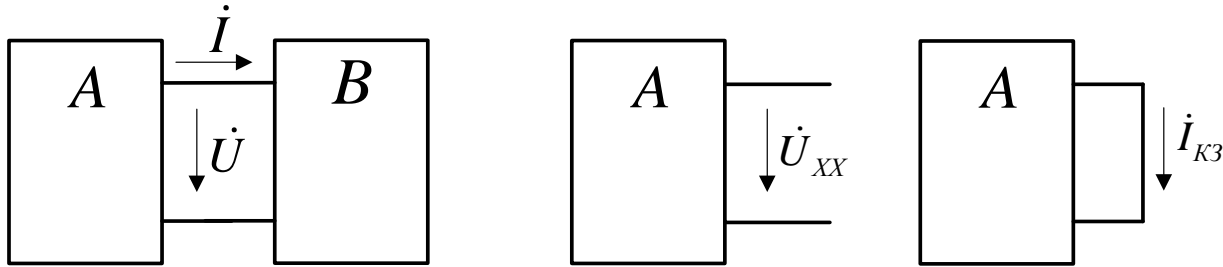


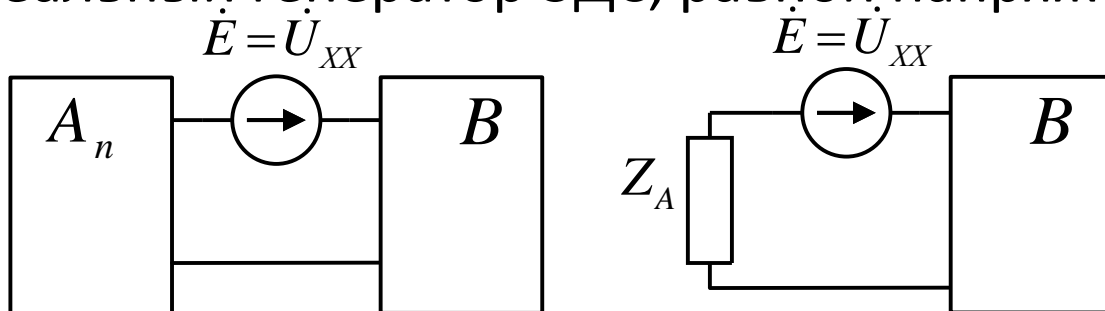
## 2.11. Теорема об эквивалентном источнике.

$A$  - активный двухполюсник,  $B$  - внешняя цепь

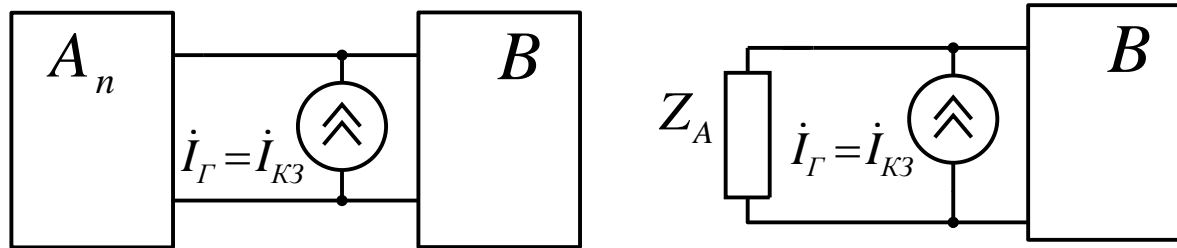
Между частями  $A$  и  $B$  нет магнитной связи.



1. Теорема об эквивалентном источнике напряжения (теорема Тевенина): токи и напряжения во внешней цепи  $B$  не изменятся, если заменить двухполюсник  $A$  пассивным двухполюсником  $A_n$  (закоротив идеальные ЭДС и разомкнув идеальные источники тока), и последовательно с ним включить идеальный генератор ЭДС, равной напряжению холостого хода:



2. Теорема об эквивалентном источнике тока (теорема Нортон): токи и напряжения во внешней цепи  $B$  не изменятся, если заменить  $A$  таким же пассивным двухполюсником  $A_n$  и параллельно ему включить идеальный генератор тока  $\dot{I}_\Gamma = \dot{I}_{K3}$



