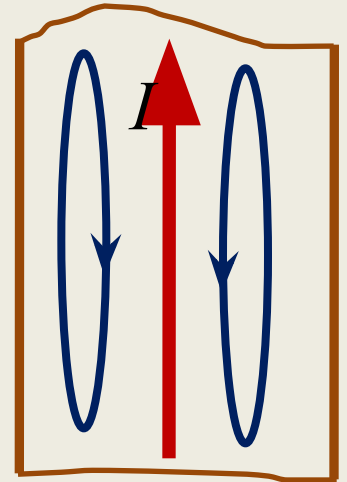
Индукционный ток возникает не только в тонких проводах, но и в массивных сплошных проводниках помещенных в переменное магнитное поле. Эти токи оказываются замкнутыми в толще проводника и называются **вихревыми** или **токами Фуко**.

Токи Фуко подчиняются правилу Ленца: их магнитное поле направлено так, чтобы противодействовать изменению магнитного потока индуцирующего вихревые токи.

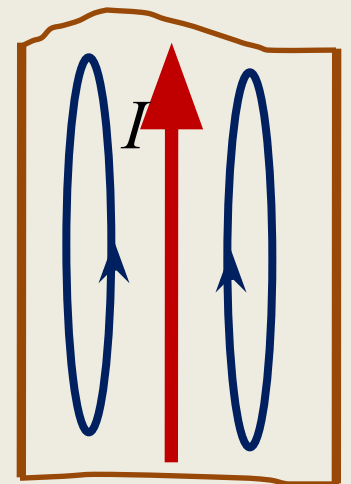
Вихревые токи возникают в проводах по которым течет переменный ток.

Направление токов Фуко можно

$$\frac{dI}{dt} > 0$$



$$\frac{dI}{dt} < 0$$



лить по правилу Ленца: если первичный ток увеличивается () то токи Фуко направлены против направления , а если уменьшается () то по направлению.

Направление вихревых токов таково, что они препятствуют изменению первичного тока внутри проводника и способствуют его изменению вблизи поверхности. Это проявления **скин-эффекта** или **поверхностного эффекта**.

Так как токи высокой частоты практически текут в тонком поверхностном слое, то провода для них делают полыми.

ИНДУКТИВНОСТЬ КОНТУРА
САМОИНДУКЦИЯ
ВЗАИМНАЯ ИНДУКЦИЯ
ТРАНСФОРМАТОРЫ

ИНДУКТИВНОСТЬ. САМОИНДУКЦИЯ

Электрический ток текущий в контуре создает вокруг себя электромагнитное поле, индукция которого пропорциональна току. Поэтому, сцепленный с контуром магнитный поток пропорционален току в контуре.

$$\Phi = LI$$

L
– **индуктивность контура** (коэффициент индукции)

При изменении силы тока в контуре будет изменяться так же и сцепленный с ним магнитный поток, а значит в контуре будет индуцироваться ЭДС.

Возникновение ЭДС индукции в проводящем контуре, при изменении в нем силы тока называется – **САМОИНДУКЦИЕЙ**

Единица измерения индуктивности – Генри (Гн).

1 Гн – индуктивность такого контура, магнитный поток самоиндукции которого при токе 1 А равен 1 Вб.

Для бесконечно длинного соленоида полный магнит-ный поток (потокосцепление) будет равен:

$$\psi = N\Phi = \mu\mu_0 \frac{N^2 I}{l} S$$

Значит, индуктивность бесконечно длинного контура:

$$L = \mu\mu_0 \frac{N^2}{l} S$$

Индуктивность соленоида зависит от числа витков N , длины l , площади соленоида S и магнитной проницаемости вещества из которого

