

ТРАНСФОРМАТОРЫ

Схема замещения
трансформатора

Схема замещения трансформатора

Электрическая цепь, описываемая теми же уравнениями, что и обмотки реального тр-ра (эквивалентная модель полного входного сопротивления фазы тр-ра)

ЭДС $E_1 = E'_2$ наводится потоком Φ , который создается реакт. составляющей тока I_{12}
→ введем коэф-т пропорциональности (с учетом отставания ЭДС)

$$\dot{E}_1 = \dot{E}'_2 = -j\dot{I}_{12}x_{12} = -\dot{I}_{12}Z_{12}$$

- x_{12} – индуктивное сопротивление взаимной индукции (определяется потоком взаимной индукции)
- $Z_{12} = jx_{12}$ – полное сопротивление

С учетом выражения для напряжения нагрузки

$$\dot{U}'_2 = \dot{I}'_2 Z'_H \quad \text{перепишем уравнения тр-ра}$$

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1 \\ \dot{U}'_2 = \dot{E}'_2 - \dot{I}'_2 Z'_2 \\ \dot{I}_1 + \dot{I}'_2 = \dot{I}_{12} \end{cases} \rightarrow \begin{cases} \dot{U}_1 = \dot{I}_{12} Z_{12} + \dot{I}_1 Z_1 \\ \dot{I}'_2 Z'_H = -\dot{I}_{12} Z_{12} - \dot{I}'_2 Z'_2 \\ \dot{I}_1 + \dot{I}'_2 = \dot{I}_{12} \end{cases}$$

Выразим U_1 через I_1

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_1 \left[Z_1 + \frac{Z_{12} \cdot (Z'_H + Z'_2)}{Z_{12} + (Z'_H + Z'_2)} \right] = \dot{I}_1 Z_{\text{вх}}$$

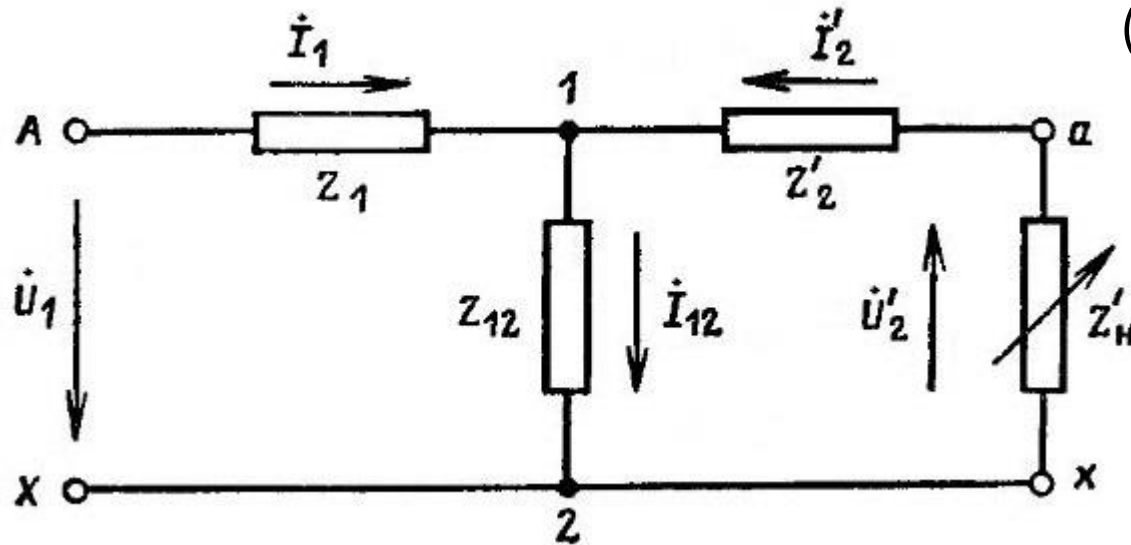
Входное сопротивление $Z_{\text{вх}} = Z_1 +$
параллельное соединение
 Z_{12} и $(Z'_H + Z'_2)$

Схема замещения трансформатора

Цепь – модель входного сопротивления фазы

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_1 \left[Z_1 + \frac{Z_{12} \cdot (Z'_H + Z'_2)}{Z_{12} + (Z'_H + Z'_2)} \right] = \dot{I}_1 Z_{BX}$$

Вместо индуктивной связи введена электрическая
→ легко рассчитать цепь для любой нагрузки
(задаваясь Z'_H найти токи и потери в тр-ре)



