

# Лекция №6

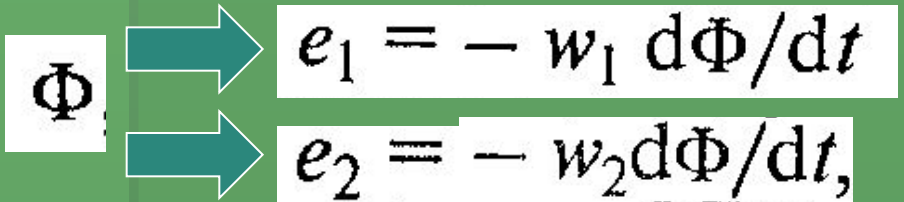
*(Фамилия И. О. ; группа; Число)*

**Вопросы лекции:** режим холостого хода, режим работы трансформатора под нагрузкой, схема замещения трансформатора, определение параметров схемы замещения трансформатора; эксплуатационные показатели трансформатора;

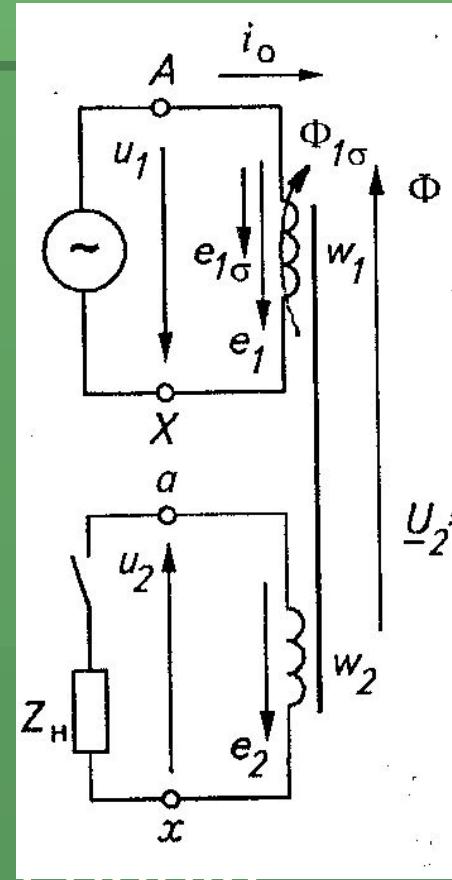
## **7. Рабочий процесс трансформатора**

# 7.1 Режим холостого хода

- Холостой ход – это ...  $i_2 = 0$



- Идеальный тр-р  $\Phi_{1\sigma} = 0$
- магнитные потери также равны нулю



Тогда по 2-му закону Кирхгофа  $u_1 = i_0 R_1 - e_1$ ,

а так как  $i_0 R_1 \approx 0$   $u_1 = -e_1 = w_1 \frac{d\Phi}{dt}$ , откуда

$$\Phi = \int \frac{u_1}{w_1} dt = \frac{U_{1m}}{w_1} \int \sin \omega t dt = -\frac{U_{1m}}{w_1 \omega} \cos \omega t + C. \quad \text{так как } C=0$$

$$\Phi = \Phi_m \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right), \quad \text{где} \quad \Phi_m = \frac{U_{1m}}{w_1 \omega} \quad \text{Тогда ЭДС}$$

$$e_1 = -w_1 \frac{d\Phi}{dt} = -w_1 \frac{d}{dt} \left[ \Phi_m \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) \right] = -w_1 \omega \Phi_m \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) = E_{1m} \sin(\omega t - \pi),$$

где  $E_{1m} = 2\pi f w_1 \Phi_m$  Действующие значения

$$E_1 = \frac{E_{1m}}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi f w_1 \Phi_m}{\sqrt{2}} = 4,44 f w_1 \Phi_m;$$

$$E_2 = 4,44 f w_2 \Phi_m.$$

Фазовые соотношения  $U, e, \Phi, \text{ и } I \dots$

Характер намагничивающего тока ...

Так как  $\Phi = f(I_{op}, F_o)$ , нелинейная, то и  $i_o \dots$

$$I_{op} \quad I_{oa} \approx 0,1 I_o \quad \longrightarrow \quad \underline{I}_o = \underline{I}_{oa} + \underline{I}_{op}; \quad I_o = \sqrt{I_{oa}^2 + I_{op}^2}.$$