ЭДС САМОИНДУКЦИИ

Индуктивность контура зависит в общем случае только от геометрической формы, размеров и магнитной проницаемости окружающей среды контура, и, можно сказать, что индуктивность контура это аналог электрической емкости уединенного проводника. Применяя к контуру закон Фарадея ($E_i = d\Phi/dt$) самоиндукции закон Фарадея ($E_s = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d}{dt}(LI) = -\left(L\frac{dI}{dt} + I\frac{dL}{dt}\right)$) получим:

Если контур не деформируется ($L = \text{const}$), и магнитная проницаемость окружающей среды не изменяется следовательно:

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

Знак «-» показывает, что наличие индуктивности в контуре приводит к замедлению изменения тока в нём.

$$E_s < 0 \text{ и } dI/dt > 0$$

Если со временем ток возрастает, то то есть ток самоиндукции направлен навстречу току, обусловленному внешним источником, и тормозит его возрастание. $E_s > 0$ и $dI/dt < 0$

Если со временем ток убывает, то индукционный ток имеет такое же направление, как и убывающий ток в контуре и замедляет его убывание.

Контур обладая определенной индуктивностью приобретает электрическую инертность: любое изменение тока тормозится тем сильнее, чем больше индуктивность контура.

ТОКИ ПРИ РАЗМЫКАНИИ И ЗАМЫКАНИИ

ЦЕПИ

При всяком изменении силы тока в проводящем контуре возникает ЭДС самоиндукции, в результате чего в контуре возникают дополнительные токи называемые ЭКСТРАТОКАМИ САМОИНДУКЦИИ. Согласно правилу Ленца, они всегда направлены так, чтобы препятствовать изменению тока в цепи.

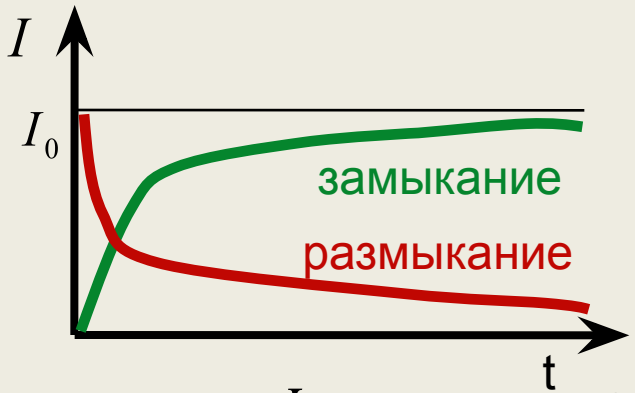
Рассмотрим цепь, имеющую источник тока (противоположно току от источника тока), ЭДС $\mathcal{E}$, резистор сопротивления R , катушку индуктивности L . Под действием внешней ЭДС в цепи течет постоянный ток $I = \mathcal{E}/R$.



В момент времени $t=0$ отключили источник тока. Ток через катушку станет уменьшаться. Что вызовет появление ЭДС самоиндукции $\mathcal{E}_{\text{самоиндукции}} = L \frac{dI}{dt}$.

по правилу Ленца уменьшению тока. В каждый момент времени ток определяется

законом Ома:
$$-L \frac{dI}{dt} \Rightarrow \frac{dI}{I} = -\frac{R}{L} dt$$



Интегрируя это выражение по I (изменяя от I_0 до I) и по t (изменяя от 0 до t) получим:

$$\ln \frac{I}{I_0} = -\frac{Rt}{L}$$

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

Ток в момент времени t после выключения источника.

$\tau = \frac{L}{R}$ постоянная **время релаксации** (время за которое сила тока убывает в e раз).

Чем больше индуктивность цепи и меньше

ется ток в цепи при размыкании.