А – 1: ветвь первичной обмотки

а – 1: ветвь вторичной обмотки

1 – 2 : ветвь намагничивания

$$-\dot{I}_{12} Z_{12} = \dot{E}_1 = \dot{E}'_2$$

Контур А – 1 – 2 – Х: уравнение первичной обмотки

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_{12} Z_{12} + \dot{I}_1 Z_1$$

Контур а – 1 – 2 – х: уравнение вторичной обмотки

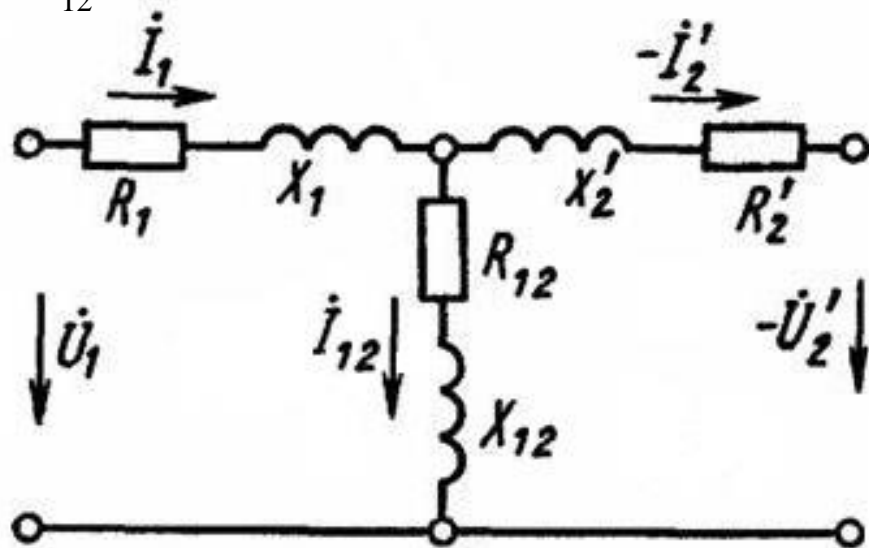
$$\dot{I}'_2 Z'_H + \dot{I}'_2 Z'_2 + \dot{I}_{12} Z_{12} = 0 \rightarrow \dot{U}'_2 = -\dot{I}_{12} Z_{12} - \dot{I}'_2 Z'_2$$

Узел 1 (2) – сумма токов $\dot{I}_1 + \dot{I}'_2 = \dot{I}_{12}$

Схема замещения трансформатора

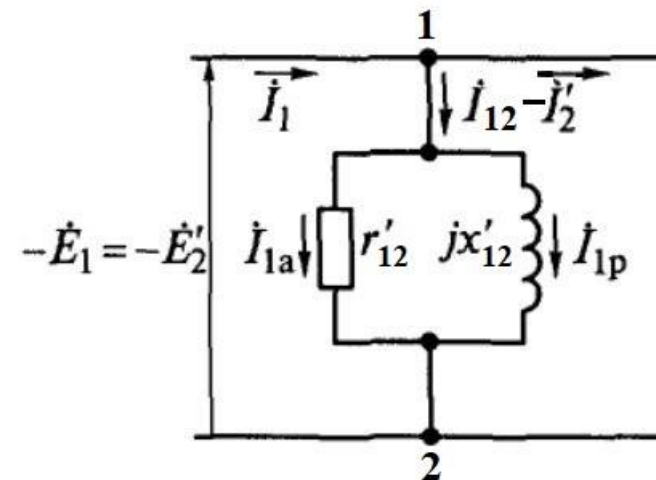
Учет потерь в стали трансформатора – фиктивное активное сопротивление r_{12} в ветви 12 такое, чтобы эл.потери в нем ($I^2 r$) от намагничивающего тока равнялись реальным потерям в стали трансформатора

Здесь $r_{12} = \frac{P_{\text{ст}}}{m I_{12}^2}$ Тогда в схеме замещения $Z_{12} = r_{12} + jx_{12}$



$$Z_{12} = \frac{r'_{12} \cdot jx'_{12}}{r'_{12} + jx'_{12}} = \frac{r'_{12} \cdot jx'_{12}(r'_{12} - jx'_{12})}{(r'_{12} + jx'_{12})(r'_{12} - jx'_{12})} = \frac{r'_{12}x'^2_{12} + jr'^2_{12}x'_{12}}{r'^2_{12} + x'^2_{12}} = r_{12} + jx_{12}$$