Направления отсчета  $\dot{E}$  и  $\dot{I}_\Gamma$  соответствуют выбору направлений отсчета  $\dot{U}_{xx}$ ,  $\dot{I}_{K3}$

Замечания:

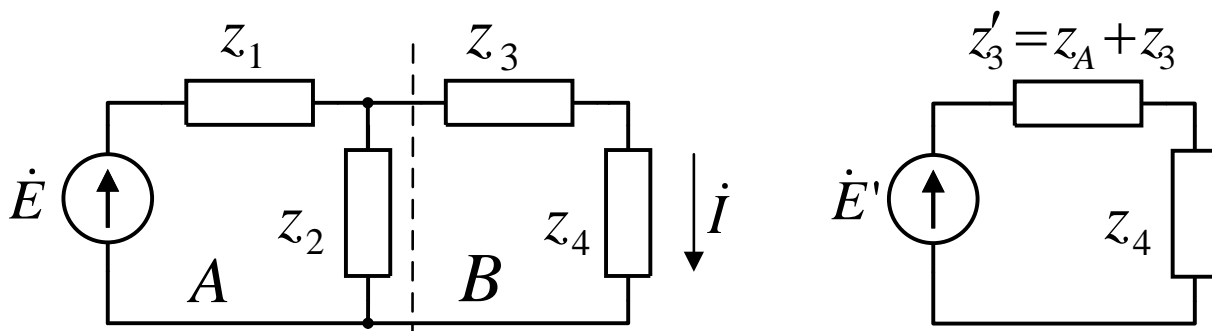
1. Схемы с эквивалентными источниками правильно описывают процессы во внешней цепи  $B$ ;  
про двухполюсник  $A$  этого сказать нельзя!

2. Цепь  $B$  может быть как пассивной, так и активной. Более того, она может быть нелинейной. Взаимность  $A$  не обязательна.

3. На практике можно определить параметры эквивалентного источника, не зная схемы  $A$ . Достаточно измерить  $\dot{U}_{xx}$ ,  $\dot{I}_{кз}$ , по ним определяется

$$z_A = \frac{\dot{U}_{xx}}{\dot{I}_{кз}}$$

Пример: ток через  $z_4$  - ?



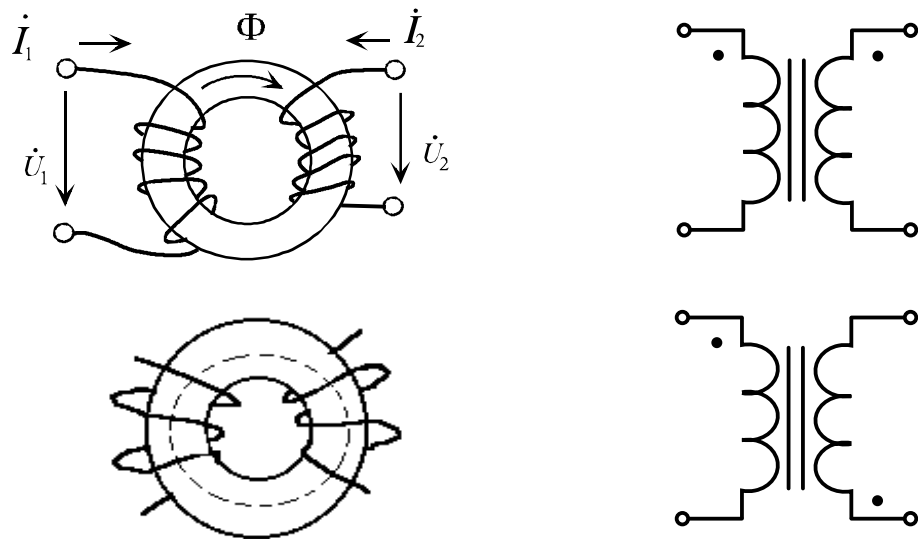
$$\dot{E}' = \dot{E} \frac{z_2}{z_1 + z_2}, \quad z_3' = \frac{z_1 z_2}{z_1 + z_2} + z_3 \quad \rightarrow \quad \dot{I} = \frac{\dot{E}'}{z_3' + z_4}$$

## 2.12. Трансформатор.

Электрический трансформатор — устройство на основе индуктивно связанных индуктивностях, позволяющее изменять амплитуды напряжений при сохранении передаваемой мощности, т.е. при малом потреблении энергии внутри самого устройства.