ЭДС от потока рассеяния  $E_{1\sigma} = 4,44 f w_1 \Phi_{1\sigma}$

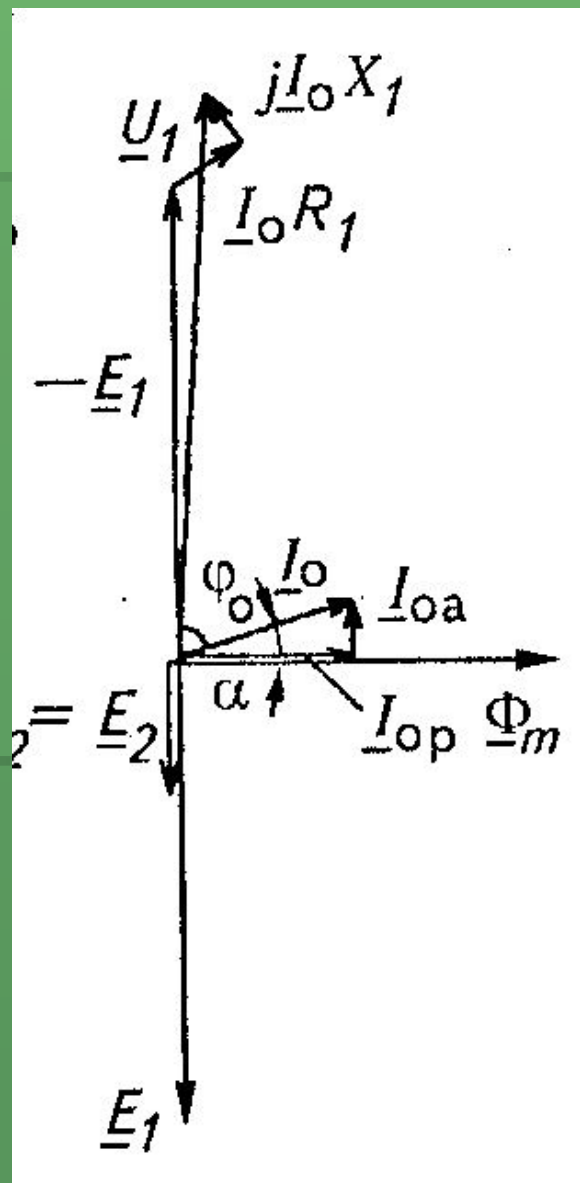
$\Phi_{1\sigma}$  пропорционален  $F_o = I_o w_1$ , и ...  $I_o$

В соответствии с ...  $E_{1\sigma} = -j I_o X_1$ , где ...

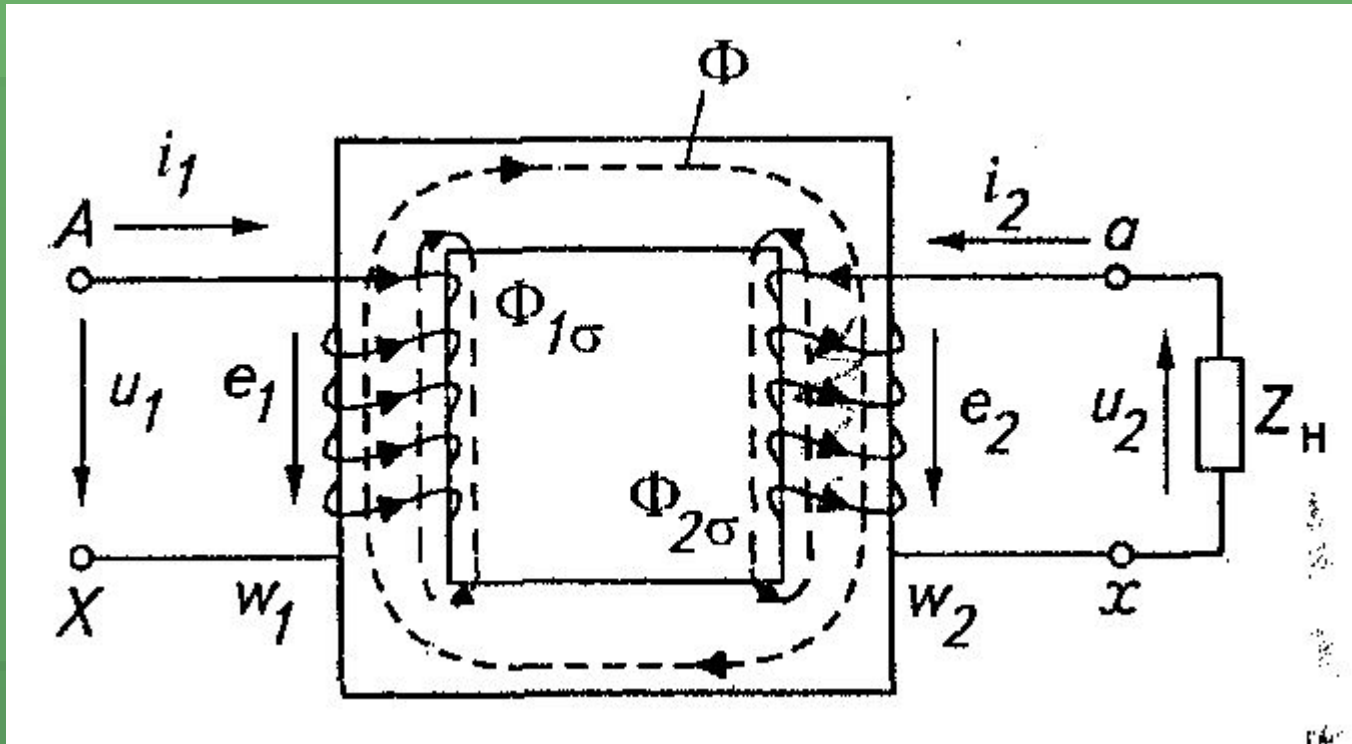
В комплексной форме:  $\underline{U}_1 = -\underline{E}_1 + \underline{I}_o R_1 + j \underline{I}_o X_1;$

$$\underline{I}_o = \underline{I}_{oa} + \underline{I}_{op}$$

- Векторная диаграмма



## 7.2 Режим работы трансформатора под нагрузкой



$$e_2 \rightarrow i_2 \rightarrow i_2 w_2 \rightarrow \begin{matrix} \Phi_2 \\ \Phi_{2\sigma} \end{matrix} \rightarrow \Phi_1 + \Phi_2 \rightarrow e_1 = -w_1 \frac{d}{dt} (\Phi_1 + \Phi_2).$$

