

Расчет трехфазного трансформатора

$$S_n := 180 \text{ kVA} \quad U_{\text{ВН}} := 6 \text{ kV} \quad U_{\text{НН}} := 0.525 \text{ kV} \quad u_k := 5.5 \% \quad i_0 := 6 \%$$

$$X_k := 10.7 \text{ Ом} \quad \beta := 1 \quad \cos \phi_2 := 0.8 \quad \eta := 0.976$$

1) начертим схему трансформатора:

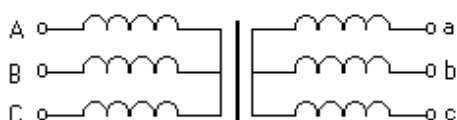


Схема соединения : звезда-звезда

Коэффициент трансформации линейных напряжений $K_L := \frac{U_{\text{ВН}}}{U_{\text{НН}}} = \frac{6}{0.525} \quad K_L = 11.43$

Номинальный ток первичной обмотки $I_{1n} := \frac{S_n}{U_{\text{ВН}} \cdot \sqrt{3}} = \frac{180}{6 \cdot \sqrt{3}} \quad I_{1n} = 17.32 \text{ A}$

Номинальный ток вторичной обмотки $I_{2n} := \frac{S_n}{U_{\text{НН}} \cdot \sqrt{3}} = \frac{180}{0.525 \cdot \sqrt{3}} \quad I_{2n} = 197.95 \text{ A}$

Фазные напряжения

$$U_{\phi 1} := \frac{U_{\text{ВН}}}{\sqrt{3}} = \frac{6}{\sqrt{3}} = 3.46 \text{ кВ} \quad U_{\phi 2} := \frac{U_{\text{НН}}}{\sqrt{3}} = \frac{0.525}{\sqrt{3}} = 0.3 \text{ кВ}$$

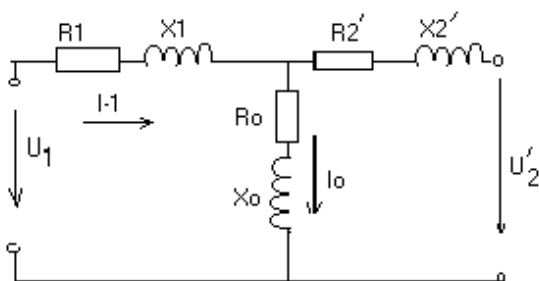
Вычислим коэффициент трансформации фазных и линейных напряжений:

Коэффициент трансформации линейных напряжений $K_L := \frac{U_{\text{ВН}}}{U_{\text{НН}}} = \frac{6}{0.525} \quad K_L = 11.43$

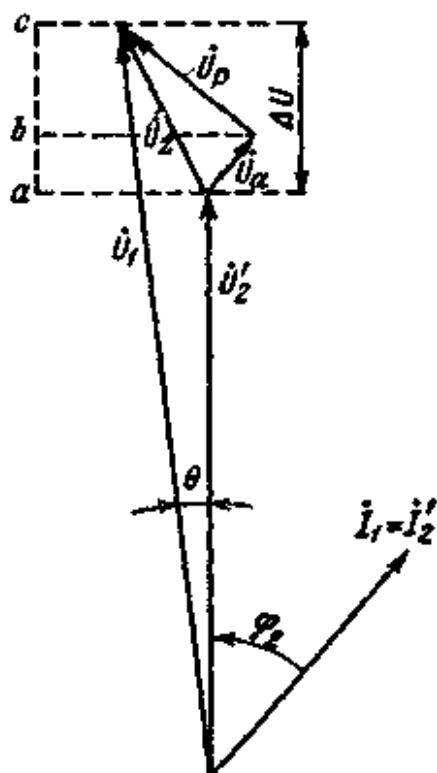
Коэффициент трансформации фазных напряжений $K_{\phi} := \frac{U_{\phi 1}}{U_{\phi 2}} = \frac{3.46}{0.3} \quad K_{\phi} = 11.43$

Начертим упрощенную схему замещения трансформатора:

T - образная схема замещения



Схематично строим векторную диаграмму



Ток холостого тока $I_0 := I_{1n} i_0 = 17.32 \cdot 6 \% \quad I_0 = 1.04 \quad \text{A}$