Трансформатор состоит из двух катушек индуктивности, которые для увеличения взаимной связи между ними намотаны на общем замкнутом сердечнике — магнитопроводе — из материала с высокой магнитной проницаемостью  $\mu$ .

Выбор условных положительных направлений для магнитных потоков согласуют с условными положительными направлениями токов по правилу правоходового винта. Полюсы, в которые втекают (в смысле выбора опорных направлений) токи, вызывающие согласно направленные магнитные потоки, называют однополярными (одноименными).



На НЧ материал сердечника - электротехническая сталь и железоникелевые сплавы.

Для уменьшения вихревых токов магнитопровод выполняется в виде тонких изолированных пластин или навивается из тонкой ленты.

На ВЧ материал сердечника - ферриты, магнитодиэлектрики.

Обмотка, присоединенная к источнику, называется первичной, к нагрузке — вторичной.

Все магнитное поле сосредоточено внутри магнитопровода. Магнитный поток  $\Phi$  через витки первичной и вторичной обмоток одинаков. Пренебрежем сопротивлением проводов.

$$u_1 = N_1 \frac{d\Phi}{dt}, \quad u_2 = N_2 \frac{d\Phi}{dt} \quad \rightarrow \quad \frac{u_2}{u_1} = \frac{N_2}{N_1} = n$$

$\Phi$  - магнитный поток       $n$  - коэффициент трансформации

Гармонические колебания  $\rightarrow \dot{U}_1 = j\omega\dot{\Phi}N_1 \rightarrow \Phi_m = \frac{U_{1m}}{\omega N_1}$

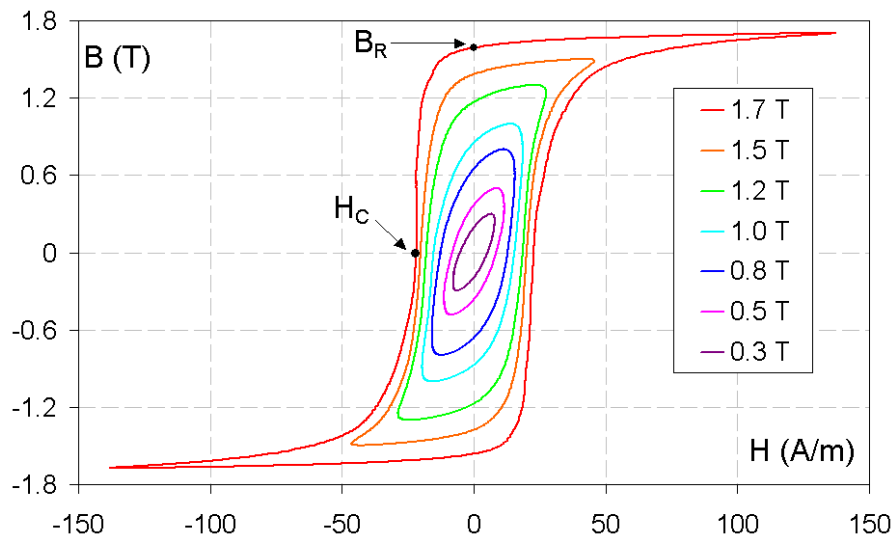
$\Phi = B \cdot S$        $S$  - поперечное сечение магнитопровода

$B$  - индукция магнитного поля

$B = B(H)$        $H$  - напряженность магнитного поля

$B = \mu \cdot H$       для материалов с узкой петлей гистерезиса,  
 $\mu \gg \mu_0$       если магнитопровод работает без насыщения.

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Г/м — проницаемость вакуума



Семейство петель магнитного гистерезиса электротехнической стали при синусоидальном изменении полей со временем с амплитудами от -140 до 140 А/м.

