

**Лекция 12. Потери мощности в трансформаторе, опыт холостого хода, короткого замыкания и рабочий ход трансформатора**

$$\Delta P = \Delta P_{\text{э}} + \Delta P_{\text{м}}, \quad (2.6)$$

где  $\Delta P_{\text{э}}$ —электрические потери в активных сопротивлениях обмоток трансформатора ( $R_1$  и  $R_2$ );  $\Delta P_{\text{м}}$ —магнитные потери в магнитопроводе от вихревых токов и перемагничивания сердечника.

**Электрические потери мощности:**

$$\Delta P_{\text{э}} = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 = I_1^2 R_1 + I_1^2 R'_2 = I_1^2 R_k,$$

$$\text{где } I_2 = nI_1; R_2 = \frac{R'_2}{n^2}; R_k = R_1 + R'_2 K_M = \frac{R_0}{Z_0^2}$$

Введем понятие коэффициента загрузки трансформатора по току —  $\beta = \frac{I_1}{I_{1H}}$  тогда :  $\Delta P_{\text{э}} = I_1^2 R_k = \beta^2 \Delta P_{\text{эН}}$  ( $\Delta P_{\text{эН}} = I_{1H}^2 R_k$  — номинальные электрические потери).

**Магнитные потери мощности** в трансформаторе:

$$\Delta P_{\text{м}} = I_0^2 R_0 = \left(\frac{U_1}{Z_0}\right)^2 \cdot R_0 = \left(\frac{R_0}{Z_0^2}\right) U_1^2 = K_M U_1^2,$$

где — магнитный коэффициент (зависит от качества железа и частоты тока),  $Z_0 = \sqrt{R_0^2 + X_0^2}$ — полное сопротивление цепи намагничивания.

Введём понятие коэффициента относительного напряжения трансформатора-

$$\gamma = \frac{U_1}{U_{1H}}$$

тогда  $\Delta P_{\text{м}} = K_M U_1^2 = \gamma^2 \Delta P_{\text{мН}}$  ( $\Delta P_{\text{мН}} = K_M U_{1H}^2$ — номинальные магнитные потери).

Потери мощности (2.6) в трансформаторе:  $\Delta P = \beta^2 \Delta P_{\text{эН}} + \gamma^2 \Delta P_{\text{мН}}$ .

КПД трансформатора:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P} = \frac{\gamma \beta S_{2H} \cos \varphi_2}{\gamma \beta S_{2H} \cos \varphi_2 + \beta^2 \Delta P_{\text{эН}} + \gamma^2 \Delta P_{\text{мН}}},$$

где  $P_1 = U_1 I_1 \cos \varphi_1$ —активная мощность, потребляемая от сети;

$P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_2 = \gamma \beta U_{2H} I_{2H} \cos \varphi_2 = \gamma \beta S_{2H} \cos \varphi_2$ —активная мощность нагрузки;

$$\gamma = \frac{U_2}{U_{2H}}; \beta = \frac{I_2}{I_{2H}}; \cos \varphi_2 = \frac{R_H}{Z_H}$$

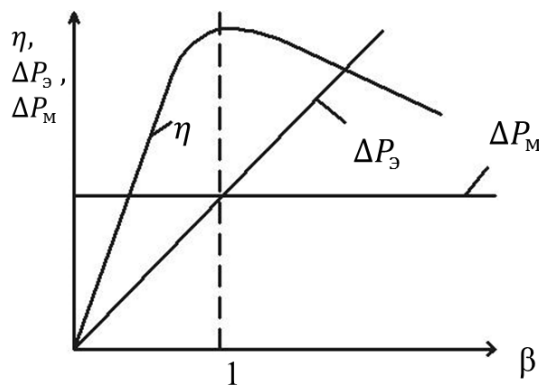


Рис. 2.3. Зависимости КПД,  $\Delta P_0$  и  $\Delta P_M$  от коэффициента загрузки трансформатора по току  $\beta$  (максимальное значение КПД соответствует  $\beta=1$ )

### Опыт холостого хода трансформатора.

Вторичная обмотка трансформатора разомкнута. Измеряются  $PV_1$ ,  $PV_2$ ,  $PA_1$  и  $PW$ .

