

- **Лекция № 7**
- **Трансформаторы**
- 1. Однофазный трансформатор

# Назначение, устройство и принцип действия трансформаторов

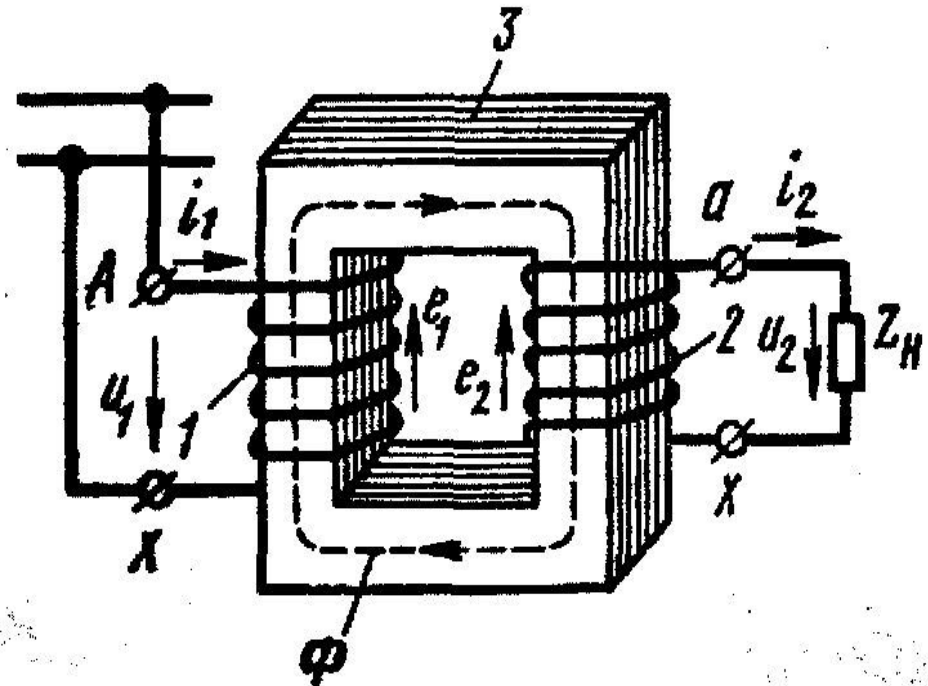
- ***Трансформатором*** называется статическое электромагнитное устройство, предназначенное для преобразования электрической энергии переменного тока одного напряжения в электрическую энергию переменного тока другого напряжения при неизменной частоте.

- Трансформаторы широко используются в промышленности и быту для различных целей. По **назначению** трансформаторы разделяют на **силовые общего** и **специального применения**. Силовые трансформаторы общего применения используются в линиях передачи и распределения электроэнергии. Для режима их работы характерна частота переменного тока 50 Гц и очень малые отклонения первичного и вторичного напряжений от номинальных значений. К трансформаторам **специального назначения** относятся: силовые специальные (печные, выпрямительные, сварочные, радиотрансформаторы), измерительные и испытательные трансформаторы, трансформаторы для преобразования числа фаз, формы кривой ЭДС, частоты и т.д.

- Трансформатор рассчитан на нормальную работу только при определенных значениях частоты, мощности, токов и напряжений, называемых номинальными (указываются на щитке). Номинальная мощность трансформаторов различна. В радиоэлектронных устройствах имеются трансформаторы, мощность которых составляет десятки вольт-ампер. Мощность же одного трехфазного трансформатора для ЛЭП составляет 1 млн. кВА.