- Так как  $u_1 \approx e_1$ ;  $U_1 \approx E_1$ ,  $\bar{E}_1 = 4,44f\omega_1\Phi_m$
- Следовательно  $\Phi_1 + \Phi_2 = \Phi_0 - \text{Const}$
- 
- Тогда и  $i_1\omega_1 + i_2\omega_2 - \text{Const}$ , т. е.  $\underline{F}_1 + \underline{F}_2 = \underline{F}_0$
- или  $\sqrt{2}\underline{I}_1\omega_1 + \sqrt{2}\underline{I}_2\omega_2 = \sqrt{2}\underline{I}_0\omega_1$ , где ...

- Закон магнитного равновесия:  $\underline{F}_1 = \underline{F}_0 + (-\underline{F}_2)$

Тогда ток  $\underline{I}_1 = \underline{I}_0 + \left(-\underline{I}_2 \frac{\omega_2}{\omega_1}\right)$ , где  $-\underline{I}_2 \frac{\omega_2}{\omega_1}$  - нагрузочная составляющая тока первичной об-ки

- Векторные
- уравнения:

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

$$\underline{U}_2 = \underline{E}_2 - \underline{I}_2 R_2 - j \underline{I}_2 X_2;$$

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_0 - \underline{I}_2 \frac{w_2}{w_1},$$

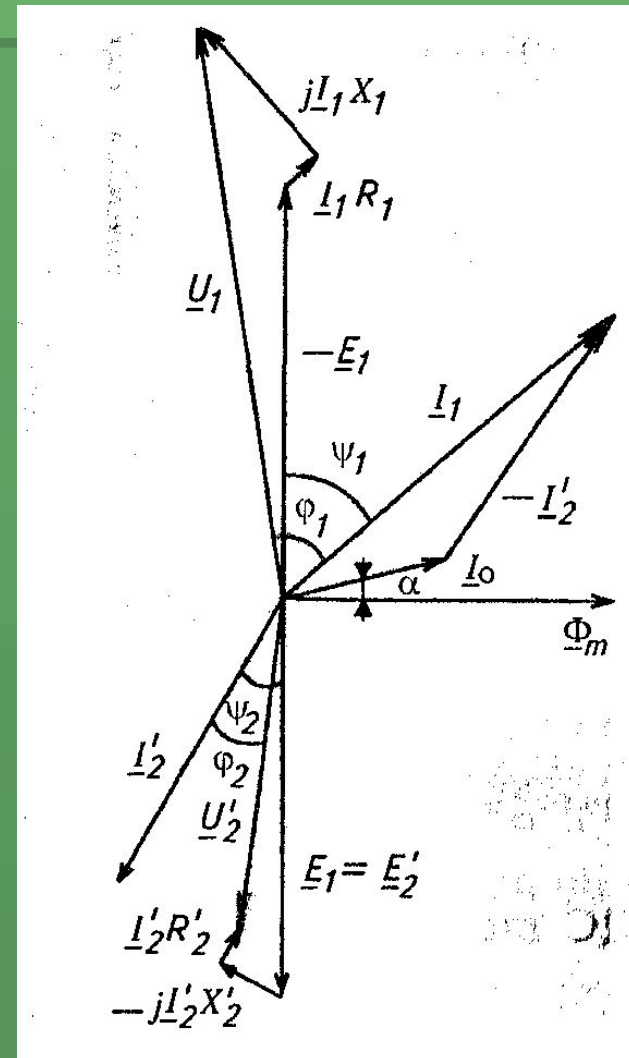
- Так как  $w_1 \neq w_2$ , то и

$$E_1 \neq E_2 \text{ и } I_1 \neq I_2.$$

$$E'_2 = \frac{E_2}{w_2} w_1; \quad I'_2 = I_2 \frac{w_2}{w_1}.$$

$$R'_2 = R_2 \left( \frac{w_1}{w_2} \right)^2; \quad X'_2 = X_2 \left( \frac{w_1}{w_2} \right)^2; \quad Z'_H = Z_H \left( \frac{w_1}{w_2} \right)^2.$$