Иногда в ветви 12 используют параллельное соединение



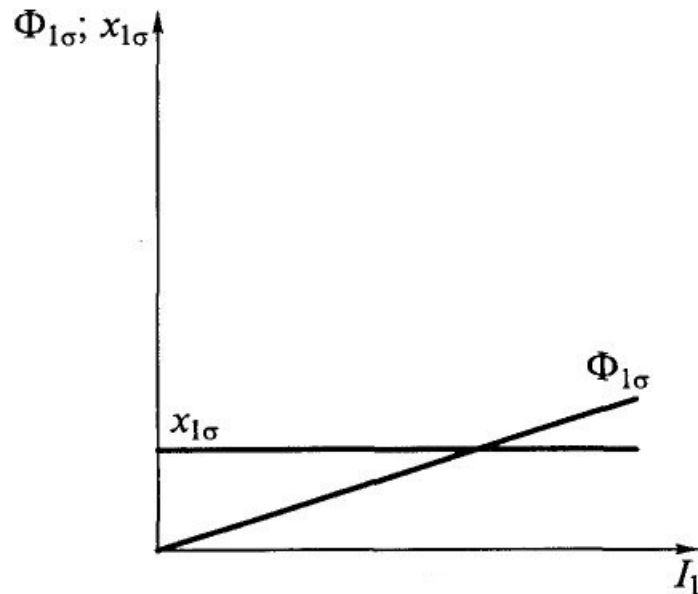
$$\text{Здесь } r'_{12} = \frac{P_{\text{ст}}}{m I_{1a}^2} \quad I_{1a} = \frac{E_1}{r'_{12}} \quad I_{1p} = \frac{E_1}{x'_{12}}$$

Схема замещения трансформатора

Параметры трансформатора

$$Z_1 = r_1 + jx_1 \quad \text{– сопротивления обмоток}$$
$$Z'_2 = r'_2 + jx'_2 \quad \begin{array}{l} \bullet \text{ не зависят от } U \text{ и } I \\ \bullet Z_1 \approx Z'_2 \quad x \gg r \end{array}$$

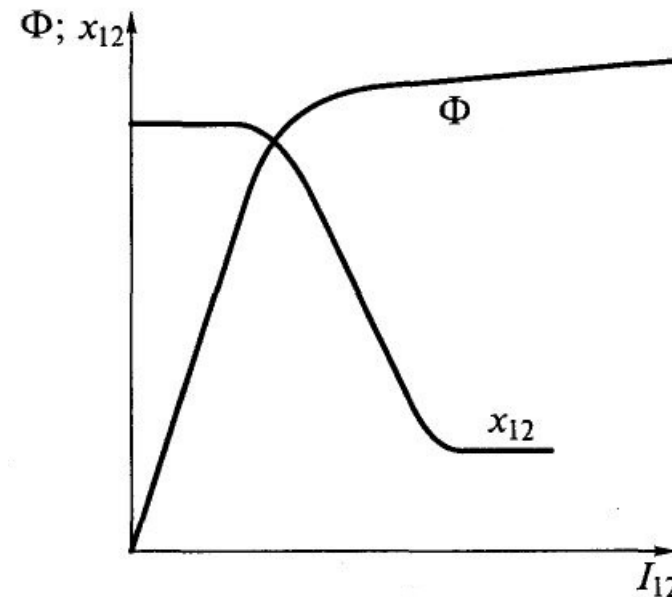
Потоки рассеяния замыкаются по воздуху



Сопротивление ветви намагничивания зависит от U_1

$$x_{12} \approx Z_{12} = \frac{E_1}{I_{12}} \approx \frac{U_1}{I_{12}} \quad r_{12} = \frac{P_{\text{ст}}}{mI_{12}^2} \sim \left(\frac{U_1}{I_{12}} \right)^2$$

Поток взаимной индукции замыкается по стали
→ влияние насыщения (нелинейность)