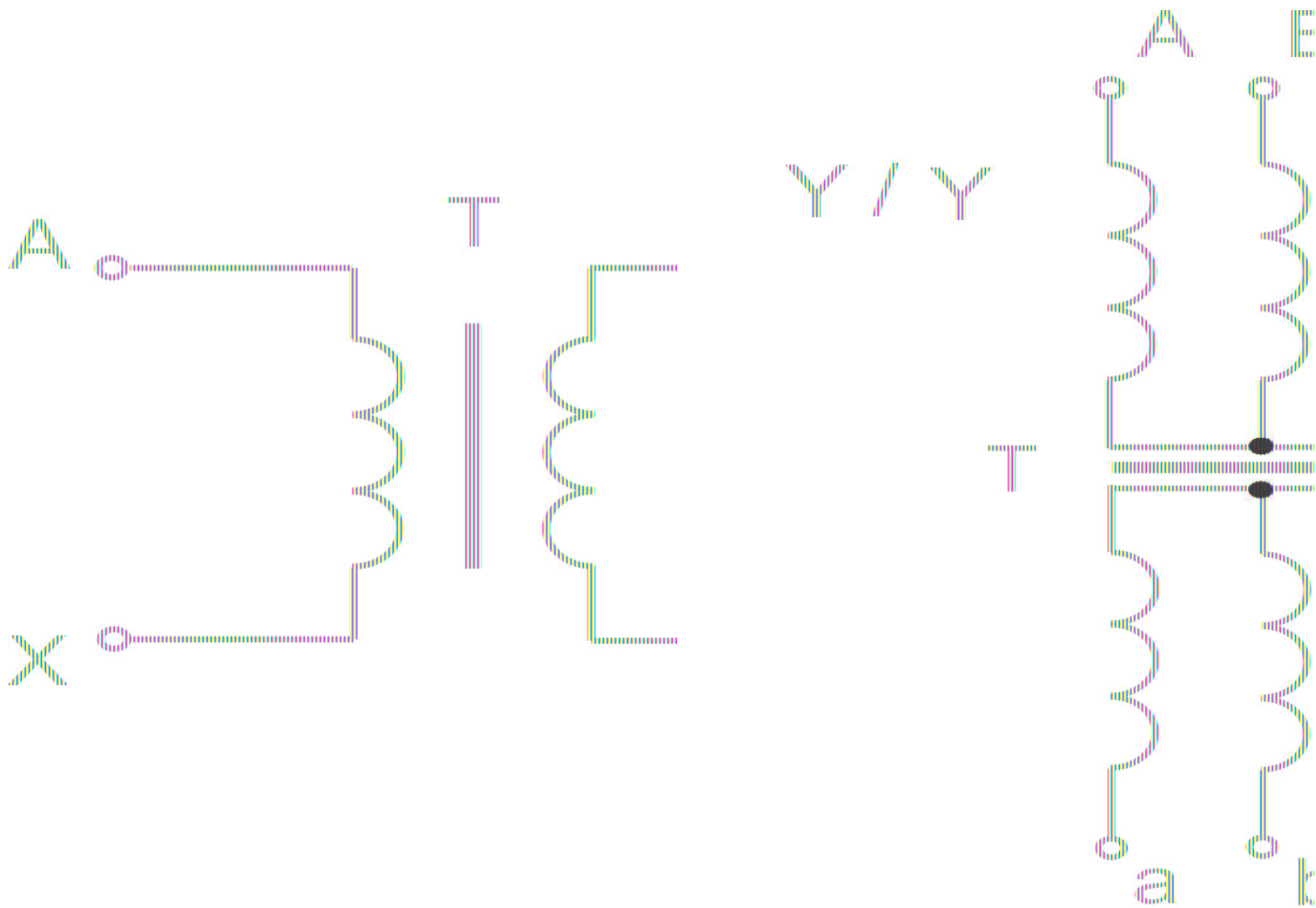
# Однофазный трансформатор: 1– первичная обмотка, 2–вторичная обмотка, 3–магнитопровод

- Основными частями трансформатора являются замкнутый ферромагнитный сердечник (из листовой электротехнической стали) и не менее двух электрически не связанных между собой обмоток. Применение ферромагнитного магнитопровода позволяет усилить электромагнитную связь между обмотками, т.е. уменьшить магнитное сопротивление контура, по которому проходит магнитный поток трансформатора.



- Соответственно все величины, относящиеся к первичной (вторичной), обмотке, называются *первичными (вторичными)* и их буквенные обозначения имеют индекс 1 или 2. Обмотку более высокого напряжения называют обмоткой *высшего напряжения* (ВН), а низкого напряжения — обмоткой *низшего напряжения* (НН). Начала и концы обмотки ВН обозначают буквами **A** и **X**; обмотки НН — буквами **a** и **x**. Если первичное напряжение трансформатора  $U_1$  меньше вторичного  $U_2$ , то трансформатор называют *повышающим*, если больше ( $U_1 > U_2$ ), то — *понижающим*. Различают *однофазные* (для цепей однофазного тока) и *трехфазные* (для трехфазных цепей) трансформаторы.

На рис. показаны условные графические обозначения однофазного, и трехфазного трансформаторов.



