

Национальный исследовательский университет "МЭИ"



---

Кафедра Электромеханики

Расчет магнитной цепи,  
параметров холостого хода  
и короткого замыкания трансформаторов.

Выполнил:	Воробьев А.С.
Группа:	Эл-3-14
Проверил:	Дмитриев М.М.

Москва 2016

Таблица исходных данных.

Вариант	1	
Общие данные		
Мощность	S = 63 кВА	
Схема и группа соединений	Y/Y – 0	
Частота	f = 50 Гц	
Номинальные напряжения	Высокое напряжение	U <sub>ном ВН</sub> = 3300 В
	Низкое напряжение	U <sub>номНН</sub> = 230 В
Число витков	Высокое напряжение	w <sub>ВН</sub> = 710
	Низкое напряжение	w <sub>НН</sub> = 49
Сечение витка	Высокое напряжение	S <sub>ВН</sub> = 9,1 мм <sup>2</sup>
	Низкое напряжение	S <sub>НН</sub> = 84,5 мм <sup>2</sup>
Внутренний диаметр		D <sub>1</sub> = 11,9 см
Радиальные размеры	Высокое напряжение	a <sub>2</sub> = 3,5 см
	Низкое напряжение	a <sub>1</sub> = 1,4 см
Канал между обмотками ВН и НН		a <sub>12</sub> = 1,4 см
Высота обмотки		l <sub>1</sub> = l <sub>2</sub> = 40,0 см
Магнитная система		
Диаметр стержня		d = 11,0 см
Активное сечение	Стержень	П <sub>с</sub> = 80,6 см <sup>2</sup>
	Ярмо	П <sub>я</sub> = 92,4 см <sup>2</sup>
Высота	Стержень	h <sub>с</sub> = 44,0 см
	Ярмо	h <sub>я</sub> = 10,5 см
Расстояние между осями С		C = 26,0 см
Бак		
Масса масла		m <sub>масла</sub> = 170 кг
Масса бака		m <sub>бака</sub> = 80 кг
Контрольные данные		
Потери при КЗ		P <sub>к</sub> = 1280 Вт
Потери при ХХ		P <sub>х</sub> = 265 Вт
Напряжение КЗ		U <sub>к</sub> = 4,5 %
Ток ХХ		I <sub>0</sub> = 2,8 %
Напряжение нулевой последовательности		U <sub>н. п.</sub> = 50 %

Обмотка трансформатора алюминиевая. Магнитная система собрана впереplet, с косыми стыками над крайними стержнями и прямым над средним стержнем, из холоднокатаной стали марки 3404 – 0,35 мм по ГОСТ 21427-83. Напряжение нулевой последовательности в процентах от номинального фазного отнесено к току нулевой последовательности, равному номинальному току. Обмотка НН соединена по схеме звезда с нулевым выводом.

1. Определить фазные значения номинального напряжения, а так же номинальный ток и его фазные значения на сторонах ВН и НН, и коэффициент трансформации (для средней ступени напряжения ВН).

Фазные значения напряжения трехфазного трансформатора при соединении в звезду:

$$U_{1\phi} = \frac{U_{\text{ном ВН}}}{\sqrt{3}} = \frac{3300}{\sqrt{3}} = 1905 \text{ В}$$
$$U_{2\phi} = \frac{U_{\text{ном НН}}}{\sqrt{3}} = \frac{230}{\sqrt{3}} = 133 \text{ В}$$

Номинальный линейный и фазный ток при соединении обмоток в звезду определяется по формуле:

$$I_{\text{номВН}} = I_{\phi\text{ВН}} = \frac{S}{U_{\text{номВН}} * \sqrt{3}} = \frac{63 * 10^3}{3300 * \sqrt{3}} = 11,0 \text{ А}$$
$$I_{\text{номНН}} = I_{\phi\text{НН}} = \frac{S}{U_{\text{номНН}} * \sqrt{3}} = \frac{63 * 10^3}{230 * \sqrt{3}} = 158,1 \text{ А}$$