$B_R$  - остаточная намагниченность

$H_C$  - коэрцитивная сила

$H_C \approx 8 - 800$  А/м - магнито-мягкие материалы

$H_C \approx 10^3 - 10^5$  А/м - магнито-твердые материалы (пост. магниты)

Закон Ампера:  $H \cdot l = N_1 i_1 + N_2 i_2$

$l$  - длина магнитопровода

$$i_1 = \frac{Hl}{N_1} - \frac{N_2}{N_1} i_2 = I_{1xx} - n i_2$$

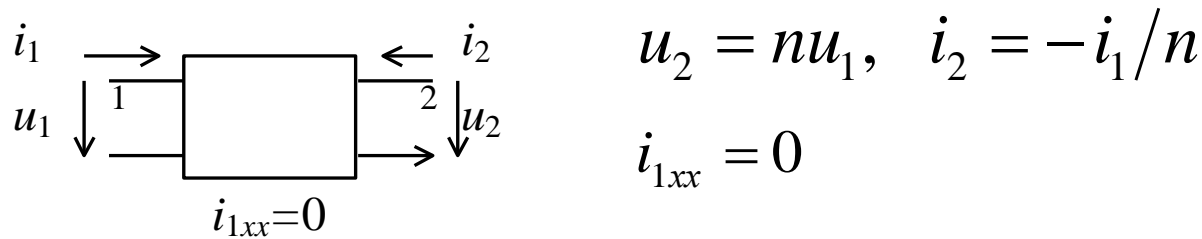
$i_{I_{xx}}$  - ток первичной обмотки при  $i_2 = 0$   
(холостой ход для вторичной обмотки).

$$I_{1xx(m)} = \frac{H_m l}{N_1} = \frac{B_m l}{\mu N_1} = \frac{\Phi_m l}{\mu S N_1} = \frac{l}{\mu S N_1^2 \omega} U_{1m}$$

$$\text{Если } i_{1xx} \ll i_1 \rightarrow i_1 \approx -n i_2 \rightarrow i_2 \approx -\frac{i_1}{n}$$

Трансформатор следует проектировать так, чтобы  $I_{1xx} \rightarrow 0$ .

Идеальный трансформатор - устройство (четырёхполюсник) для которого



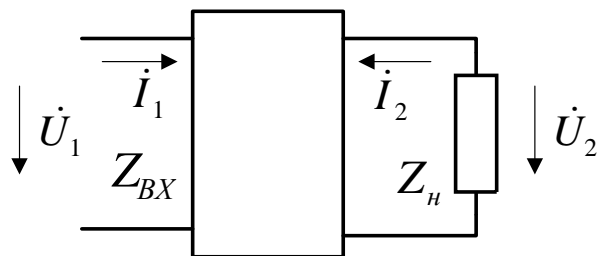
Идеальный трансформатор (ИТ) не потребляет мощности

$$p = u_1 i_1 + u_2 i_2 = u_1 i_1 - u_1 n i_1 / n = 0.$$

Вся мощность, потребляемая на входных зажимах, передается в нагрузку.



На выходе подключена нагрузка  $z_H$ . Определим  $Z_{BX}$  :



$$u_2 = -z_H i_2$$

$$Z_{BX} = \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1} = \frac{\dot{U}_2/n}{-\dot{I}_2 n} = \frac{Z_H}{n^2}.$$

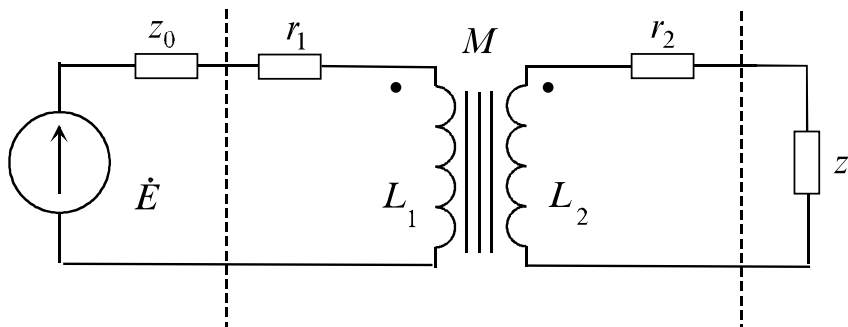
$$Z_{BX} = \frac{Z_H}{n^2}.$$

Происходит трансформация сопротивления в  $n^2$  раз.