С ростом U_1 растет Φ ,
но I_{12} растет быстрее

Величина x_{12} зависит
от степени насыщения
стали тр-ра

Схема замещения трансформатора

Параметры трансформатора

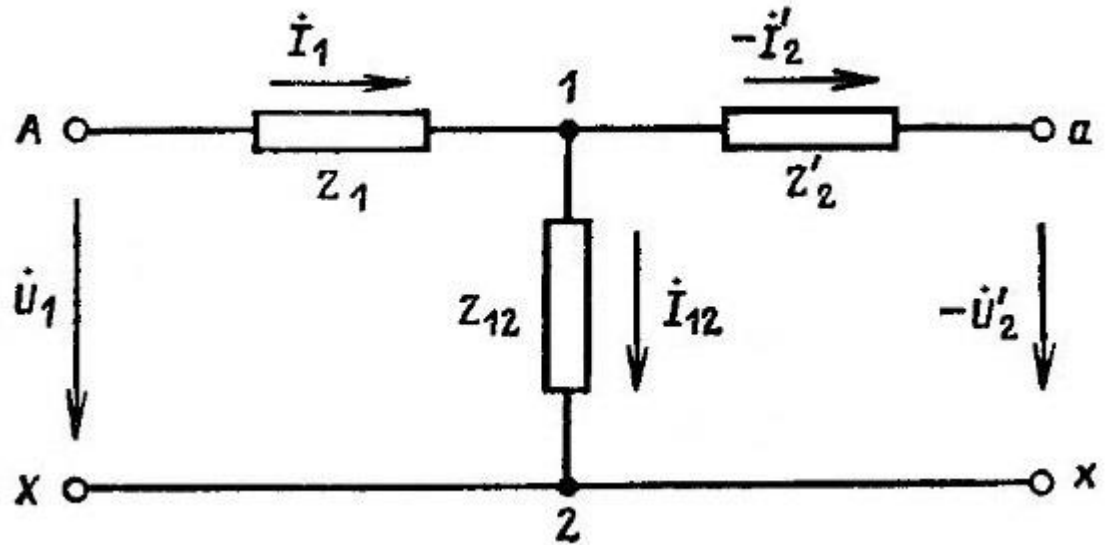
Для сравнения разных тр-ров удобно использовать систему относительных единиц:

$$\text{сопротивление [о.е.]} = \frac{\text{сопротивление [Ом]}}{\text{базовое сопротивление [Ом]}}$$

Базовое сопротивление $Z_{\text{б}} = \frac{U_{1\text{н}}}{I_{1\text{н}}}$ (фазные)

В современных силовых трансформаторах:

- $Z_{12}^* = 10 \dots 300$
- $x_{12}^* = 10 \dots 300$
- $r_{12}^* = 5 \dots 60$
- $Z_1^* \approx Z_2'^* = 0,015 \dots 0,07$
- $x_1^* \approx x_2'^* = 0,015 \dots 0,07$
- $r_1^* \approx r_2'^* = 0,0012 \dots 0,012$



Индуктивные сопротивления

Индуктивные параметры определяются геометрией магнитной системы и магнитной проницаемостью материала $\mu = \mu_r \mu_0$ ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м) → расчет магнитной цепи

Рассмотрим однофазный тр-р с постоянным сечением магнитопровода

По закону полного тока $\oint H dl = \Sigma I_{\text{ОХВ}}$

Для участков равномерного поля с $H = \text{const}$

$$\Sigma H_i \Delta l_i = F_{12}$$

Если $S_{\text{ст}} = \text{const}$, то на всей длине магнитопровода $l_{\text{ст}}$ напряженность $H = \text{const}$

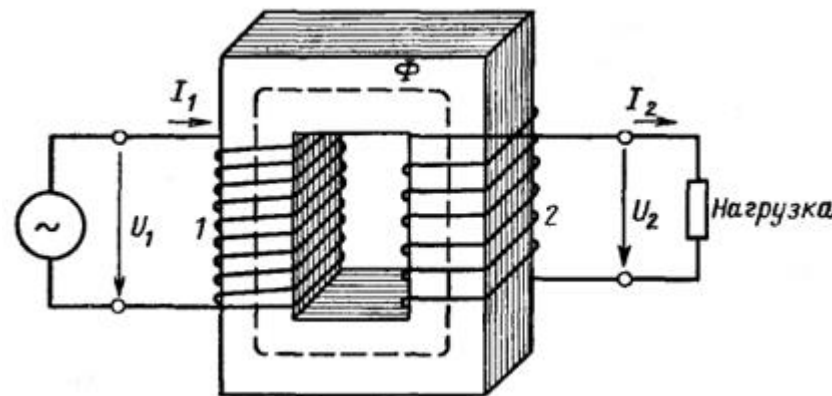
Тогда $H l_{\text{ст}} = F_{12}$ или $\frac{B}{\mu} l_{\text{ст}} = F_{12}$ т.е. $\frac{\Phi}{\mu S_{\text{ст}}} l_{\text{ст}} = F_{12} \rightarrow \Phi R_{\mu} = F_{12}$