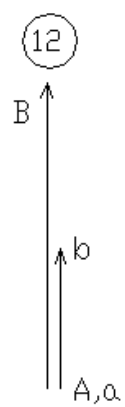
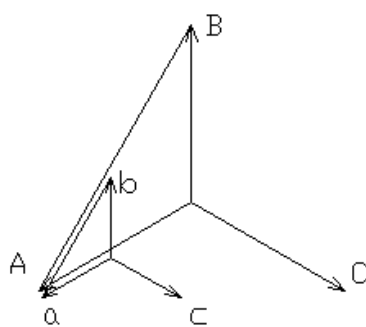
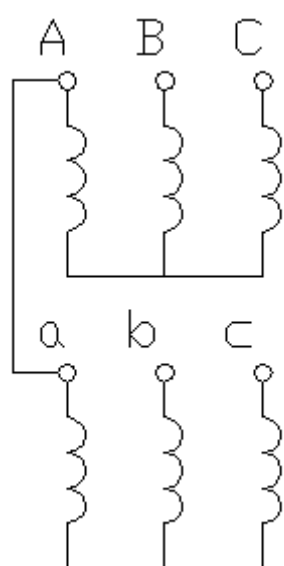
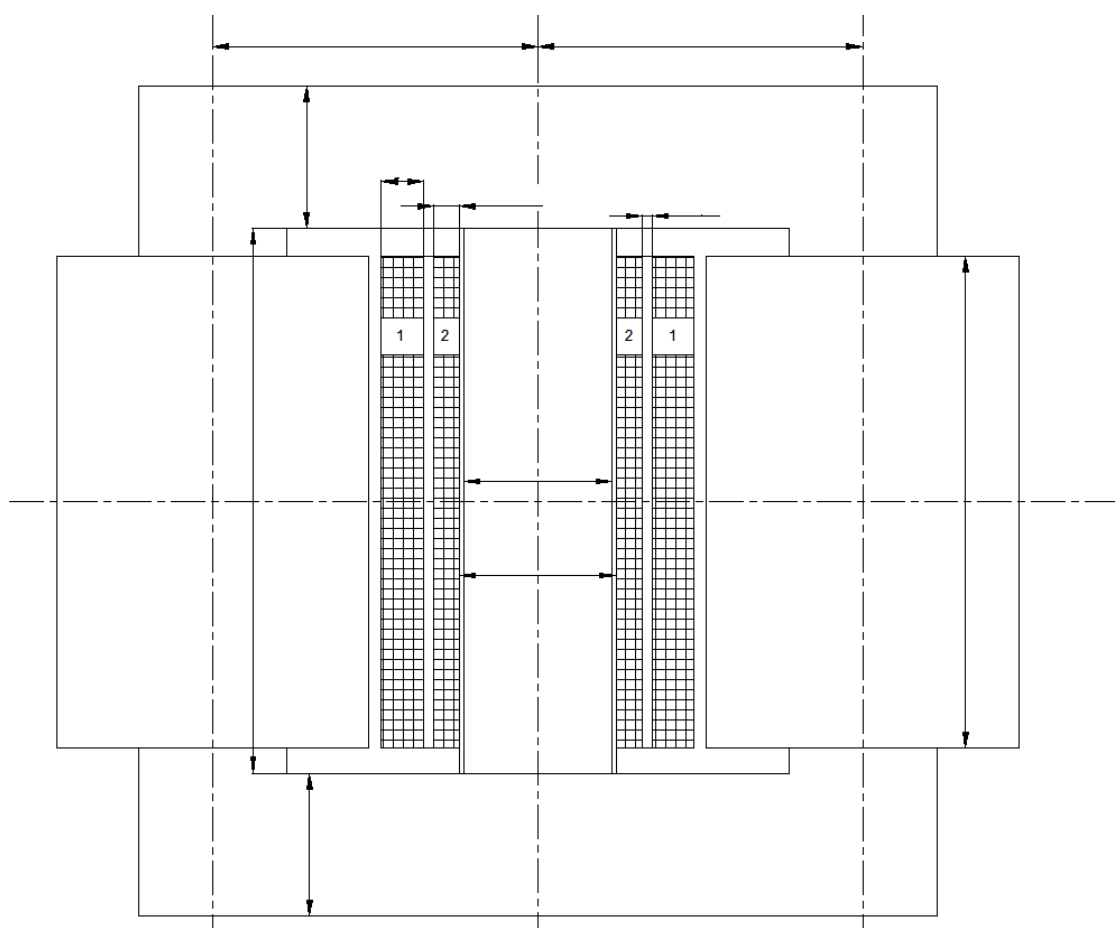
Коэффициент трансформации трансформатора при соединении Y/Y равен отношению чисел витков:

$$k = \frac{w_{\text{ВН}}}{w_{\text{НН}}} = \frac{710}{49} = 14,49$$

2. Вычертить в масштабе эскиз магнитной системы и размещения на ней обмоток. Вычертить схемы соединения обмоток, обеспечивающие получение заданной группы соединения.

1 - Обмотка НН

2- Обмотка ВН



3.Определить:

а) массы стали стержней и ярм, потери холостого хода  $P_x$ , среднее значение тока холостого хода  $i_0$  и его активной составляющей  $i_{0a}$  и реактивной  $i_{0p}$  составляющих, а также  $\cos\varphi_0$  – все величины для номинального значения напряжения  $U_{ном}$  при  $f = 50$  Гц.

Плотность холоднокатаной стали  $\gamma_{ст} = 7650 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ . Массу стали стержня и ярма можно найти по формуле :  $g = \gamma_{ст} * V$

$V$  –объем стержня или ярма, который определяем по формуле:

$$V = \Pi * h$$

Тогда

$$V_c = \Pi_c * h_c = 80,6 * 10^{-4} * 44,0 * 10^{-2} = 3,546 * 10^{-3} \text{ м}^3$$

$$V_{я} = \Pi_{я} * (2 * C + d) = 92,4 * 10^{-4} * (2 * 26 + 11) * 10^{-2} = 5,821 * 10^{-3} \text{ м}^3$$

Масса стали :

$$g_c = \gamma_{ст} * V_c = 3,546 * 10^{-3} * 7650 = 27,127 \text{ кг}$$

$$g_{я} = \gamma_{ст} * V_{я} = 5,821 * 10^{-3} * 7650 = 44,530 \text{ кг}$$

Общая масса стали стержней и ярм определяется как

$$G_c = 3 * g_c = 81,381 \text{ кг}$$

$$G_{я} = 2 * g_{я} = 89,061 \text{ кг}$$

Потери холостого хода определяются по формуле:

$$P_x = K_{п} * (p_c * G_c + p_{я} * G_{я})$$

где  $p_c$  и  $p_{я}$  – удельные потери в стали стержней и ярм, определенные по таблице для соответствующих индукций в стержне и ярме. Коэффициентом  $K_{п}=1,8$  учтем добавочные потери, возникающие вследствие несовпадения направления вектора магнитной индукции с направлением прокатки стали.

Индукцию находим из выражения :

$$E_{\phi} = 4,44 * f * w * B * \Pi * 10^{-4}$$

$$B = \frac{U_{\phi} \Pi * 10^4}{4,44 * f * w \Pi * \Pi}$$

Отсюда

$$B_c = \frac{U_{\phi} \Pi * 10^4}{4,44 * f * w \Pi * \Pi_c} = \frac{1905 * 10^4}{4,44 * 50 * 710 * 80,6} = 1,5 \text{ Тл}$$

$$B_{я} = \frac{U_{\phi} \Pi * 10^4}{4,44 * f * w \Pi * \Pi_{я}} = \frac{1905 * 10^4}{4,44 * 50 * 710 * 92,4} = 1,31 \text{ Тл}$$