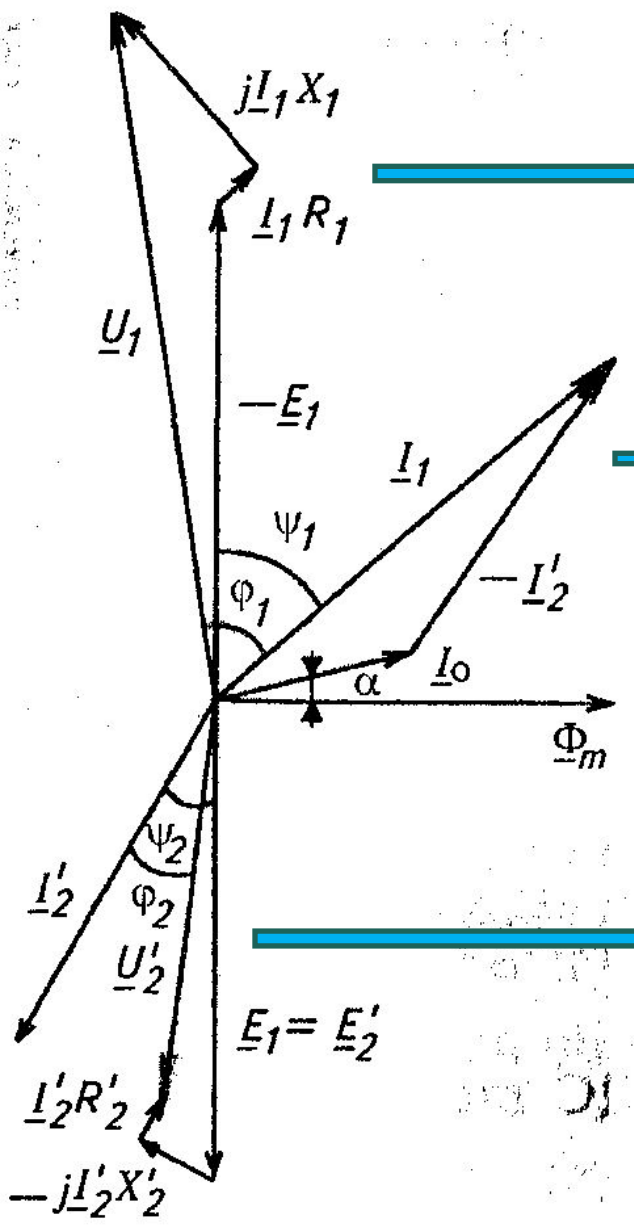
## Векторная диаграмма





- Порядок построения векторной диаграммы:
- Известно  $K, R_1, X_1, R_2, X_2, R_H, X_H, U_1$
- 1) Определяем:  $\underline{U}'_2 = U_2 K; \underline{R}'_2 = R_2 K^2; \underline{X}'_2 = X_2 K^2. \quad Z_H = \sqrt{R_H^2 + X_H^2}$   
 $Z'_H = Z_H K^2 \quad I'_2 = U'_2 / Z'_H \quad \varphi_2 = \arctg \frac{X_H}{R_H}$
- 2) Строим вектор  $\underline{U}'_2$  и под углом  $\varphi_2$  ток  $\underline{I}'_2$
- 3) В соответствии с  $\underline{U}'_2 = \underline{E}'_2 - \underline{I}'_2 R'_2 - j \underline{I}'_2 X'_2$ , строим  $\underline{E}'_2$
- 4) Определяем  $\Phi_m = E_1 / (4,44 f w_1)$ . И ...
- 5) Под углом  $5 \dots 10^\circ$  откладываем  $\underline{I}_0$
- 6) Строим вектор тока  $\underline{I}_1 = \underline{I}_0 - \underline{I}'_2$
- 7) Строим вектор  $\underline{U}_1 = -\underline{E}_1 + \underline{I}_1 R_1 + j \underline{I}_1 X_1;$
- 8) Корректируем масштабы тока и напряжения

# Энергетический баланс трансформатора



$$P_1 = U_1 I_1 \cos \varphi_1.$$

$$U_1 \cos \varphi_1 = I_1 R_1 + E_1 \cos \psi_1.$$

$$P_1 = I_1^2 R_1 + E_1 I_1 \cos \psi_1.$$

$$I_1 \cos \psi_1 = I_{0a} + I'_2 \cos \psi_2$$

$$P_1 = I_1^2 R_1 + E_1 I_{0a} + E_1 I'_2 \cos \psi_2 =$$

$$= \Delta P_{\text{эл}} + \Delta P_M + P_{\text{эм}},$$

$$E'_2 \cos \psi_2 = I'_2 R'_2 + U'_2 \cos \varphi_2.$$

$$P_1 = \Delta P_{\text{эл}} + \Delta P_M + I_2'^2 R_2' + U_2' I_2' \cos \varphi_2 =$$

$$= \Delta P_{\text{эл}} + \Delta P_M + \Delta P_{\text{эл}2} + P_2,$$

- 7.3 Схема замещения трансформатора

- Векторные уравнения

$$\underline{U}_1 = -\underline{E}_1 + \underline{I}_1 \underline{Z}_1;$$

- понижающего тр-ра,

$$\underline{U}'_2 = \underline{E}'_2 - \underline{I}'_2 \underline{Z}'_2;$$

- где ...

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_0 - \underline{I}'_2,$$

- При отсутствии насыщения  $\Phi \equiv I_0$ .