Мощность потерь холостого хода $P_0 := 3 \cdot U_{\phi 1} \cdot I_0 = 3 \cdot 3.46 \cdot 1.04 \quad P_0 = 10.8 \quad \text{kBt}$

В опыте короткого замыкания $I_{\text{кф}} := I_{1n} \quad I_{\text{кф}} = 17.32 \cdot \text{A}$

$U_{\text{кф}} := u_k \cdot 1000 \cdot U_{\text{вн}} = 5.5 \% \cdot 1000 \cdot 6 = 330 \cdot \text{B}$

Сопротивление короткого замыкания $Z_k := \frac{U_{\text{кф}}}{I_{\text{кф}}} = \frac{330}{17.32} \quad Z_k = 19.05 \cdot \text{Om}$

$R_k := \sqrt{Z_k^2 - X_k^2} = \sqrt{19.05^2 - 10.7^2} \quad R_k = 15.76 \cdot \text{Om}$

Мощность потерь короткого замыкания $P_k := \frac{R_k \cdot 3 \cdot I_{\text{кф}}^2}{1000} = \frac{15.76 \cdot 3 \cdot 17.32^2}{1000} \quad P_k = 14.19 \quad \text{kBm}$

Активная и реактивная составляющая потерь напряжения в процентах

$$u_a := u_k \cdot \frac{R_k}{Z_k} = 5.5 \cdot \frac{15.76}{19.05} \quad u_a = 4.55 \%$$

$$u_p := \sqrt{u_k^2 - u_a^2} = \sqrt{5.5^2 - 4.55^2} \quad u_p = 3.09 \quad \%$$

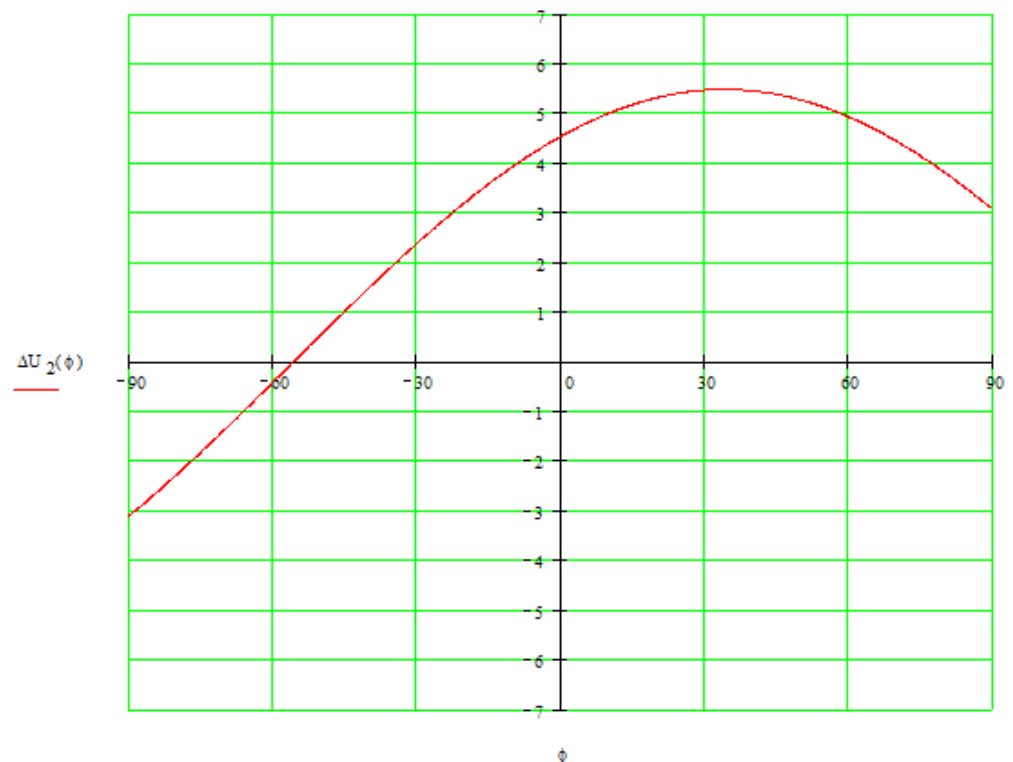
По условию задачи $\beta := 1$

Потеря напряжения во вторичной обмотке

$$\Delta U_2(\phi_2) = \beta \cdot (u_a \cdot \cos(\phi_2) + u_p \cdot \sin(\phi_2)) \quad \Delta U_2(\phi_2) = 4.55 \cdot \cos(\phi_2) + 3.09 \cdot \sin(\phi_2)$$