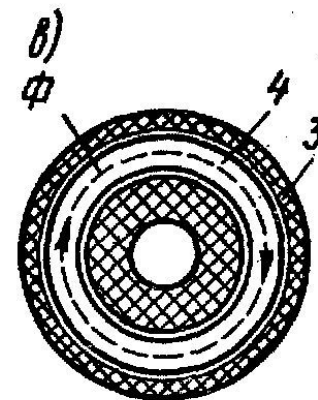
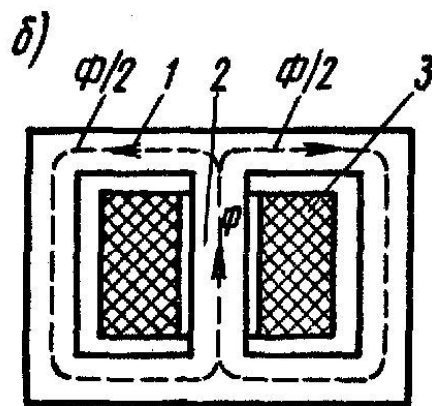
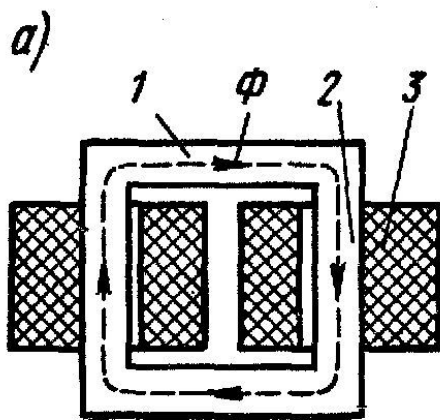
# Паспортные данные

- На щитке трансформатора указываются номинальные значения:  $S_n$  - полной мощности,  $U_{1n}$ ,  $U_{2n}$  - напряжений — высшего и низшего,  $I_{1n}$ ,  $I_{2n}$  токов, частоты, а также число фаз и схема их соединения. Для трансформаторов большей мощности могут быть указаны дополнительные характеристики режима работы (длительный или кратковременный), способ охлаждения и др.



# Магнитная система

- В зависимости от конфигурации магнитной системы, трансформаторы подразделяют на *стержневые* (рис. а), *броневые* (рис. б) и *тороидальные* (рис. в). *Стержнем* называют часть магнитопровода, на которой размещают обмотки. Часть магнитопровода, на которой обмотки отсутствуют, называют *ярмом*. Трансформаторы большой и средней мощности обычно выполняют стержневыми. Они имеют лучшие условия охлаждения и меньшую массу, чем броневые.

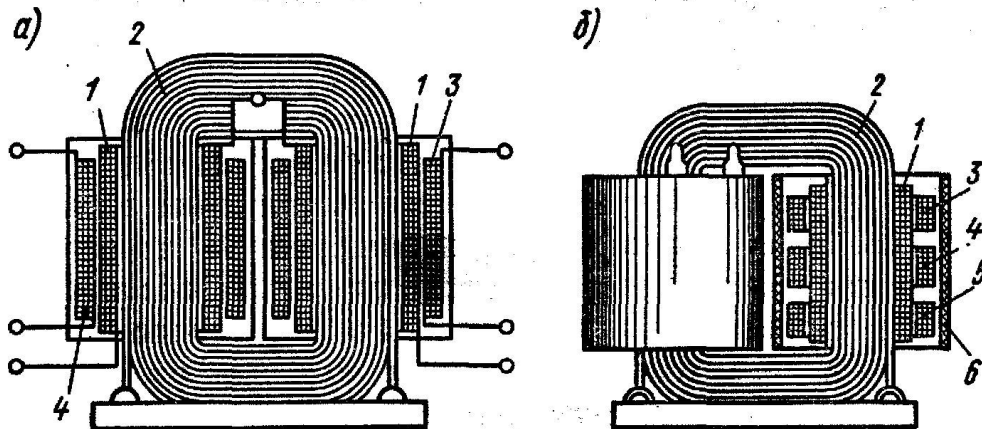


- Для уменьшения потерь от вихревых токов магнитопроводы трансформаторов собирают из изолированных листов электротехнической стали толщиной 0,28 – 0,5 мм при частоте 50 Гц. Трансформаторы малой мощности и микротрансформаторы часто выполняют броневыми, так как они имеют более низкую стоимость по сравнению со стержневыми трансформаторами из-за меньшего числа катушек и упрощения сборки и изготовления. Преимущество тороидальных трансформаторов — отсутствие в магнитной системе воздушных зазоров, что значительно уменьшает магнитное сопротивление магнитопровода. В трансформаторах малой мощности магнитопровод собирают из штамповых пластин П– Ш– и О– образной формы.
- Широкое применение получили магнитопроводы, навитые из узкой ленты электротехнической стали или из специальных железоникелевых сплавов типа пермаллой.