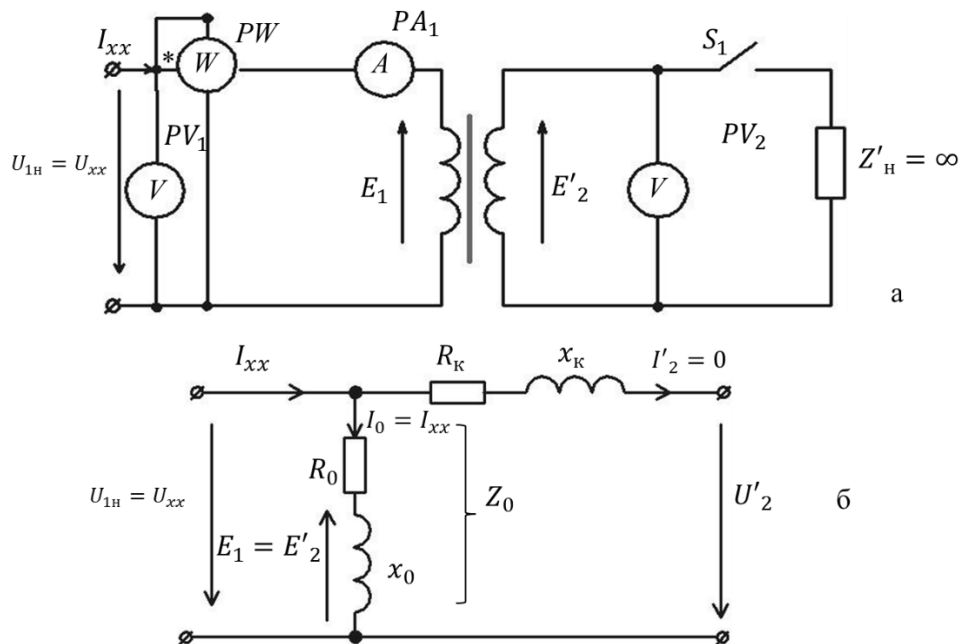


Рис. 2.4. Принципиальная схема опыта холостого хода трансформатора (а); упрощенная схема замещения (б).

Определим параметры трансформатора при *опыте холостого хода* ( $n, \Delta P_{MH}, R_0, Z_0, x_0$ ).

Примем **допущения**:

а)  $\beta_{xx} = \frac{I'_2}{I'_{2H}} = 0$ , так как потребитель отключен ( $I'_2 = 0$ ). На практике,

$I_{xx} = I_0 \approx (5 \div 10)\%$  от  $I_{1H}$ , поэтому  $\beta = \frac{I_{xx}}{I_{1H}} \approx 0,05$ .

б)  $\gamma_{xx} = \frac{U_1}{U_{1H}} = \frac{U_{xx}}{U_{1H}} = 1$ , так как  $U_{xx} = U_{1H}$ ,

1. Определим **коэффициент трансформации**. Из второго закона Кирхгофа:

$$U_{1H} = E_1; U_{2H} = E'_2, \text{ или } U_{2H} = E_2 \frac{U_{1H}}{U_{2H}} = \frac{E_1}{E_2} = n.$$

Коэффициент трансформации  $n \approx \frac{U_1}{U_2}$  определяется из отношения  
вольтметров  $PV_1$  и  $PV_2$  (рис. 2.4, а).

2. Определим **номинальные магнитные потери**  $\Delta P_{MH}$  с учетом  $\beta_{xx} = 0$ ,

$\gamma_{xx} = 1$ ;  $P_{Wxx} = \Delta P = \beta_{xx}^2 \Delta P_{\text{ЭН}} + \gamma_{xx}^2 \Delta P_{MH} = \Delta P_{MH}$ . Таким образом,  $\Delta P_{MH} = P_{Wxx}$  определяется ваттметром  $PW$  при опыте холостого хода.

3. Определим **параметры схемы замещения** ( $R_0, z_0, x_0$ ). Мощность, потребляемая от сети:  $P_{Wxx} = \Delta P_{MH} = I_{xx}^2 R_0$ , откуда

$$R_0 = \frac{P_{Wxx}}{I_{xx}^2}$$

– определяется показаниями  $PW$  и  $PA_1$  (Рис. 2.4, а).