При $\phi_2 := -90, -60, -30, 0, 30, 60, 90$ Находим процентное изменение напряжения во вторичной обмотке

ϕ_2	$\Delta U_2(\phi_2)$
-90	-3.09
-60	-0.4
-30	2.4
0	4.55
30	5.49
60	4.95
90	3.09



Строим графики семейства выходных характеристик $U_2 = f(\beta)$ при $\cos \phi_2 = 0.5, 0.8$ $\phi_2 > 0$ $\phi_2 < 0$

Высшее линейное напряжение во вторичной обмотке $U_{HH} = 525 \text{ В}$ $U_{2.0} := \frac{U_{HH}}{\sqrt{3}}$

Напряжение холостого хода $U_{2.0} := 300 \text{ В}$

Потеря напряжения во вторичной обмотке $\Delta U_2(\beta) = \beta \cdot (u_a \cdot \cos \phi_2 + u_p \cdot \sin \phi_2)$

$$1) \quad \cos \phi_2 := 0.5 \quad \sin \phi_2 := \sqrt{1 - \cos^2 \phi_2} \quad \sin \phi_2 = 0.87$$

$$\Delta U_{2.1}(\beta) := \beta \cdot (u_a \cdot \cos \phi_2 + u_p \cdot \sin \phi_2) = \beta \cdot (4.55 \cdot 0.5 + 3.09 \cdot 0.87) = 4.95 \cdot \beta$$

$$\Delta U_{2.1}(\beta) := 4.95 \cdot \beta$$

Вычисляем для различных β : $\beta := 0, 0.25, 1$

Напряжение на зажимах вторичной обмотке

$$U_{2,1}(\beta) := \frac{U_{2,0}}{100} \cdot (100 - 4.95 \cdot \beta) \rightarrow 300 - 4.95 \cdot \beta$$

β	$U_{2,1}(\beta)$
0	300
0.25	296.29
0.5	292.57
0.75	288.86
1	285.15

$$2) \quad \cos \phi_2 := 0.5 \quad \sin \phi_2 := -\sqrt{1 - \cos^2 \phi_2} \quad \sin \phi_2 = -0.87$$

$$\Delta U_{2,2}(\beta) := \beta \cdot (u_a \cdot \cos \phi_2 + u_p \cdot \sin \phi_2) = \beta \cdot (4.55 \cdot 0.5 - 3.09 \cdot 0.87) = -0.4 \cdot \beta$$

$$\Delta U_{2,2}(\beta) := -0.4 \cdot \beta \quad \text{Вычисляем для различных } \beta : \quad \beta := 0, 0.25..1$$

Напряжение на зажимах вторичной обмотке

$$U_{2,2}(\beta) := \frac{U_{2,0}}{100} \cdot (100 + 0.4 \cdot \beta) \rightarrow 300 + 0.4 \cdot \beta$$

β	$U_{2,2}(\beta)$
0	300
0.25	300.3
0.5	300.6
0.75	300.9
1	301.2

$$3) \quad \cos \phi_2 := 0.8 \quad \sin \phi_2 := \sqrt{1 - \cos^2 \phi_2} \quad \sin \phi_2 = 0.6$$

$$\Delta U_{2,3}(\beta) := \beta \cdot (u_a \cdot \cos \phi_2 + u_p \cdot \sin \phi_2) = \beta \cdot (4.55 \cdot 0.8 + 3.09 \cdot 0.6) = 5.49 \cdot \beta$$

$$\Delta U_{2,3}(\beta) := 5.49 \cdot \beta \quad \text{Вычисляем для различных } \beta : \quad \beta := 0, 0.25..1$$

Напряжение на зажимах вторичной обмотке

$$U_{2,3}(\beta) := \frac{U_{2,0}}{100} \cdot (100 - 5.49 \cdot \beta) \rightarrow 300 - 5.49 \cdot \beta$$

β	$U_{2,3}(\beta)$
0	300
0.25	295.88
0.5	291.76
0.75	287.65
1	283.53

$$4) \quad \cos \phi_2 := 0.8 \quad \sin \phi_2 := -\sqrt{1 - \cos^2 \phi_2} \quad \sin \phi_2 = -0.6$$