Для известных значений индукции и марки стали 3404 в сердечниках и ярмах имеем удельные потери  $p$  и удельные намагничивающие мощности  $q$ . По таблице определяем:

$$\text{удельные потери в стержне } p_c = 1,1 \frac{\text{Вт}}{\text{кг}}$$

$$\text{удельные потери в ярме } p_{я} = 0,785 \frac{\text{Вт}}{\text{кг}}$$

Тогда

$$P_x = K_{п} * (p_c * G_c + p_{я} * G_{я}) = 1,8 * (1,1 * 81,381 + 0,785 * 89,061) = 287 \text{ Вт}$$

Для расчета тока холостого хода рассчитывается общая намагничивающая мощность магнитной системы.

$$Q_x = K_T * (q_c * G_c + q_y * G_y)$$

Где  $q_c$  и  $q_y$  – удельные намагничивающие мощности для стали стержней и ярм.  $K_T$  – коэффициент, учитывающий увеличение намагничивающей мощности. Примем  $K_T = 10$ .

По таблице находим:

$$q_c = 1,330 \frac{\text{ВА}}{\text{кг}}$$

$$q_y = 0,900 \frac{\text{ВА}}{\text{кг}}$$

$$Q_x = K_T * (q_c * G_c + q_y * G_y) = 10 * (1,33 * 81,381 + 0,9 * 89,061) = 1884 \text{ ВА}$$

Ток ХХ:

Активная составляющая:

$$i_{0a} = \frac{P_x}{S} * 100\% = \frac{287}{63000} * 100\% = 0,46 \%$$

Реактивная составляющая :

$$i_{0p} = \frac{Q_x}{S} * 100\% = \frac{1884}{63000} * 100\% = 2,99 \%$$

Полный ток ХХ:

$$i_0 = \sqrt{i_{0a}^2 + i_{0p}^2} = \sqrt{0,46^2 + 2,99^2} = 3,03 \%$$

Реальный ток ХХ :

Активная составляющая:

$$I_{0a} = \frac{i_{0a} * I_{ном}}{100} = \frac{0,46 * 11}{100} = 0,05 \text{ А}$$

Реактивная составляющая :

$$I_{0p} = \frac{i_{0p} * I_{ном}}{100} = \frac{2,99 * 11}{100} = 0,33 \text{ А}$$

Полный ток ХХ :

$$I_0 = \frac{i_0 * I_{ном}}{100} = \frac{3,03 * 11}{100} = 0,33 \text{ А}$$

Тогда

$$\cos \varphi = \frac{P_x}{I_0 * U_{ном} * \sqrt{3}} = \frac{287}{0,33 * 3300 * \sqrt{3}} = 0,152$$

$$\sin \varphi = \frac{Q_x}{I_0 * U_{ном} * \sqrt{3}} = \frac{1884}{0,33 * 3300 * \sqrt{3}} = 0,999$$

Сравним данные с контрольными :

Для потерь ХХ трансформатора:

$$\frac{P_x - P_{хконт}}{P_{хконт}} * 100\% = \frac{287 - 265}{265} * 100\% = 8,302\% < 15\%$$

Для тока ХХ трансформатора :

$$\frac{I_0 - I_{0конт}}{I_{0конт}} * 100\% = \frac{3,03 - 2,8}{2,8} * 100\% = 8,21\% < 30\%$$

б) приведенные к первичной обмотке параметры схемы замещения  $r_0$  и  $x_0$  и  $z_0$  в омах при  $U = U_{ном}$ .