Трансформатор позволяет обеспечить:

- 1) получение необходимой величины напряжения (например, для питания каких-либо устройств) без потери мощности;
- 2) согласование генератора с нагрузкой, когда  $Re z_2 \neq Re z_H$  ;
- 3) гальваническую развязку генератора и нагрузки.

# Реальный трансформатор

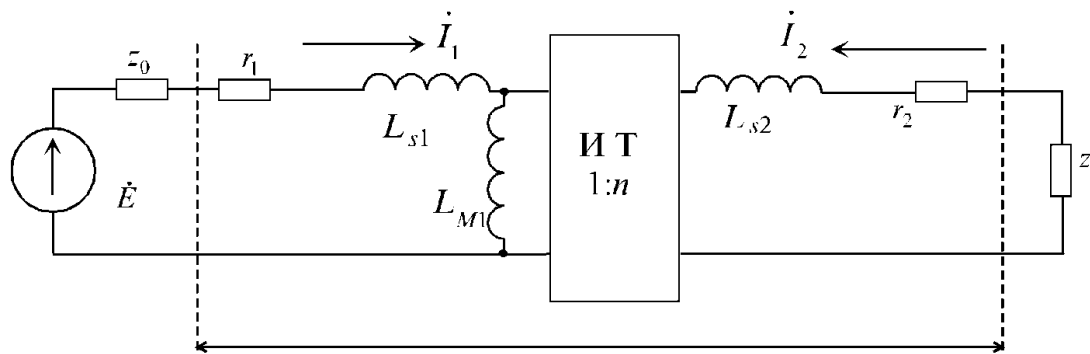


$M$  - взаимная индуктивность,  
 $r_1, r_2$  - сопротивления потерь в проводах (при их вычислении необходимо учесть скин-эффект и эффект близости).

Поток взаимной индукции 1-й и 2-ой обмотки делится на две части:  
 - поток, который проходит через витки другой обмотки и  
 - поток, поток рассеяния 1-й и 2-ой обмотки (мимо другой обмотки)

$$\dot{I}_1 = -\dot{I}'_2 + \dot{I}_{1xx} = -n\dot{I}_2 + \dot{I}_{1xx}$$

За счет потоков рассеяния возникает ток холостого хода



$$I_{1xx(m)} = \frac{l}{\mu S N_1^2 \omega} U_{1m}$$

Эквивалентная схема реального трансформатора

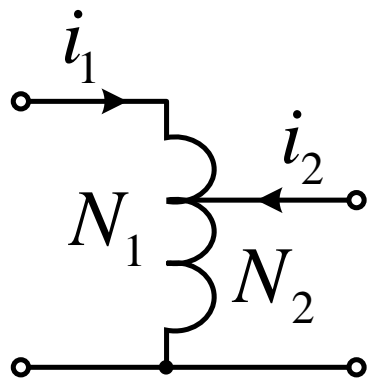
Реальный трансформатор

Все сопротивления вторичной цепи трансформируются в первичную с коэффициентом  $1/n^2$

Реальный трансформатор отличается от идеального в линейном приближении тем, что обладает конечным сопротивлением обмоток, индуктивностями рассеяния и индуктивностью намагничивания. Чем меньше  $r$  и  $L_S$  и чем больше  $L_M$ , тем ближе трансформатор к идеальному.

Среди указанных паразитных параметров на НЧ наибольшую роль играет  $L_M$ : с уменьшением  $\omega$  увеличивается ток холостого хода. На ВЧ большее влияние оказывают  $r_{1,2}$  и  $L_{S1,2}$ . На еще более высоких частотах могут сказываться межобмоточные и межвитковые емкости, которые не учитывались.

Автотрансформатор (одна из обмоток является частью другой):



Поскольку по общей части протекает разностный ток  $i_1 + i_2 = i_1 - i_1 / n$ , уменьшаются потери в проводе

Недостаток - наличие гальванической связи между первичной и вторичной цепями.