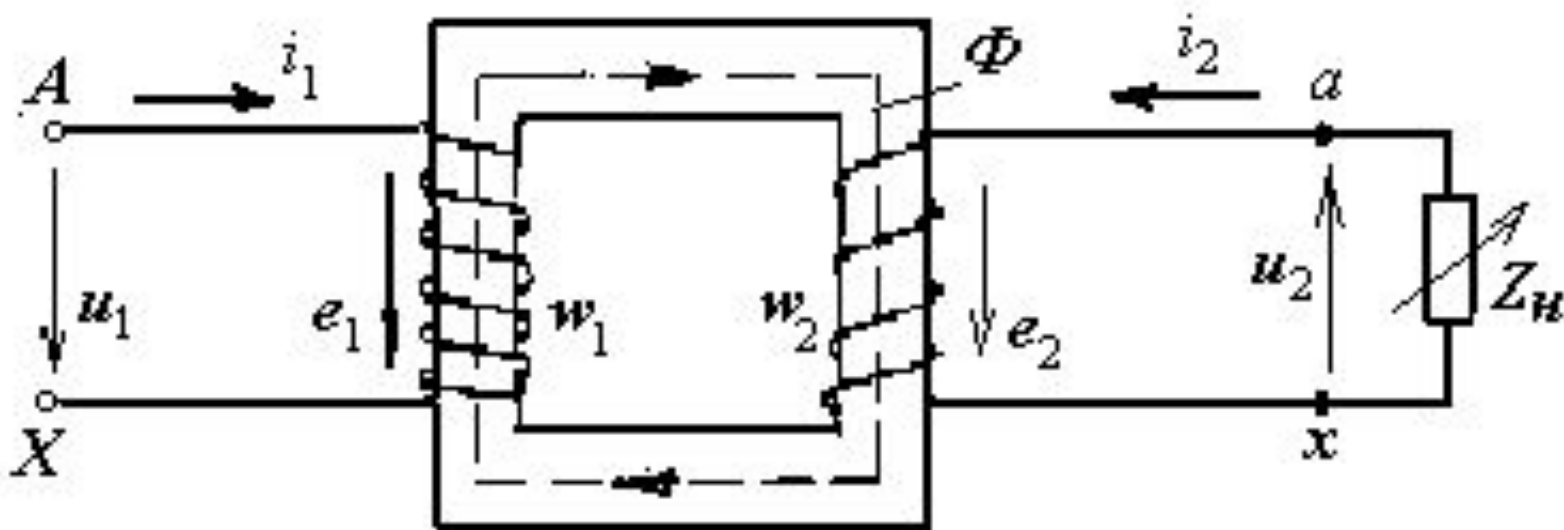
- Монолитность конструкции ленточного магнитопровода обеспечивается путём применения клеющих лаков и эмалей.
- Для трансформаторов, работающих при частоте 400 и 500 Гц, магнитопроводы выполняют из специальных сортов электротехнической стали с малыми удельными потерями при повышенной частоте, а также из железоникелевых сплавов типа пермаллой, которые имеют большие начальную и максимальную магнитные проницаемости и позволяют получить магнитные поля с большой индукцией при сравнительно слабой напряжённости. Толщина листов составляет 0.2; 0,15; 0.1 и 0.08 мм. При частотах более 10 – 20 кГц магнитопроводы прессуют из порошковых материалов (магнитодиэлектриков и ферритов).

# Обмотки

- В современных трансформаторах первичную (см. рис. – 1) и вторичную (см. рис. – 3, 4, 5) обмотки стремятся расположить для лучшей магнитной связи как можно ближе одну к другой. При этом на каждом стержне магнитопровода (см. рис. – 2) размещают обе обмотки либо концентрически — одну поверх другой (рис. а), либо в виде нескольких дисковых катушек, чередующиеся по высоте стержня (рис. б). В первом случае обмотки называют *концентрическими*, во втором — *чередующимися*. В силовых трансформаторах обычно применяют концентрические обмотки, причём ближе к стержням располагают обмотку НН, требующей меньшей изоляции относительно остова трансформатора, а снаружи — обмотку ВН.