Закон Ома для магнитной цепи

Аналитический расчет магнитной цепи на основе прямой аналогии:

ток $I \rightarrow$ поток Φ ; ЭДС $E \rightarrow$ МДС F ; сопротивление $R \rightarrow$ магнитное сопротивление $R_{\mu} = \frac{l_{\text{ст}}}{\mu S_{\text{ст}}}$

Напряжение? $U = \varphi_2 - \varphi_1 \rightarrow U_{\mu} = \varphi_{\mu 2} - \varphi_{\mu 1} = H_i \Delta l_i$ (φ_{μ} – скалярный магнитный потенциал)



Индуктивные сопротивления

Индуктивные параметры определяются геометрией магнитной системы и магнитной проницаемостью материала $\mu = \mu_r \mu_0$ ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м) → расчет магнитной цепи

Принято использовать понятие магнитной проводимости $\Lambda_\mu = \frac{1}{R_\mu} = \frac{\mu S_{\text{ст}}}{l_{\text{ст}}}$

Тогда закон Ома для магнитной цепи $\Phi = F_{12} \Lambda_\mu$

Индуктивное сопротивление взаимоиндукции определяется μ и размерами магнитопровода

$$x_{12} = \omega L_{12} = \omega \frac{\Psi_1}{I_{12}} = \omega \frac{\Phi w_1}{I_{12}} = \omega \frac{F_{12} \Lambda_\mu}{I_{12}} w_1 = \omega \frac{I_{12} w_1}{I_{12}} \Lambda_\mu w_1 = \omega w_1^2 \Lambda_\mu = 2\pi f w_1^2 \frac{\mu S_{\text{ст}}}{l_{\text{ст}}} \quad (\text{где } \mu = \mu_r \cdot \mu_0)$$

Аналогично $x_1 = \omega w_1^2 \Lambda_{\sigma 1}$
 $x_2 = \omega w_2^2 \Lambda_{\sigma 2}$ Но вне магнитопровода $\mu = \mu_0$ и $\Lambda_\sigma = \text{const}$

Индуктивные сопротивления

Сталь имеет нелинейную кривую намагничивания $B = \mu\mu_0 H \rightarrow B = f(H)$

Для конкретного магнитопровода с $S_{\text{ст}}$ и $l_{\text{ст}}$ $BS_{\text{ст}} = f(Hl_{\text{ст}}) \rightarrow \Phi = f(I_{12})$
магнитная цепь характеризуется кривой намагничивания

Для магнитопровода с бóльшим $R_{\mu 2}$ кривая проходит ниже

Для магнитопровода с немагнитным зазором $R_{\mu 3}$ еще больше
и кривая проходит еще ниже

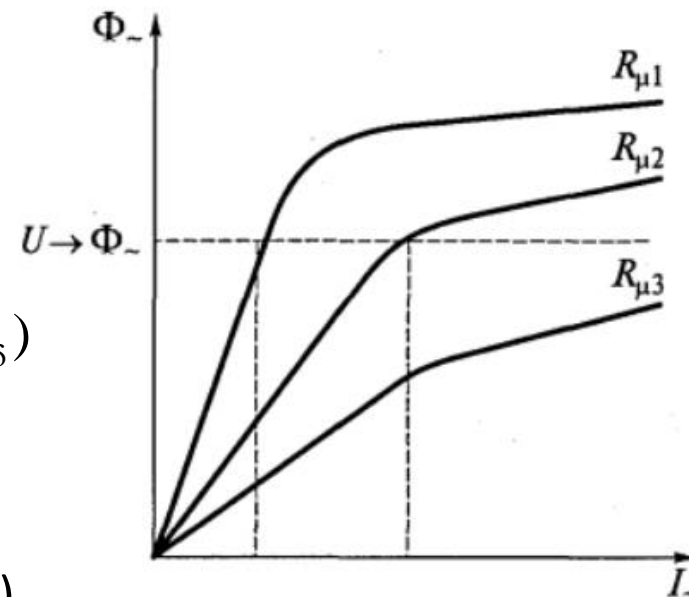
$$\oint Hdl = I_{12}w_1 \rightarrow H_{\text{ст}}l_{\text{ст}} + H_{\delta}\delta = \frac{\Phi}{\mu_r\mu_0 S_{\text{ст}}}l_{\text{ст}} + \frac{\Phi}{\mu_0 S_{\text{ст}}}\delta = \Phi(R_{\mu\text{ст}} + R_{\mu\delta})$$