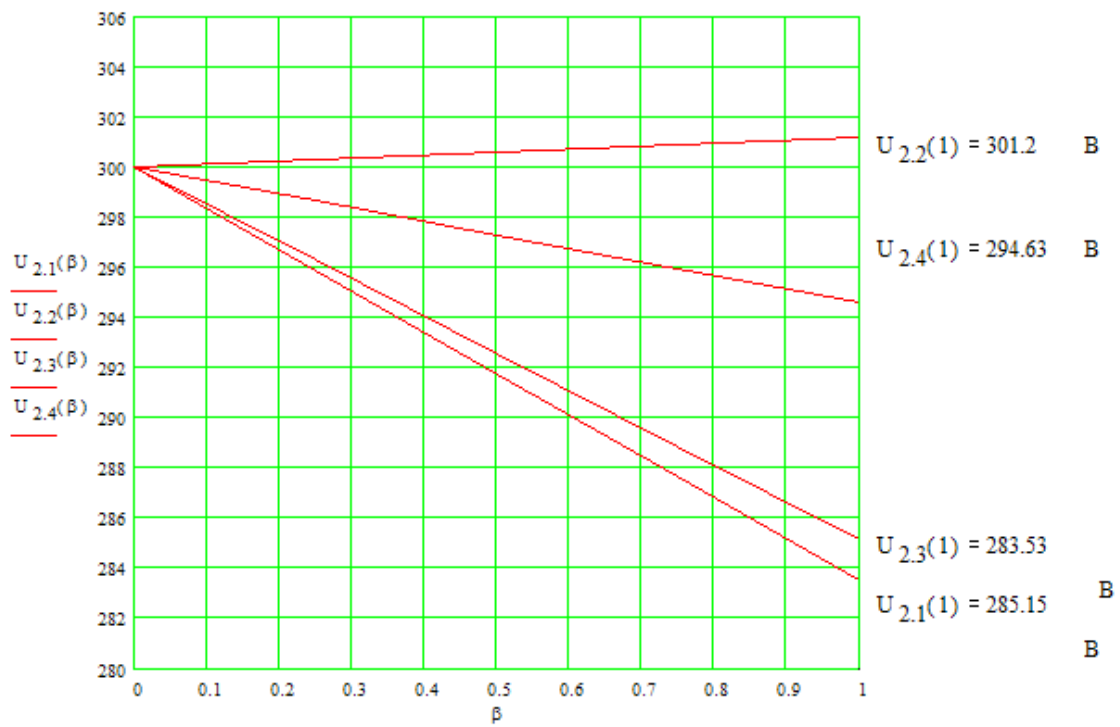
$$\Delta U_{2,3}(\beta) := \beta \cdot (u_a \cdot \cos \phi_2 + u_p \cdot \sin \phi_2) = \beta \cdot (4.55 \cdot 0.8 - 3.09 \cdot 0.6) = 1.79 \cdot \beta$$

$$\Delta U_{2,4}(\beta) := 1.79 \cdot \beta \quad \text{Вычисляем для различных } \beta : \quad \beta := 0, 0.25..1$$

Напряжение на зажимах вторичной обмотке

$$U_{2,4}(\beta) := \frac{U_{2,0}}{100} \cdot (100 - 1.79 \cdot \beta) \rightarrow 300 - 1.79 \cdot \beta$$