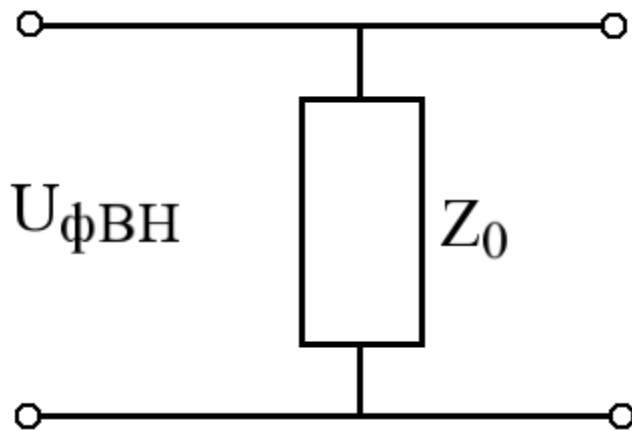


Схема замещения трансформатора при ХХ

$$Z_0 = \frac{U_{фВН}}{I_0} = \frac{1905}{0,33} = 5772 \text{ Ом}$$

$$r_0 = z_0 * \cos\varphi_0 = 5772 * 0,152 = 877,45 \text{ Ом}$$

$$x_0 = z_0 * \sin\varphi_0 = 5772 * 0,999 = 5766 \text{ Ом}$$

в) рассчитать и построить характеристики холостого хода:  $P_X = f(U)$ ;  $I_0 = f(U)$  и  $\cos\varphi_0 = f(U)$ , а так же графики  $I_{0a} = f(U)$  и  $I_{0p} = f(U)$  для диапазона значений  $U$  от 50 до 110% от  $U_{ном}$ .

$i := 0..4$

$$U := \begin{pmatrix} 0.5 \cdot U_{ВН} \\ 0.7 \cdot U_{ВН} \\ 0.9 \cdot U_{ВН} \\ 1 \cdot U_{ВН} \\ 1.1 \cdot U_{ВН} \end{pmatrix}$$

$$B_{Cf} := \frac{U_i}{4.44 \cdot f \cdot w_{ВН} \cdot \Pi_C \cdot 10^{-4} \cdot \sqrt{3}}$$

$$B_C = \begin{pmatrix} 0.75 \\ 1.05 \\ 1.35 \\ 1.5 \\ 1.65 \end{pmatrix}$$

Тл

$$p_C := \begin{pmatrix} 0.275 \\ 0.480 \\ 0.925 \\ 1.168 \\ 1.568 \end{pmatrix}$$

$\frac{\text{Вт}}{\text{кг}}$

$$B_{Яf} := \frac{U_i}{4.44 \cdot f \cdot w_{ВН} \cdot \Pi_{Я} \cdot 10^{-4} \cdot \sqrt{3}}$$

$$q_C := \begin{pmatrix} 0.420 \\ 0.565 \\ 1.020 \\ 1.486 \\ 3.214 \end{pmatrix}$$

$\frac{\text{ВА}}{\text{кг}}$

$$B_{Я} = \begin{pmatrix} 0.65 \\ 0.92 \\ 1.18 \\ 1.31 \\ 1.44 \end{pmatrix}$$

Тл

$$p_{Яf} := \begin{pmatrix} 0.210 \\ 0.400 \\ 0.650 \\ 0.785 \\ 0.950 \end{pmatrix}$$

$\frac{\text{Вт}}{\text{кг}}$

$$q_{Яf} := \begin{pmatrix} 0.380 \\ 0.510 \\ 0.710 \\ 0.900 \\ 1.080 \end{pmatrix}$$

$\frac{\text{ВА}}{\text{кг}}$

Значения удельных потерь и удельной намагничивающей мощности находим по таблице 6, в соответствии с индукцией.

$$P_x := K_n \cdot (p_c \cdot G_c + p_{\text{я}} \cdot G_{\text{я}})$$

$$Q_x := K_T \cdot (q_c \cdot G_c + q_{\text{я}} \cdot G_{\text{я}})$$

$$P_x = \begin{pmatrix} 194.818 \\ 225.278 \\ 265.357 \\ 287 \\ 313.452 \end{pmatrix} \quad \text{Вт}$$

$$Q_x = \begin{pmatrix} 1.421 \times 10^3 \\ 1.537 \times 10^3 \\ 1.715 \times 10^3 \\ 1.884 \times 10^3 \\ 2.044 \times 10^3 \end{pmatrix} \quad \text{кВА}$$

$$I_{0a} := \frac{P_x}{10 \cdot S}$$

$$I_{0p} := \frac{Q_x}{10 \cdot S}$$

$$I_0 := \sqrt{I_{0a}^2 + I_{0p}^2}$$

$$I_{0a} = \begin{pmatrix} 0.309 \\ 0.358 \\ 0.421 \\ 0.456 \\ 0.498 \end{pmatrix} \quad \%$$