Особенность магнитной цепи переменного тока:

Поскольку Φ определяется только величиной U_1 ($U_1 \approx E_1 = 4,44fw\Phi$),
то при разных R_{μ} потребуется разный намагничивающий ток I_{12}

Т.е. одна обмотка на сердечниках с разным R_{μ} имеет разные x_{12}

Также повышение U приводит к сильному возрастанию I_{12}



Индуктивные сопротивления

Сталь имеет нелинейную кривую намагничивания $B = \mu\mu_0 H \rightarrow B = f(H)$

Для конкретного магнитопровода с $S_{\text{ст}}$ и $l_{\text{ст}}$

$$BS_{\text{ст}} = f(Hl_{\text{ст}}) \rightarrow \Phi = f(I_{12})$$

магнитная цепь характеризуется кривой намагничивания

Для магнитопровода с бóльшим $R_{\mu 2}$ кривая проходит ниже

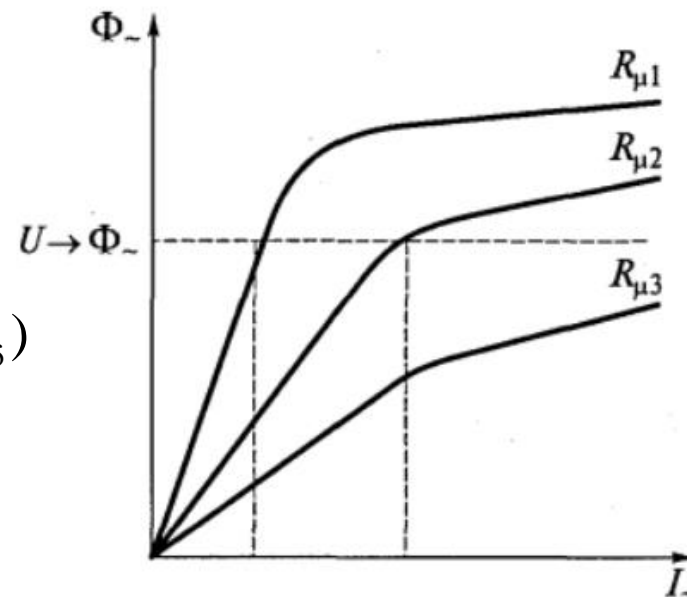
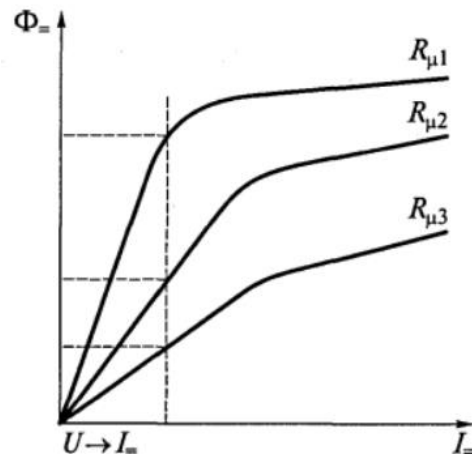
Для магнитопровода с немагнитным зазором $R_{\mu 3}$ еще больше и кривая проходит еще ниже

$$\oint H dl = I_{12} w_1 \rightarrow H_{\text{ст}} l_{\text{ст}} + H_{\delta} \delta = \frac{\Phi}{\mu_r \mu_0 S_{\text{ст}}} l_{\text{ст}} + \frac{\Phi}{\mu_0 S_{\text{ст}}} \delta = \Phi (R_{\mu \text{ст}} + R_{\mu \delta})$$

Для цепи постоянного тока:

Поток Φ определяется током
($I = U/r = \text{const}$)

и R_{μ} магнитопровода



Опыт короткого замыкания трансформатора

КЗ ($U_2 = 0$) – аварийный режим работы

Опыт КЗ проводят при $U_1 = 3...15\% U_{1н}$ ($I_2 \leq I_{2н}$)

При этом сильно снижается Φ и I_{12} ($I_{12} \approx 0$)