При замыкании цепи помимо внешней ЭДС, возникает ЭДС самоиндукции, препятствующая возрастанию тока. Согласно закону Ома:

$$IR = E + E_s = E - L \frac{dI}{dt}$$

Пусть $u = IR - E \Rightarrow \frac{du}{u} = -\frac{dt}{\tau}$

$$I = 0 \quad u = -E$$

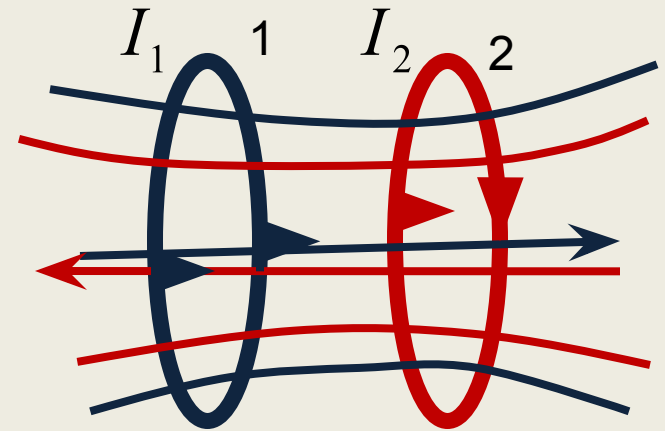
В момент замыкания цепи сила тока I и t значит интегрируя по I (от 0 до I) и по t (от 0 до t) получим

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

Ток в момент времени t после включения. $I_0 = \frac{E}{R}$).

ВЗАИМНАЯ ИНДУКЦИЯ

Рассмотрим два неподвижных контура 1 и 2 расположенных близко друг от друга. В контуре 1 течет ток I_1 и магнитный поток, создаваемый этим контуром, пропор-



Обозначим Φ_{21} ту часть магнитного потока которая пронизывает контур 2. $\Phi_{21} = L_{21} I_1$ (L_{21} — коэффициент пропорциональности).

Если ток I_1 изменяется, то в контуре 2 индуцируется ЭДС, которая по закону Фарадея равна и противоположна по знаку скорости изменения магнитного потока Φ_{21} созданного током в первом контуре и пронизывающий контур 2.

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

Аналогично, при протекании в контуре 2 тока получим:

$$\Phi_{12} = L_{12} I_2$$

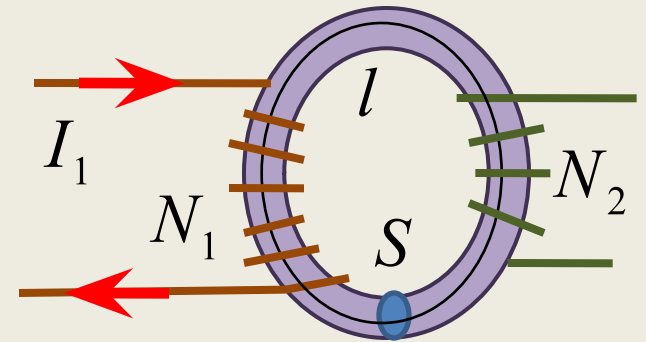
$$\mathcal{E}_{i1} = -\frac{d\Phi_{12}}{dt} = -L_{12} \frac{dI_2}{dt}$$

Явление возникновения ЭДС в одном из контуров, при изменении силы тока в другом называется

ВЗАИМНОЙ ИНДУКЦИЕЙ.

L_{12} и L_{21} – взаимная индуктивность контуров, зависят от геометрической формы размеров, взаимного рас-положения контуров и магнитной проницаемости окружающей среды. Единица измерения – Генри (Гн)

Рассчитаем взаимную индуктивность двух катушек, намотанных на общий тороидальный сердечник.