# Электромагнитная схема идеального трансформатора



- При подключении к сети в первичной обмотке возникает переменный ток  $i_1$ , который создаёт переменный магнитный поток  $\Phi$ , замыкающийся по магнитопроводу. Поток  $\Phi$  индуцирует в обеих обмотках переменные ЭДС —  $e_1$  и  $e_2$ , пропорциональные, согласно закону Максвелла, числам витков  $W_1$  и  $W_2$  соответствующей обмотки и скорости изменения потока  $d\Phi/dt$ .
- Таким образом, мгновенные значения ЭДС, индуцированные в каждой обмотке,

$$e_1 = -W_1 \frac{d\Phi}{dt} \quad e_2 = -W_2 \frac{d\Phi}{dt}$$

- их действующие значения равны

$$E_1 = 4,44 f \cdot W_1 \cdot \Phi_m \quad E_2 = 4,44 f \cdot W_2 \cdot \Phi_m$$

- где:  $\Phi_m$  – амплитудное значение магнитного потока;  $f$  – частота переменного тока;  $W_1, W_2$  – числа витков первичной и вторичной обмоток;  $\Phi_m^2 = B_m S_m$  – амплитуда магнитного потока;  $B_m$  – амплитуда магнитной индукции;  $S_m$  – площадь поперечного сечения магнитопровода трансформатора.

- С вторичной обмотки  $a - x$  снимается напряжение  $U_2$ , которое подаётся к потребителю электрической энергии  $Z_H$ .
- Ток первичной обмотки трансформатора при отключенной нагрузке ( $Z_H = \infty$ ) является его током холостого хода  $I_0$ . Его выражают в процентах по отношению к номинальному первичному току  $I_{1H}$ , т. е.
- $i_0(\%) = (I_0/I_{1H}) 100\%$ . Ток холостого хода  $i_0(\%)$  в силовых трансформаторах составляет (2...5) %, а в маломощных трансформаторах может составить (20...50) % номинального тока  $I_{1H}$ .
- Отношение мгновенных и действующих ЭДС в обмотках определяется выражением
- .Если пренебречь падениями напряжения в обмотках трансформатора, которые обычно не превышают (3...5) % от номинальных значений  $U_1$  и  $U_2$ , и считать  $E_1 \approx U_1$  и  $E_2 \approx U_2$ , то получим

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{e_1}{e_2} = \frac{W_1}{W_2}$$

$$\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{W_1}{W_2}$$

# Коэффициент трансформации

- Подбирая соответствующим образом числа витков обмоток, при заданном напряжении  $U_1$  можно получить желаемое напряжение  $U_2$ . Если необходимо повысить вторичное напряжение, то число витков  $W_2$  берут больше числа  $W_1$ ; такой трансформатор называют *повышающим*. Если требуется уменьшить напряжение  $U_2$ , то число витков  $W_2$  берут меньшим  $W_1$ . Такой трансформатор называют *понижающим*. Отношение ЭДС  $E_{вн}$  обмотки высшего напряжения к ЭДС  $E_{нн}$  обмотки низшего напряжения (или отношение их чисел витков) называют *коэффициентом трансформации*

$$n = \frac{E_{вн}}{E_{нн}} = \frac{W_{вн}}{W_{нн}}$$



- В системах передачи и распределения энергии в ряде случаев применяют трёхобмоточные трансформаторы, а в устройствах радиоэлектроники и автоматики — многообмоточные трансформаторы. В таких трансформаторах на магнитопроводе размещают три или большее число изолированных друг от друга обмоток, что даёт возможность при питании одной из обмоток получать два или большее число различных напряжений ( $U_2, U_3, U_4$  и т.д.) для электроснабжения двух или большего числа групп потребителей. В трехобмоточных силовых трансформаторах различают обмотки высшего, низшего и среднего (СН) напряжения.
- В трансформаторе преобразуются только напряжения и токи. Мощность же остаётся приблизительно постоянной (она несколько уменьшается из-за внутренних потерь энергии в трансформаторе). Следовательно, полная мощность, потребляемая из сети

$$S_1 = U_1 \cdot I_1 \quad S_1 = U_1 \cdot I_1 \approx S_2 = U_2 \cdot I_2 \quad \frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1} = \frac{W_1}{W_2} = n$$