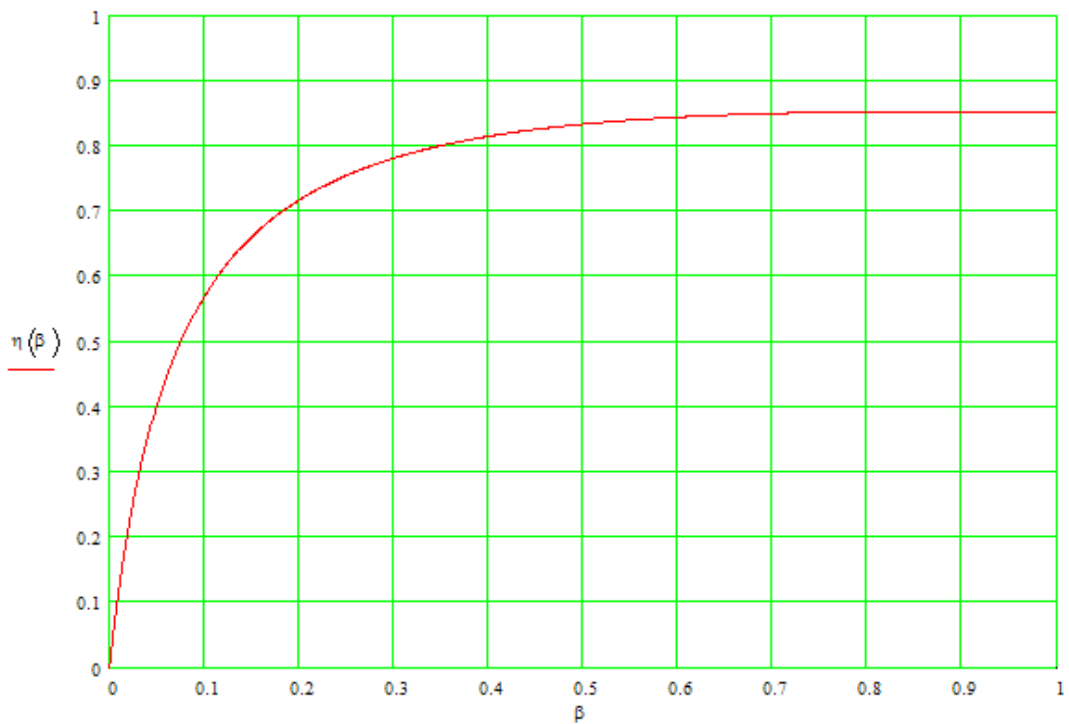
β	$U_{2,4}(\beta)$
0	300
0.25	298.66
0.5	297.32
0.75	295.97
1	294.63



КПД трансформатора при $\cos\phi_2 = 0.8$

$$\eta(\beta) := \frac{\beta \cdot S_n \cdot \cos\phi_2}{\beta \cdot S_n \cdot \cos\phi_2 + P_0 + \beta^2 \cdot P_k} = \frac{\beta \cdot 180 \cdot 0.8}{\beta \cdot 180 \cdot 0.8 + 10.8 + \beta^2 \cdot 14.19}$$

Строим график КПД



β	$\eta(\beta)$
0	0
0.25	0.755
0.5	0.834
0.75	0.852
1	0.852

Максимальный КПД будет при $\beta_m := \sqrt{\frac{P_0}{P_k}} = \sqrt{\frac{10.8}{14.19}} = 0.87$

$$\eta(\beta_m) = \frac{\beta_m \cdot S_n \cdot \cos\phi_2}{\beta_m \cdot S_n \cdot \cos\phi_2 + P_0 + \beta_m^2 \cdot P_k} = \frac{0.87 \cdot 180 \cdot 0.8}{0.87 \cdot 180 \cdot 0.8 + 10.8 + 0.87^2 \cdot 14.19} = 0.85$$

Изменение вторичного напряжения под нагрузкой

$$\Delta U(\beta) = \beta \cdot (u_{k.a.} \cdot \cos\phi_2 + u_{k.p.} \cdot \sin\phi_2) \quad \text{По условию, оно не зависит от нагрузки } (\beta), \text{ поэтому}$$

$$u_{k.a.} \cdot \cos\phi_2 + u_{k.p.} \cdot \sin\phi_2 = 0 \quad 4.55 \cdot \cos\phi_2 + 3.09 \cdot \sin\phi_2 = 0$$

$$\sin\phi_2 = -\cos\phi_2 \cdot \frac{4.55}{3.09} \quad \cos\phi_2^2 + \sin\phi_2^2 = \cos\phi_2^2 \cdot \left[1 + \left(\frac{4.55}{3.09} \right)^2 \right] = 1$$

$$\cos\phi_2 := \sqrt{\frac{1}{1 + \left(\frac{4.55}{3.09} \right)^2}} \quad \cos\phi_2 = 0.56 \quad \sin\phi_2 := -\cos\phi_2 \cdot \frac{4.55}{3.09} \quad \sin\phi_2 = -0.83$$

Проверка $\cos\phi_2^2 + \sin\phi_2^2 = 1 \quad 4.55 \cdot \cos\phi_2 + 3.09 \cdot \sin\phi_2 = 0 \quad \Delta U := 0$

$$\phi_2 = 56^\circ$$