- тогда  $\underline{E}_1 = \underline{E}'_2 = -\underline{I}_0 \underline{Z}_m$  ИЛИ  $\underline{I}'_2 \underline{Z}'_H = -\underline{I}_0 \underline{Z}_m - \underline{I}'_2 \underline{Z}'_2$ .

- откуда  $\underline{I}'_2 = -\underline{I}_0 \frac{\underline{Z}_m}{\underline{Z}'_2 + \underline{Z}'_H}$  и после подстановки

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_0 + \underline{I}_0 \frac{\underline{Z}_m}{\underline{Z}'_2 + \underline{Z}'_H}$$



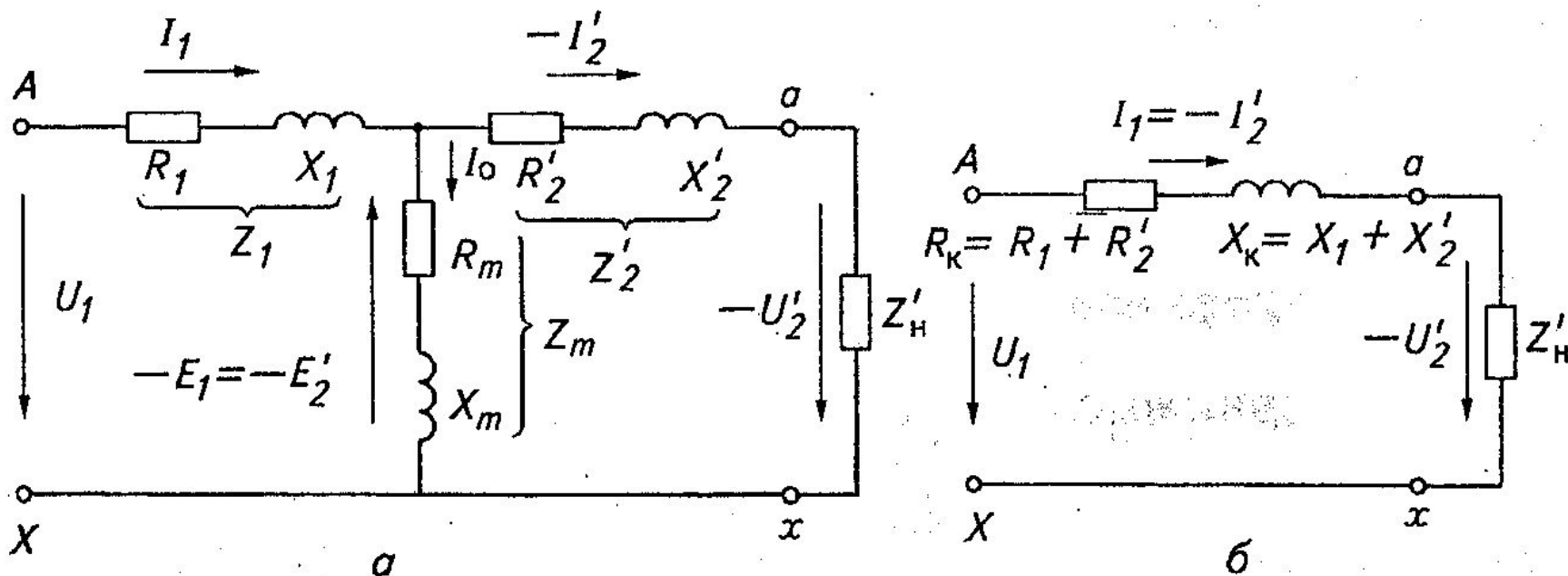
$$\underline{I}_0 = \underline{I}_1 \frac{\underline{Z}'_2 + \underline{Z}'_H}{\underline{Z}_m + \underline{Z}'_2 + \underline{Z}'_H}$$

- Окончательно имеем:

$$\underline{U}_1 = \underline{I}_0 \underline{Z}_m + \underline{I}_1 \underline{Z}_1 = \underline{I}_1 \frac{\underline{Z}'_2 + \underline{Z}'_H}{\underline{Z}_m + \underline{Z}'_2 + \underline{Z}'_H} \underline{Z}_m + \underline{I}_1 \underline{Z}_1.$$

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{U}_1}{\underline{Z}_1 + \frac{\underline{Z}_m (\underline{Z}'_2 + \underline{Z}'_H)}{\underline{Z}_m + \underline{Z}'_2 + \underline{Z}'_H}} = \frac{\underline{U}_1}{\underline{Z}_{\text{ЭКВ}}}.$$

уравнению соответствует схема:

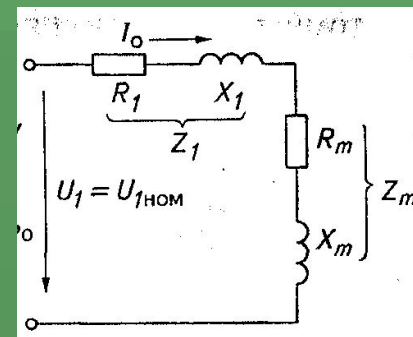
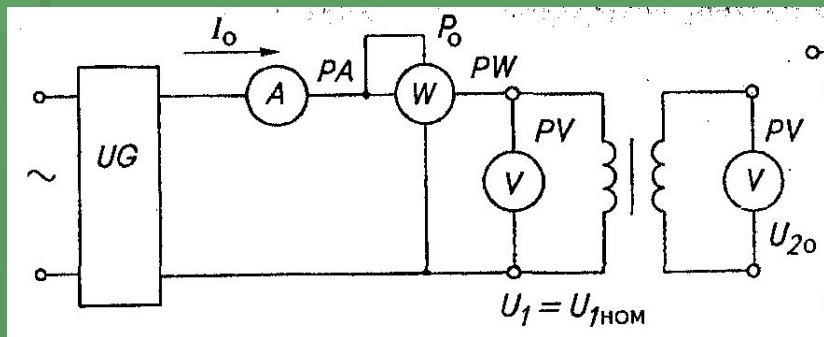


- 7.4 Определение параметров схемы замещения трансформатора

- Опыт холостого хода

- схема опыта

- схема замещения



$$Z_1 + Z_m = U_1 / I_0 \approx Z_m;$$

$$R_1 + R_m = P_0 / I_0^2 \approx R_m;$$

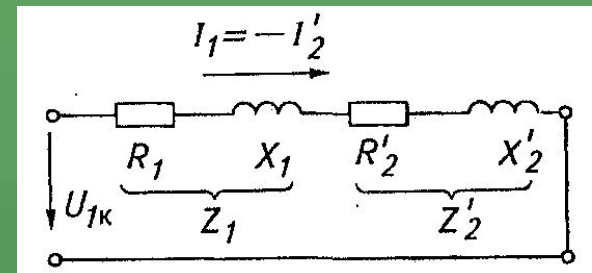
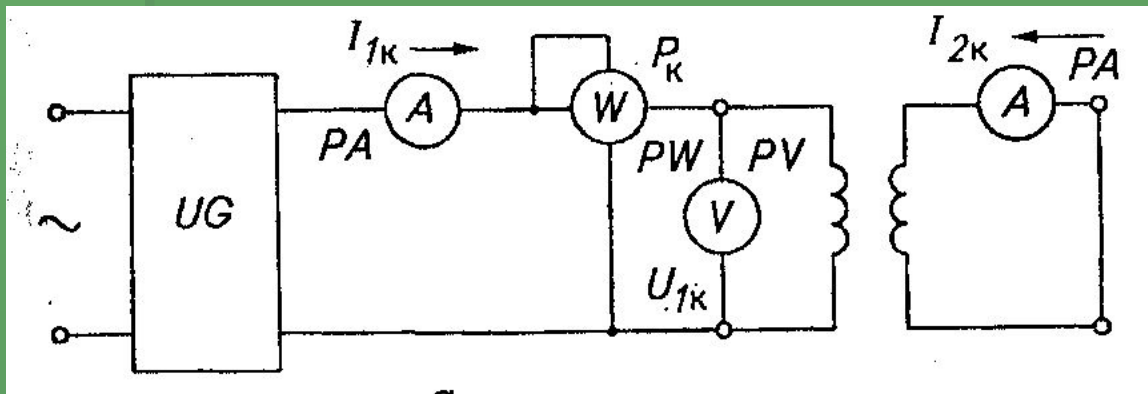
$$X_1 + X_m = \sqrt{Z_m^2 - R_m^2}.$$

- Так как  $Z_1 \ll Z_m$ ,  $U_1 \approx E_1$  фактически определяются  $R_m$  и  $X_m$ .
- $P_0$  - потери в стали (потери ХХ)
- для трёхфазных трансформаторов:

$$I_0 = \frac{1}{3}(I_{0A} + I_{0B} + I_{0C});$$

$$P_0 = \frac{1}{3}(P'_0 + P''_0).$$

- Опыт короткого замыкания



$$\bar{u}_K \% = 4,5 \dots 14.$$

$$Z_K = Z_1 + Z'_2 = U_{1K} / I_{1K};$$

$$R_K = R_1 + R'_2 = P_K / I_{1K}^2;$$

$$X_K = X_1 + X'_2 = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2}.$$

- Приведение полученных значений к расчётной температуре обмоток  $75^\circ$

$$R_{K75} = R_K \frac{310}{235+t};$$

$$Z_{K75} = \sqrt{R_{K75}^2 + X_K^2},$$

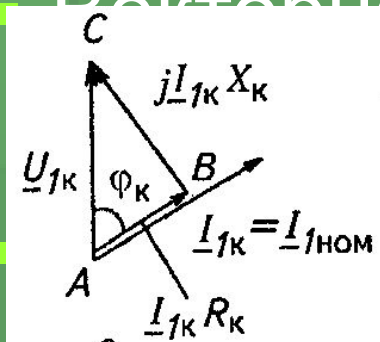
$$u_K \% = \frac{I_{1НОМ} Z_{K75}}{U_{1НОМ}} \cdot 100;$$