$$I_{0p} = \begin{pmatrix} 2.255 \\ 2.439 \\ 2.722 \\ 2.991 \\ 3.245 \end{pmatrix} \quad \%$$

$$I_0 = \begin{pmatrix} 2.277 \\ 2.465 \\ 2.754 \\ 3.025 \\ 3.283 \end{pmatrix} \quad \%$$

$$I_{0a} := I_{0a} \cdot \frac{I_{n1}}{100}$$

$$I_{0p} := I_{0p} \cdot \frac{I_{n1}}{100}$$

$$I_0 := I_0 \cdot \frac{I_{n1}}{100}$$

$$I_{0a} = \begin{pmatrix} 0.034 \\ 0.039 \\ 0.046 \\ 0.05 \\ 0.055 \end{pmatrix} \quad \text{А}$$

$$I_{0p} = \begin{pmatrix} 0.2486 \\ 0.2689 \\ 0.3 \\ 0.3296 \\ 0.3577 \end{pmatrix} \quad \text{А}$$

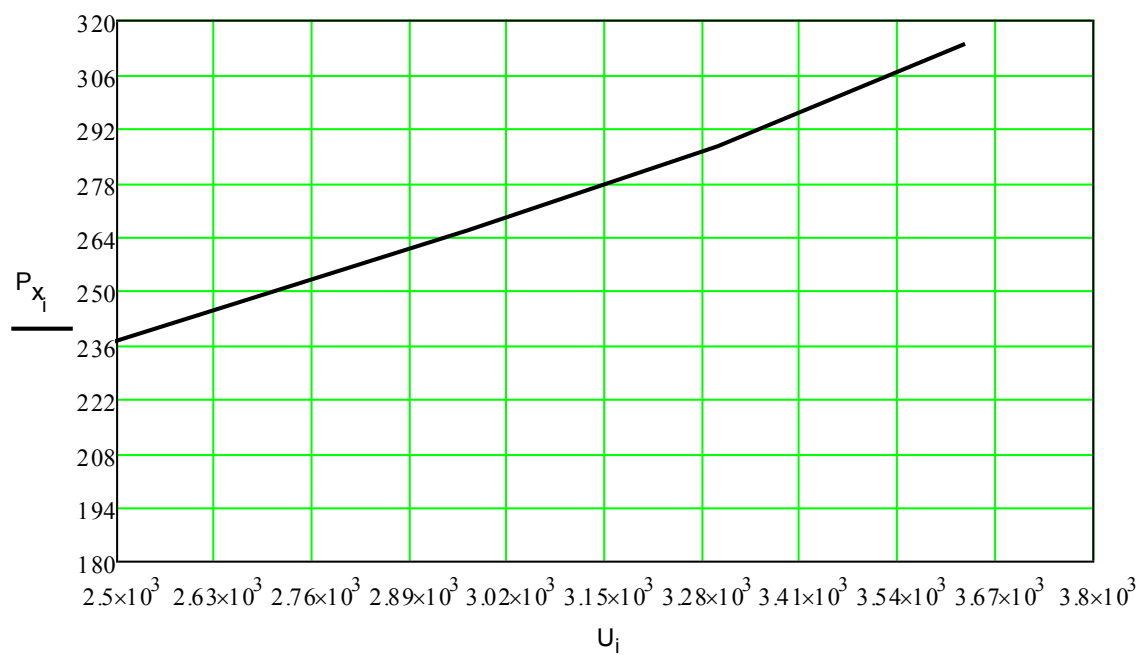
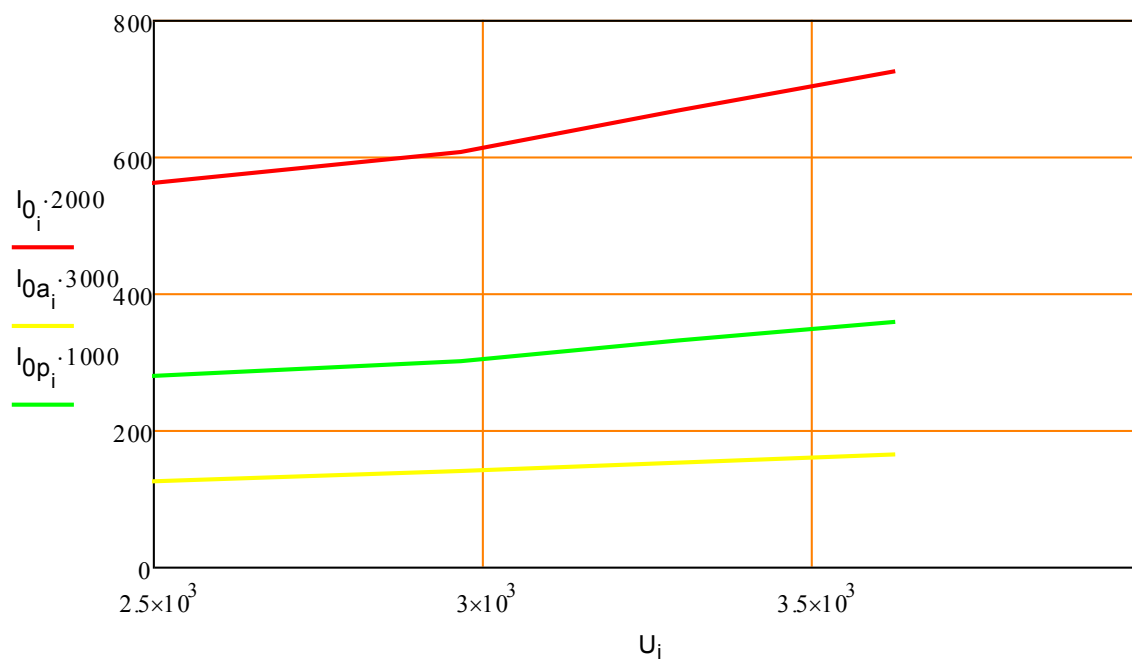
$$I_0 = \begin{pmatrix} 0.2509 \\ 0.2717 \\ 0.3036 \\ 0.3334 \\ 0.3619 \end{pmatrix} \quad \text{А}$$