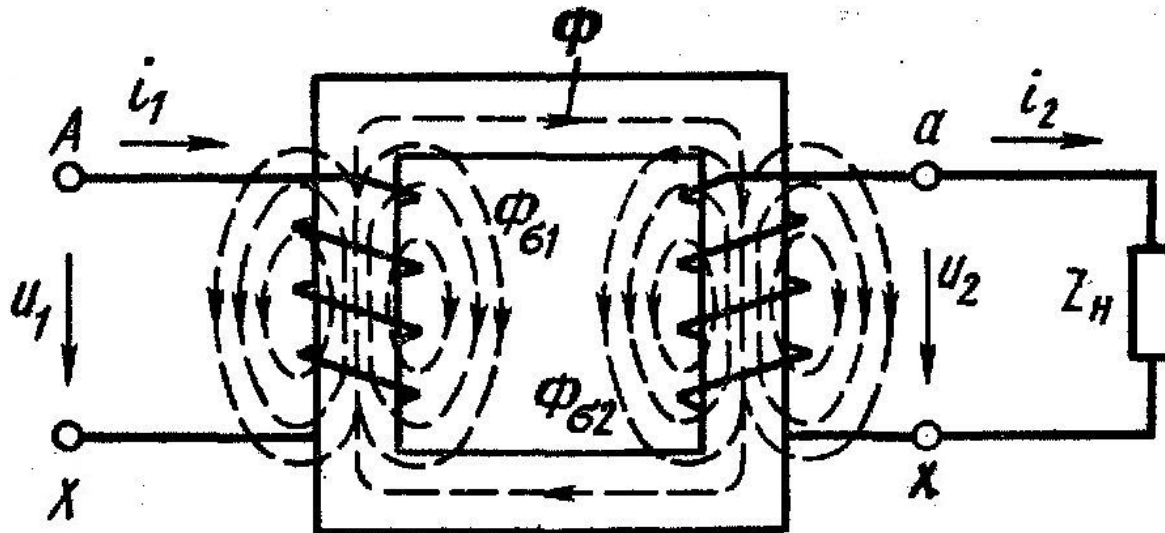
- Трансформатор может работать только в цепях переменного тока. Если первичную обмотку трансформатора подключить к источнику постоянного тока, то в его магнитопроводе образуется магнитный поток, постоянный во времени по величине и направлению. Поэтому в первичной и вторичной обмотках в установившемся режиме не индуцируются ЭДС, а, следовательно, не передаётся электрическая энергия из первичной цепи во вторичную. Такой режим опасен для трансформатора, так как из-за отсутствия ЭДС  $E_1$  в первичной обмотке ток  $I_1 = U_1 / R_1$  весьма большой.
- Важным свойством трансформатора, используемым в устройствах автоматики и радиоэлектроники, является способность его преобразовывать сопротивление нагрузки. Если к источнику переменного тока подключить нагрузку с сопротивлением  $R$  через трансформатор с коэффициентом трансформации  $n$ , то для цепи источника

$$R' = \frac{P_1}{I_1^2} \approx \frac{P_2}{I_2^2} \approx \frac{I_2^2 \cdot R}{I_1^2} \approx n^2 \cdot R$$

- ,где  $P_1$  — мощность, потребляемая трансформатором от источника переменного тока, Вт;  $P_2 = I_2^2 R \approx P_1$  — мощность, потребляемая нагрузкой с сопротивлением  $R$  от трансформатора.

# Схема реального однофазного трансформатора

- В реальном трансформаторе помимо основного магнитного потока  $\Phi$ , замыкающегося по магнитопроводу и сцепленного со всеми обмотками трансформатора, имеются также потоки рассеяния  $\Phi\sigma_1$  и  $\Phi\sigma_2$ , которые сцеплены только с одной из обмоток. Потоки рассеяния не участвуют в передаче энергии, но создают в каждой из обмоток соответствующие ЭДС самоиндукции  $E\sigma_1 = 4,44 f \cdot W_1 \cdot \Phi\sigma_1$ ;  $E\sigma_2 = 4,44 f \cdot W_2 \cdot \Phi\sigma_2$ .