Ток в намагничивающем контуре:

$$I_0 = I_{xx} = \frac{U_{1H}}{z_0},$$

откуда:

$$z_0 = \frac{U_{1H}}{I_{xx}}$$

определяется показаниями  $PA_1$  и  $PV_1$  (Рис. 2.4, а).

**Индуктивное сопротивление** намагничивающего контура  $x_0$ :

$$x_0 = \sqrt{z_0^2 - R_0^2}.$$

## Опыт короткого замыкания трансформатора

В схеме вторичная обмотка замкнута накоротко. В опыте измеряются  $PV_1$ ,  $PA_1$ ,  $PA_2$  и  $PW$ .

Определим параметры трансформатора опыта *короткого замыкания* ( $\Delta P_{\text{ЭН}}$ ,  $z_k$ ,  $X_k$ ,  $R_k$ )

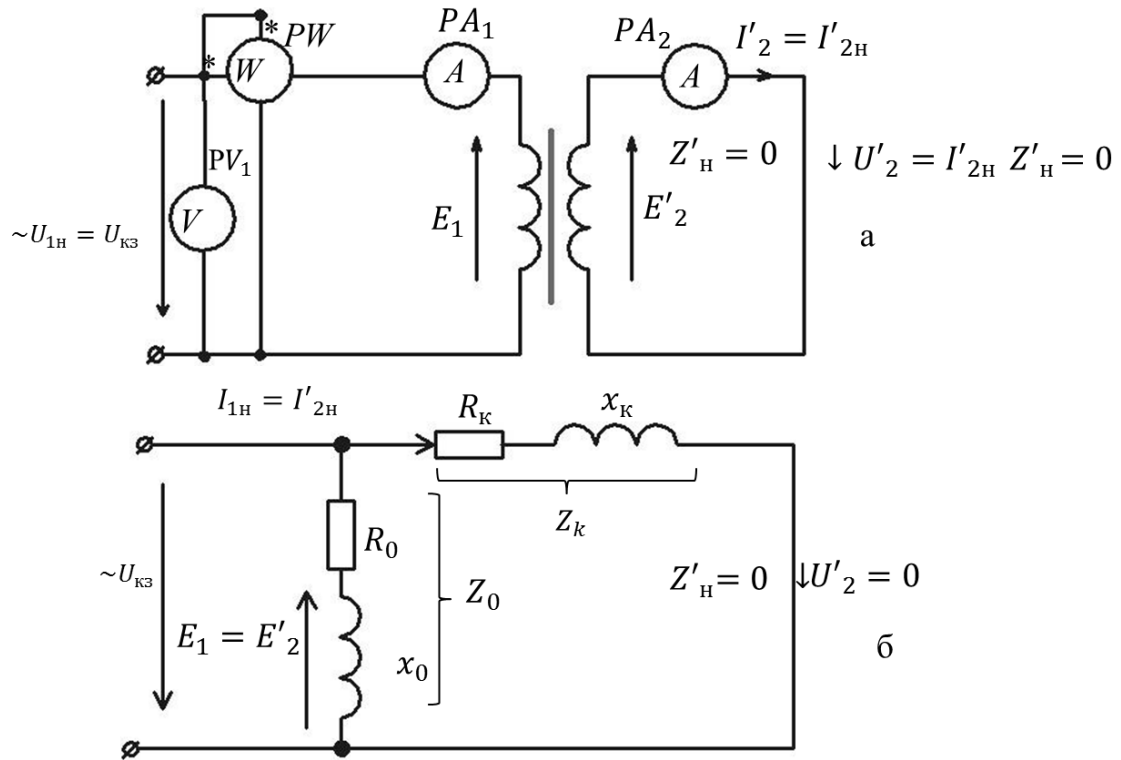


Рис.2.5. Принципиальная схема *опыта короткого замыкания* трансформатора(а);  
упрощенная схема замещения (б)

Примем допущения:

- а)  $\beta_{\text{кз}} = \frac{I_1}{I_{1\text{H}}} = \frac{I_2}{I_{2\text{H}}} = 1$ , так как опыт проводится при номинальных значениях токов ( $I_1 = I_{1\text{H}}$ ;  $I_2 = I_{2\text{H}}$ ).
- б)  $\gamma_{\text{кз}} = \frac{U_2}{U_{2\text{H}}} = 0$ , т. к. вторичная обмотка замкнута накоротко ( $Z_{\text{H}} = 0, U_2 = 0$ ).