$$\cos \phi_i := \frac{P_{x_i}}{I_{0_i} \cdot U_i \cdot \sqrt{3}}$$

$$\cos \phi_0 = \begin{pmatrix} 0.272 \\ 0.207 \\ 0.17 \\ 0.151 \\ 0.138 \end{pmatrix}$$

Построим необходимые зависимости:







г) Потери XX трансформатора при включении в сеть с частотой 40 и 60 Гц.

$$B_{c40} = \frac{U_{\phi BH} \cdot 10^4}{4,44 \cdot f \cdot w_{BH} \cdot \text{Пс}} = \frac{1905 \cdot 10^4}{4,44 \cdot 40 \cdot 710 \cdot 80,6} = 1,77 \text{ Тл}$$

$$B_{c60} = \frac{U_{\phi BH} \cdot 10^4}{4,44 \cdot f \cdot w_{BH} \cdot \text{Пс}} = \frac{1905 \cdot 10^4}{4,44 \cdot 60 \cdot 710 \cdot 80,6} = 1,25 \text{ Тл}$$

$$B_{я40} = \frac{U_{\phi BH} \cdot 10^4}{4,44 \cdot f \cdot w_{BH} \cdot \text{Пя}} = \frac{1905 \cdot 10^4}{4,44 \cdot 40 \cdot 710 \cdot 92,4} = 1,64 \text{ Тл}$$

$$B_{я60} = \frac{U_{\phi BH} \cdot 10^4}{4,44 \cdot f \cdot w_{BH} \cdot \text{Пя}} = \frac{1905 \cdot 10^4}{4,44 \cdot 60 \cdot 710 \cdot 92,4} = 1,09 \text{ Тл}$$