$$P_{K75} = I_{1НОМ}^2 R_{K75};$$

$$Z_1 = Z_2' = 0,5 Z_K,$$

$$R_1 \approx R_2', \quad X_1 \approx X_2'.$$

следовательно



$$u_{ка} = \frac{I_{1НОМ} R_{K75}}{U_{1НОМ}} \cdot 100;$$

$$u_{кр} = \frac{I_{1НОМ} X_K}{U_{1НОМ}} \cdot 100.$$

$$u_K = \sqrt{u_{ка}^2 + u_{кр}^2};$$

или  $u_{ка} = u_K \cos \varphi_K; u_{кр} = u_K \sin \varphi_K,$

используются при определении

- изменения  $U$ ; тока уст-ся КЗ

$$I_K = \frac{100}{u_K \%} \cdot I_{НОМ}.$$



# 7.5. Эксплуатационные показатели трансформатора

## Изменение напряжения

$$\Delta U \% = \frac{U_{20} - U_2}{U_{20}} \cdot 100.$$

Так как  $KU_{20} = U'_{20} = U_{1НОМ}$  и  $KU_2 = U'_2$ , то

$$\Delta U \% = \frac{U_{1НОМ} - U'_2}{U_{1НОМ}} \cdot 100.$$

$$OA - OB = BC + CA,$$

т. е.

$$U_{1НОМ} - U'_2 = I_{1НОМ} R_1 \cos \varphi_2 + I_{1НОМ} X_1 \sin \varphi_2.$$

следовательно

$$\Delta U \% = \frac{I_{1НОМ} R_1 \cos \varphi_2 + I_{1НОМ} X_1 \sin \varphi_2}{U_{1НОМ}} \cdot 100,$$

или

$$\Delta U \% = u_{ка} \% \cos \varphi_2 + u_{кр} \% \sin \varphi_2.$$

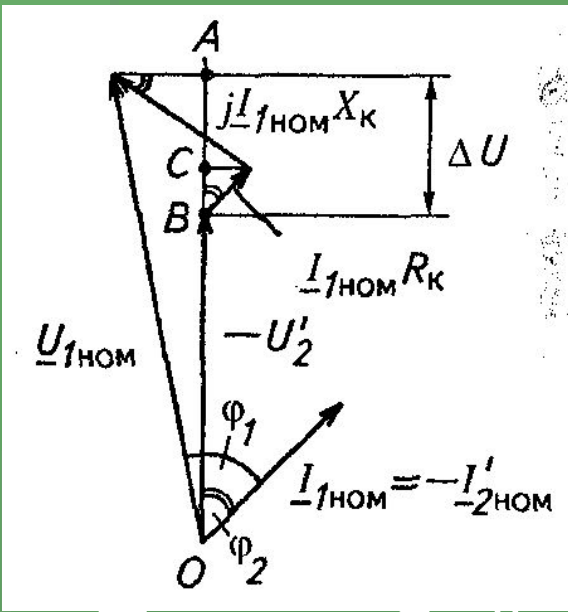
При любой нагрузке

$$\Delta U \% = \beta (u_{ка} \% \cos \varphi_2 + u_{кр} \% \sin \varphi_2),$$

где

$$\beta = I_2 / I_{2НОМ} = I_1 / I_{1НОМ} = S / S_{НОМ}$$

к-т нагр-ки





- Зависимость

$$\Delta \hat{U} \% = f(\varphi_2)$$

- При  $\varphi_2 = 0$

$$\Delta U \% = \beta u_{ка}$$

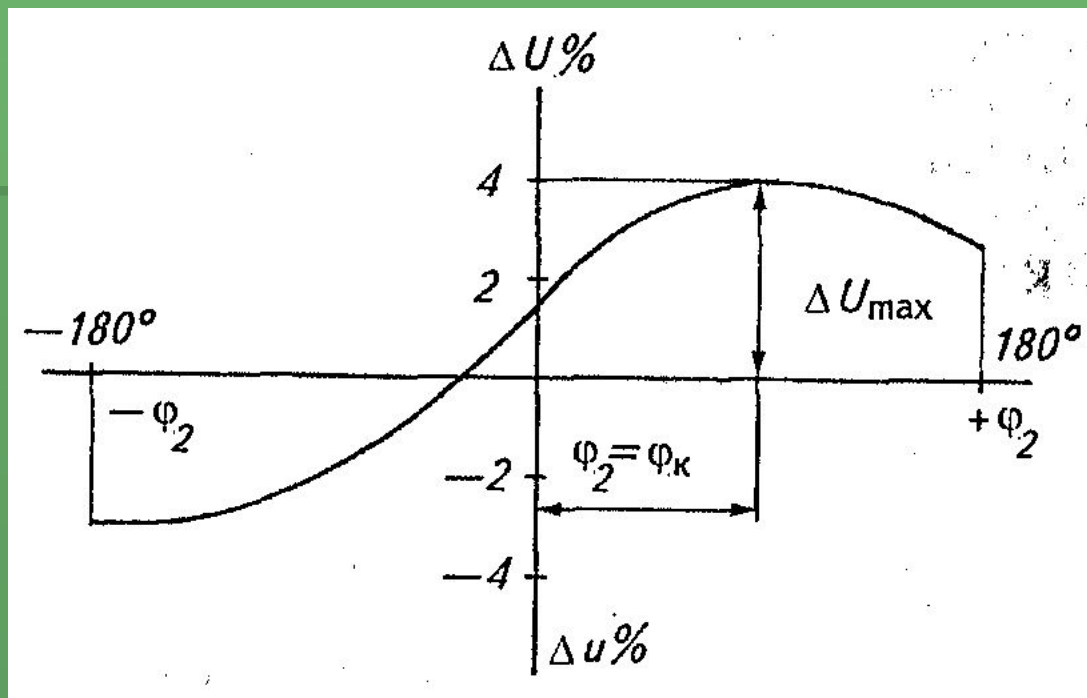
- При  $\varphi_2 > 0$   
 $\Delta U \%$  увели-ся