Поэтому к первичной обмотке подводят напряжение  $5 \div 10\%$  от  $U_{1\text{H}}$ .

1. Определим **номинальные электрические потери**  $\Delta P_{\text{ЭН}}$

с учетом  $\gamma_{\text{кз}} = 0$ ;  $\beta_{\text{кз}} = 1$ :

$$P_{Wkk} = P_1 = P_2 + \Delta P = \Delta P = \beta_{\text{кз}}^2 \Delta P_{\text{ЭН}} + \gamma_{\text{кз}}^2 \Delta P_{\text{МН}} = \Delta P_{\text{ЭН}}.$$

$\Delta P_{\text{ЭН}}$  определяется ваттметром  $PW$ .

2. Определим **параметры схемы замещения** трансформатора  $z_k, X_k, R_k$ .

Номинальный ток  $I_{1\text{H}} = \frac{U_{\text{кз}}}{z_k} \Rightarrow z_k = \frac{U_{\text{кз}}}{I_{1\text{H}}}$  (показания вольтметра  $PV_1$  и амперметра  $PA_1$ ).

Мощность от сети:  $P_{Wkk} = \Delta P_{\text{ЭН}} = I_{1\text{H}}^2 R_k$ , откуда  $R_k = \frac{\Delta P_{\text{ЭН}}}{I_{1\text{H}}^2}$  (показания ваттметра  $PW$  и амперметра  $PA_1$ ).

**Индуктивное сопротивление**  $x_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2}$ .

### Рабочий режим трансформатора

Зависимость напряжения на вторичной обмотке от тока нагрузки  $U_2 = f(I_2)$  или  $U_2 = f(\beta)$  при  $U_1 = \text{const}$  и  $\cos \varphi_2 = \text{const}$  – **внешняя характеристика трансформатора** (рабочий режим).

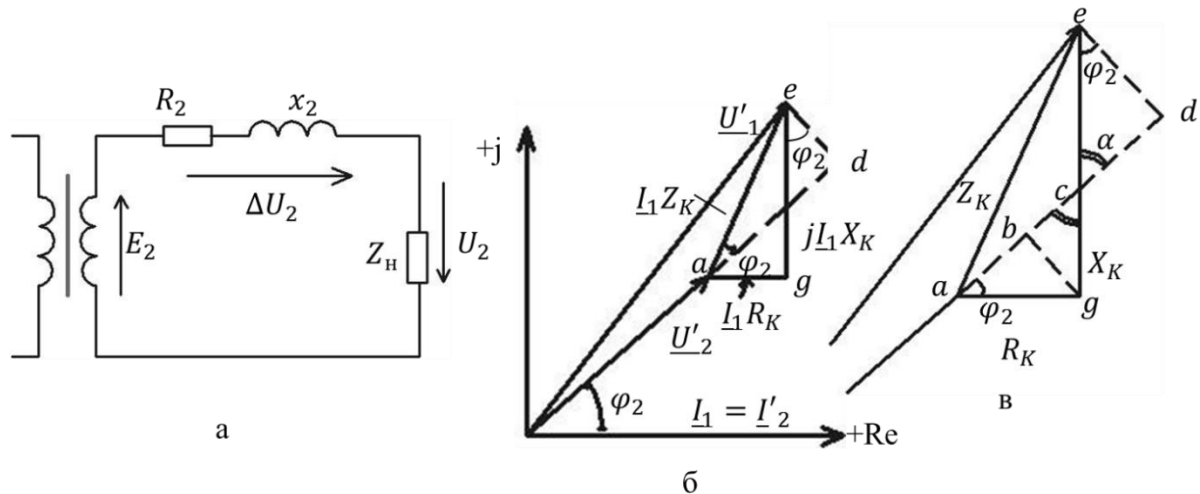


Рис.2.6. Схема цепи вторичной обмотки обычного трансформатора (а); векторная диаграмма (б); треугольник сопротивления  $aeg$  (в) для расчета потери напряжения в обмотках трансформатора

Для вывода зависимости  $U_2 = f(\beta)$  проведем ряд математических операций.