# Основные уравнения для трансформаторов

- С учетом ЭДС самоиндукции и падений напряжения в активных сопротивлениях обмоток можно составить комплексные уравнения для первичной и вторичной обмоток трансформатора. С учетом равновесия намагничивающих сил трансформатора получим следующую систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_1 + \underline{E}_1 + \underline{E}_{\sigma 1} &= \underline{I}_1 R_1; \\ \underline{E}_2 + \underline{E}_{\sigma 2} &= \underline{I}_2 R_2 + \underline{I}_2 \underline{Z}_H; \\ \underline{I}_1 &= \underline{I}_{10} + \left( -\underline{I}_2 w_2 / w_1 \right), \end{aligned} \right\}$$

- где:  $\underline{Z}_H$  — сопротивление нагрузки, подключенной к трансформатору.
- Поскольку потоки рассеяния полностью или частично замыкаются по воздуху, они пропорциональны МДС соответствующих обмоток или соответствующим токам:

$$\underline{E}_{\sigma 1} = \underline{I}_1 X_1 \qquad \underline{E}_{\sigma 2} = \underline{I}_2 X_2$$

- Поскольку потоки рассеяния полностью или частично замыкаются по воздуху, они пропорциональны МДС соответствующих обмоток или соответствующим токам:

$$\underline{E}_{\sigma 1} = -j\underline{I}_1 X_1 \quad \underline{E}_{\sigma 2} = -j\underline{I}_2 X_2$$

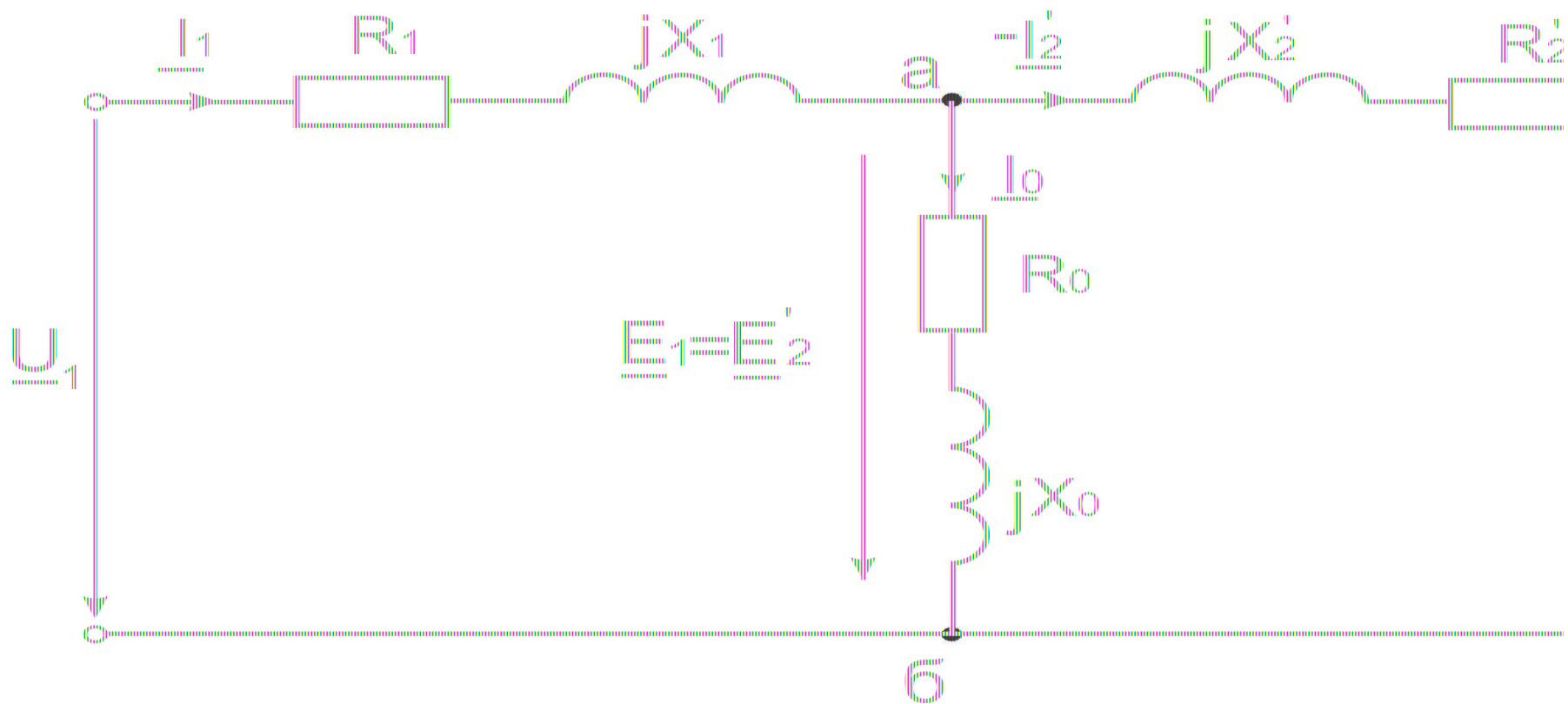
- Величины  $X_1$  и  $X_2$  называют индуктивными сопротивлениями обмоток трансформатора, обусловленными потоками рассеяния, векторы ЭДС  $E_{\sigma 1}$  и  $E_{\sigma 2}$  отстают от соответствующих потоков и токов на  $90^\circ$ .
- При этом комплексные уравнения трансформатора примут вид