Уравнения трансформатора при КЗ

$$\dot{U}_{1к} = -\dot{E}_{1к} + \dot{I}_{1к} Z_1;$$

$$0 = \dot{E}'_{2к} - \dot{I}'_{2к} Z'_2;$$

$$\dot{I}_{1к} + \dot{I}'_{2к} = 0.$$

Токи обмоток $\dot{I}_{1к} = -\dot{I}'_{2к}$

Наводимые ЭДС $\dot{E}'_{2к} (= \dot{E}_{1к}) = \dot{I}'_{2к} Z'_2 = -\dot{I}_{1к} Z'_2$

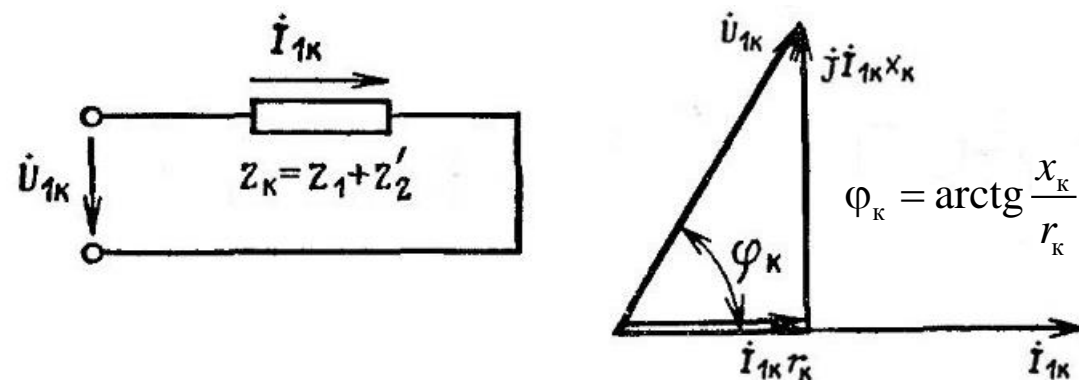
Тогда в первичной цепи $\dot{U}_{1к} = \dot{I}_{1к} (Z_1 + Z'_2)$

т.к. $Z_1 \approx Z'_2$ и $\dot{U}_{1к} \approx 2\dot{I}_{1к} Z'_2$ то $\dot{E}_{1к} \approx \dot{U}_{1к} / 2$

Сопротивление короткого замыкания

$$Z_k = Z_1 + Z'_2 = (r_1 + r'_2) + j(x_1 + x'_2)$$

Схема замещения и векторная диаграмма



С ростом мощности x_k растет, r_k уменьшается

Опыт короткого замыкания трансформатора

Напряжение КЗ $u_k = \% \text{ от } U_{1H} \text{ при } I_k = I_H$

$$u_{k,a} = u_k \cos \varphi_k = \frac{I_{1H} r_k}{U_{1H}} \cdot 100\%$$

$$u_{k,p} = u_k \sin \varphi_k = \frac{I_{1H} x_k}{U_{1H}} \cdot 100\%$$

$$u_k = 4 \dots 15\%$$

В относительных единицах $Z_{k*} = \frac{Z_k}{Z_0} = \frac{I_{1H} Z_k}{U_{1H}} = \frac{U_{1K}}{U_{1H}} = u_{k*}$

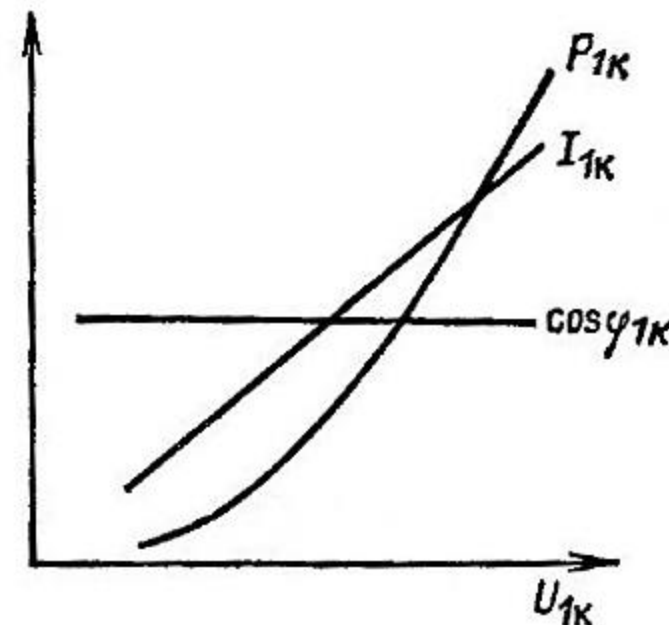
$$u_{k,a*} = r_{k*}; u_{k,p*} = x_{k*}.$$