Магнитная индукция поля, создаваемая первой катушкой, с числом витков N_1 , током I_1 и магнитной проницаемостью сердечника μ длиной l равна:

$$B = \mu\mu_0 \frac{N_1 I_1}{l}$$

Магнитный поток через один виток второй катушки:

$$\Phi_2 = BS = \mu\mu_0 \frac{N_1 I_1}{l} S$$

Полный магнитный поток (потокосцепление) сквозь вторичную обмотку содержащую N_2 витков:

$$\psi = N_2 \Phi_2 = \mu\mu_0 \frac{N_1 N_2}{l} I_1 S$$

Так как потокосцепление создается током I_1 то:

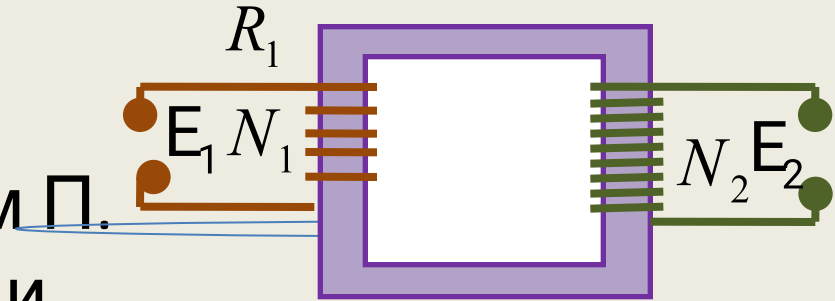
$$L_{21} = \frac{\psi}{I_1} = \mu\mu_0 \frac{N_1 N_2}{l} S$$

Если вычислить магнитный поток создаваемый катушкой 2 сквозь катушку 1, то для L_{12} индуктивности аналогично получим то же самое значение. Значит взаимная индуктивность двух катушек намотанных на общий тороидальный сердечник:

$$L_{12} = L_{21} = \frac{\psi}{I_1} = \mu\mu_0 \frac{N_1 N_2}{l} S$$

ТРАНСФОРМАТОРЫ

Впервые трансформаторы были сконструированы русскими электротехником П. Н. Яблочковым (1847-1894) и физиком И. Ф. Уса-
риным (1855-1919).



Принцип действия трансформаторов, применяемых для повышения или понижения напряжения переменного тока, основан на явлении взаимной индукции.

Пусть первичная и вторичная катушки (обмотки) имеющие соответственно N_1 и N_2 витков укреплены на замкнутом железном сердечнике. Концы первой обмотки прикреплены к источнику ЭДС E_1 , в ней возникает переменный ток I_1 , создающий в сердечнике трансформатора переменный

полностью локализованный в железном сердечнике, а значит, целиком пронизывающий витки вторичной обмотки. Изменение этого потока вызывает во вто-ричной обмотке появление ЭДС взаимной индукции, а в первичной ЭДС самоиндукции.

Ток первичной обмотки определяется с помощью за-кона Ома где $E_1 - \frac{d\Phi(N_1)}{dt} = I_1 R_1$ сопротивление первичной обмотки.

$$I_1 R_1$$

$$R_1$$

Падение напряжения на сопротивлении при быс-тропеременных полях мало, по сравнению с каждой из ЭДС, и можно считать что:

ЭДС взаимной индукции возникающая во вторичной обмотке:

$$E_2 = -\frac{d(N_2\Phi)}{dt} = -N_2 \frac{d\Phi}{dt}$$

Сравнив значения ЭДС взаимной и самоиндукции получим:

$$E_2 = -\frac{N_2}{N_1} E_1$$

E_2 – ЭДС возникающая во второй обмотке, знак «-» показывает, что ЭДС в первой и второй обмотке противо-положны по фазе.

$\frac{N_2}{N_1}$ – коэффициент трансформации, показывает во сколько раз ЭДС во вторичной обмотке больше (меньше) чем в первичной.

Пренебрегая потерями энергии (примерно 2 %), и применяя закон сохранения энергии, можно считать что

$$E_2 I_2 \approx E_1 I_1$$

Следовательно:

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1}$$

$\frac{N_2}{N_1} > 1$ – повышающий трансформатор увеличивающий переменную ЭДС и понижающий ток

$\frac{N_2}{N_1} < 1$ (применяется для передачи электроэнергии на большие расстояния)

– понижающий трансформатор уменьшающий ЭДС и повышающий ток (применяется при электросварке, где требуется большой ток при низком напряжении)