$$\underline{U}_1 + \underline{E}_1 = \underline{I}_1 R_1 + j\underline{I}_1 X_1 = \underline{I}_1 \underline{Z}_1$$

$$\underline{E}_2 = \underline{I}_2 R_2 + j\underline{I}_2 X_2 + \underline{I}_2 \underline{Z}_H = \underline{I}_2 \underline{Z}_2 + \underline{I}_2 \underline{Z}_H$$

- $$\underline{I}_1 - \left( -\underline{I}_2 w_2 / w_1 \right) = \underline{I}_{10}$$
- Замена ЭДС и падениями напряжений и наглядно показывает роль *потоков рассеяния*: они создают индуктивные падения напряжения в обмотках, не участвуя в передаче энергии из одной обмотки в другую.

# Схема замещения трансформатора



- Под **номинальной мощностью** трансформатора  $S_{ном}$  понимают его полную мощность при номинальном напряжении и номинальном токе нагрузки:
- $S_{ном} = U_{2ном} I_{2ном} \approx U_{1ном} I_{1ном}$  Уравнения электрического и магнитного состояний трансформатора:
- $\underline{U}_1 = -\underline{E}_1 + R_1 \underline{I}_1 + jX_1 \underline{I}_1,$
- $\underline{U}_2 = \underline{E}_2 - R_2 \underline{I}_2 - jX_2 \underline{I}_2,$
- $\underline{I}_1 = \underline{I}_{10} + \underline{I}'_2,$
- где  $\underline{I}_{10}$  — ток первичной обмотки при холостом ходе,  $\underline{I}'_2 = -\underline{I}_2/n$  — приведенный ток вторичной обмотки трансформатора.

- Для удобства и упрощения расчетов электрических величин трансформатор с магнитосвязанными контурами заменяют схемой замещения с электрически связанными контурами первичной и вторичной обмоток.
- При составлении схемы замещения обычно вторичную обмотку трансформатора заменяют приведенной с числом витков  $W_2' = W_1$ , чтобы получить равенство электродвижущих сил  $E_2' = E_1$ . Остальные электрические величины вторичной обмотки получают из условия равенства мощности до и после преобразования. Пересчет величин вторичной цепи на новое число витков называют приведением вторичной цепи к числу витков первичной обмотки.
- Таким образом, формулы приведения:
- $E_2' = nE_1$ ,  $U_2' = nU_2$ ,  $I_2' = I_2/n$ ,  $R_2' = n^2R_2$ ,  $X_2' = n^2X_2$ ,  $Z_2' = n^2Z_2$ .
- Уравнение для приведенной вторичной обмотки трансформатора примет вид
- $\underline{U}_2' = \underline{E}_2' - R_2' \underline{I}_2' - jX_2' \underline{I}_2'$ .



- Электрическую схему замещения трансформатора строят для приведенного трансформатора на основании уравнений.
- Схема замещения трансформатора представляет собой сочетание двух схем замещения — первичной и вторичной обмоток, которые соединены между собой в точках  $a$  и  $b$ . В цепи первичной обмотки включены сопротивления  $R_1$  и  $X_1$ , а в цепи вторичной обмотки — сопротивления  $R'_2$  и  $X'_2$ . Участок схемы замещения между точками  $a$  и  $b$ , по которому проходит ток  $I_{10}$ , называют **намагничивающим контуром**.  $R_0$  — активное сопротивление, обусловленное магнитными потерями мощности в магнитопроводе трансформатора,  $X_0$  — индуктивное сопротивление, обусловленное основным потоком трансформатора. На вход схемы замещения подают напряжение  $\underline{U}_1$ , к выходу ее подключают сопротивление нагрузки  $\underline{Z}'_н$ , к которому приложено напряжение  $\underline{U}_2'$ .
- Параметры схем замещения могут быть определены по данным опытов холостого хода и короткого замыкания трансформатора.