Потери короткого замыкания

- электрические основные ($I^2 r$) – в обмотках
- электрические добавочные (от вихр.токов) – в обмотках, конструктивных элементах, баке – учитывают через увеличение r (1,05...1,15)
- магнитные – пренебрежимо малы (U_1 мало, $E_{1K} \approx 0,5 U_{1K} \rightarrow \Phi_K$ меньше Φ_H в 14...60 раз
 $P_K = 0,4 \dots 4\% \text{ от } P_H$ (но в 2,5...6 раз больше P_0)

Характеристики короткого замыкания:

U_{1K} от 0 до U , при котором $I_{1K} = I_{1H}$ (и $I_{2K} = I_{2H}$)

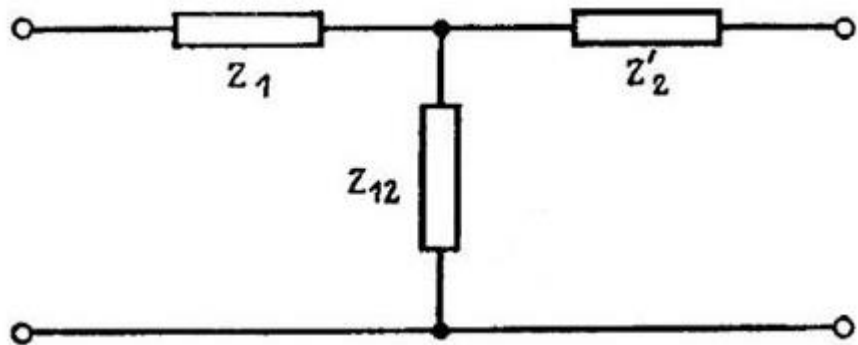


Т.к. $Z_k = \text{Const}$, то $I_{1K} = U_{1K} / Z_{1K} \sim U_{1K}$ (линейно)

потери $P_K = m I_{1K}^2 r_k \sim U_{1K}^2$

$$\cos \varphi_k = \frac{P_K}{m U_{1K} I_{1K}} \sim \frac{U_{1K}^2}{U_{1K}^2} = \text{Const}$$

Определение параметров трансформатора



Расчетное определение сопротивлений:

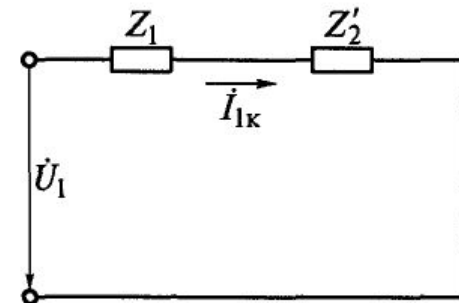
- r_1, r_2 – проводники, 75°C , учет доб.потерь
- r_{12} – учет магнитных потерь
- индуктивные сопротивления $x = \omega L, L = \Psi/I$
- x_1, x_2 – потоки рассеяния
- x_{12} – поток взаимоиндукции

Опытное определение сопротивлений

Опыт КЗ

$$Z_K = Z_1 + Z'_2$$

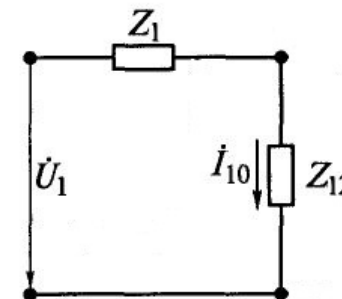
$$Z_1 \approx Z'_2 \rightarrow Z_K / 2$$



$$Z_K = \frac{U_{1л}}{\sqrt{3}I_{1к}}; \quad r_K = \frac{P_K}{3I_{1к}^2}; \quad x_K = \sqrt{Z_K^2 - r_K^2}.$$

Опыт ХХ

$$Z_0 \approx Z_{12} \quad (Z_1 \text{ мало})$$



$$Z_0 = \frac{U_{1л}}{\sqrt{3}I_0}; \quad r_0 = \frac{P_0}{3I_0^2}; \quad x_0 = \sqrt{Z_0^2 - r_0^2}.$$