- При  $\varphi_2 = \varphi_k$ ,  
 $\Delta U \%$  макс, где

$$\varphi_k = \arctg X_k / R_k$$

- При  $\varphi_2 < 0$   $\Delta U \%$  меняет знак, т.е. потоки рассеяния подмагничивают тр-р

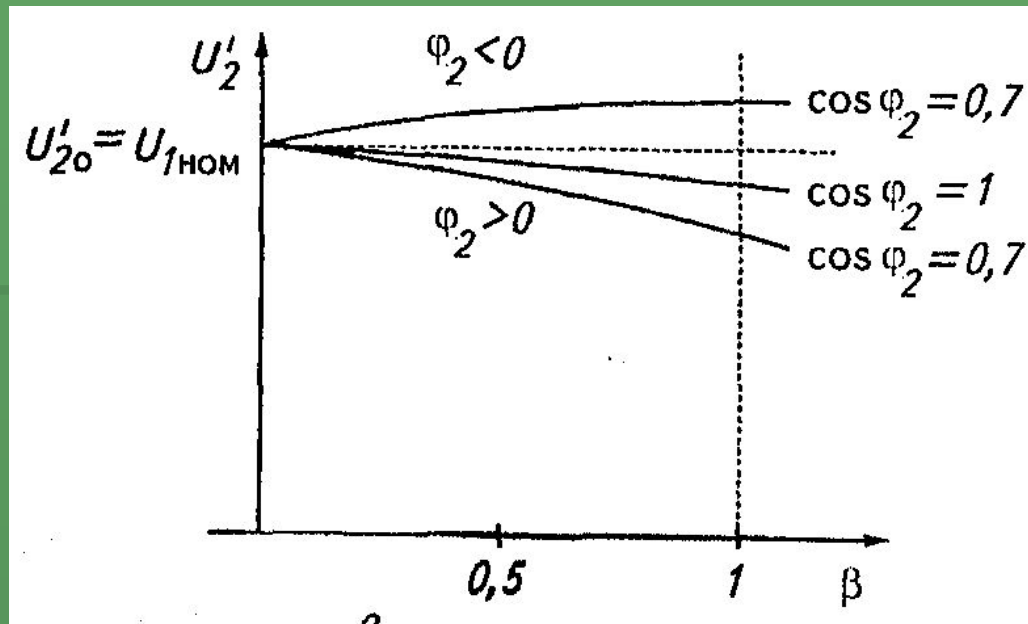
- Для уменьшения  $\Delta U \%$  следует уменьшать потоки рассеяния



- Внешние характеристики
- Внешней характеристикой называется ...

$U_2 = f(I_2)$  или  $U_2 = f(\beta)$  при  $U_1 = U_{1\text{НОМ}} = \text{const}$   $\cos \varphi_2 = \text{const}$

$$U'_2 = U_{1\text{НОМ}} \left( 1 - \frac{\Delta U \%}{100} \right),$$



# КПД трансформатора

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{U_2 I_2 \cos \varphi_2}{U_1 I_1 \cos \varphi_1}, \quad \text{или} \quad \eta = \frac{P_1 - \Delta P}{P_1} = 1 - \frac{\Delta P}{P_2 + \Delta P}, \quad \text{где } \Delta P \text{ - ...}$$

$$\Delta P_{\text{эл}} = \Delta P_{\text{эл1}} + \Delta P_{\text{эл2}} = I_1^2 R_1 + I_2'^2 R_2' = I_2'^2 R_K = \beta^2 I_{2\text{НОМ}}'^2 R_K = \beta^2 P_K, \quad \Delta P_M = P_0.$$

$$P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_2 = \beta S_{\text{НОМ}} \cos \varphi_2,$$

$$\eta = 1 - \frac{\Delta P_{\text{эл1}} + \Delta P_{\text{эл2}} + \Delta P_M}{P_2 + \Delta P_{\text{эл1}} + \Delta P_{\text{эл2}} + \Delta P_M}.$$

■ Максимум КПД при

$$\beta^2 P_K = P_0,$$

$$\beta = \sqrt{\frac{P_0}{P_K}} \approx \sqrt{0,2 \dots 0,25} = 0,45 \dots 0,5,$$