Второй закон Кирхгофа для цепи вторичной обмотки обычного трансформатора (рис. 2.6, а):

$$\underline{E}_2 = \Delta \underline{U}_2 + \underline{U}_2, \text{ откуда } \underline{U}_2 = \underline{E}_2 - \Delta \underline{U}_2 \quad (2.7)$$

1. Определим  $E_2$  и  $\Delta U_2$  (см. лекцию 11):

$$E_2 = \frac{E_1}{n} \approx \frac{U_1}{n}.$$

Для приведенного трансформатора  $U'_2 = nU_2$  или  $\Delta U'_2 = n\Delta U_2$ , откуда

$$\Delta U_2 = \frac{\Delta U'_2}{n}.$$

2. **Потеря напряжения** в обмотках трансформатора  $\Delta U'_2$ :

Из рис. 2.6, б: вектор  $\underline{U}_1 = 0e$ ,  $\Delta \underline{U}'_2 = \underline{U}_1 - \underline{U}'_2 \approx 0d - 0a = ad$ .

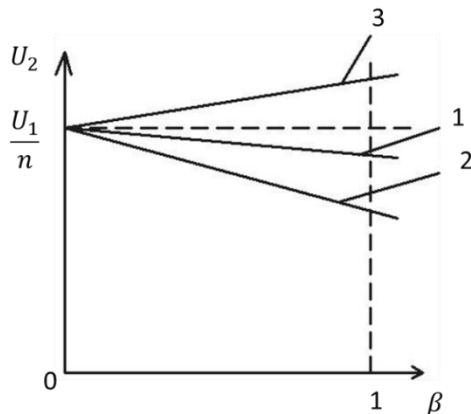
Из рис. 2.6, в:  $\Delta U'_2 = ad = ab + bc + cd = R_k \cos \varphi_2 + gc \cos \alpha + ce \cos \alpha$ .

С учетом того, что угол  $\alpha = 90 - \varphi_2$ ;  $gc + ce = x_k$ , модуль потери напряжения в обмотках трансформатора:

$$|\Delta U'_2| = |I_1| R_K \cos \varphi_2 + |I_1| x_K \cos(90 - \varphi_2) = |I_1| (R_K \cos \varphi_2 + x_K \sin \varphi_2).$$

Уравнение (2.7), с учетом значений  $E_2$ ,  $\Delta U_2$  и  $\Delta U'_2$ , будет иметь вид:

$$U_2 = \frac{U_1}{n} - \frac{\beta}{n} (I_{1н} R_k \cos \varphi_2 + I_{1н} x_k \sin \varphi_2), \quad 2.8$$



где  $I_1 = \beta I_{1н}$ ;  $\cos \varphi_2 = \frac{R_n}{Z_n}$ ,  $\sin \varphi_2 = \frac{x_n}{Z_n}$

Первое слагаемое уравнения 2.8 соответствует **холостому ходу трансформатора**. На (рис. 2.7) изображены **внешние характеристики** при различных нагрузках трансформатора.

Рис. 2.7. Внешние характеристики трансформатора при:

- 1 – активной нагрузке:  $R_n \neq 0$ ,  $x_n = 0$ ; ( $\varphi_2 = 0$ );
- 2 – активно-индуктивной нагрузке:  $R_n \neq 0$ ,  $x_L \neq 0$ ; ( $\varphi_2 > 0$ );
- 3 – активно-емкостной нагрузке:  $R_n \neq 0$ ,  $x_C \neq 0$  ( $\varphi_2 < 0$ ).

В большинстве случаев нагрузки трансформатора являются активными или активно-индуктивными, поэтому с увеличением нагрузки напряжение  $U_2$  на ней уменьшается (рис. 2.7).