Для известных значений индукции и марки стали 3404 в сердечниках и ярмах имеем удельные потери  $p$  и удельные намагничивающие мощности  $q$ . По таблице определяем:

удельные потери в стержне  $p_{c40} = 1,74 \frac{\text{Вт}}{\text{кг}}$  и  $p_{c60} = 0,675 \frac{\text{Вт}}{\text{кг}}$

удельные потери в ярме  $p_{я40} = 1,4 \frac{\text{Вт}}{\text{кг}}$  и  $p_{я60} = 0,475 \frac{\text{Вт}}{\text{кг}}$

Тогда

$$P_{x40} = P_{x50} \cdot \left(\frac{B_{c40}}{B_{c50}}\right)^2 \cdot \left(\frac{40}{50}\right)^{1,3} + P_{я50} \cdot \left(\frac{B_{я40}}{B_{я50}}\right)^2 \cdot \left(\frac{40}{50}\right)^{1,3} = 315 \text{ Вт}$$

$$P_{x60} = P_{x50} \cdot \left(\frac{B_{c60}}{B_{c50}}\right)^2 \cdot \left(\frac{60}{50}\right)^{1,3} + P_{я50} \cdot \left(\frac{B_{я60}}{B_{я50}}\right)^2 \cdot \left(\frac{60}{50}\right)^{1,3} = 252 \text{ Вт}$$

4.Определить:

А)Потери КЗ  $P_k$  :

Плотность металла обмоток алюминия  $\gamma_{al} = 2700 \text{ кг/м}^3$ . Масса металла каждой из обмоток находится по формуле:

$$G = c * \pi * D_{ср} * w * S * \gamma * 10^{-8}$$

где  $c$  – число активных стержней;

$D_{ср}$  – средний диаметр обмотки;

$w$  – число витков обмотки;

$S$  – сечение витка;

Найдем средний диаметр:

1) обмотки ВН:

$$D_{срВН} = D_1 + 2a_1 + 2a_{12} + a_2 = 11,9 + 2 * 1,4 + 2 * 1,4 + 3,5 = 21 \text{ см}$$

2) обмотки НН:

$$D_{срНН} = D_1 + a_1 = 11,9 + 1,4 = 13,3 \text{ см}$$

Определяем массы :

$$G_{ВН} = c * \pi * D_{ср} * w * S * \gamma * 10^{-8} = 3 * 3,14 * 21 * 710 * 9,1 * 2700 * 10^{-8} = 34,5 \text{ кг}$$

$$G_{НН} = c * \pi * D_{ср} * w * S * \gamma * 10^{-8} = 3 * 3,14 * 13,3 * 49 * 84,5 * 2700 * 10^{-8} = 14 \text{ кг}$$

Потери короткого замыкания рассчитываются для каждой обмотки и затем суммируются:

$$P_{осн} = P_{оснВН} + P_{оснНН}$$

Добавочные потери учитываем коэффициентом  $k = 1,06$ .

Тогда потери при КЗ :

$$P_k = k * P_{осн}$$

Основные потери находятся следующим образом :

$$P_{осн} = 12,75 * J^2 * G$$

$J$  –плотность тока в обмотке, которую находим так

$$J = \frac{I_{\Phi}}{S}$$

Для обмотки ВН :

$$J_{ВН} = \frac{11}{9,1} = 1,21 \frac{\text{А}}{\text{мм}^2}$$

Для обмотки НН :

$$J_{ВН} = \frac{158,1}{84,5} = 1,87 \frac{\text{А}}{\text{мм}^2}$$

Находим  $P_{осн}$  :

$$P_{оснВН} = 12,75 * J_{ВН}^2 * G_{ВН} = 644,9 \text{ Вт}$$

$$P_{оснНН} = 12,75 * J_{НН}^2 * G_{НН} = 624,9 \text{ Вт}$$

$$P_{осн} = P_{оснВН} + P_{оснНН} = 1270 \text{ Вт}$$

Находим потери при КЗ :

$$P_k = k * P_{осн} = 1346 \text{ Вт}$$

Сравним данные с контрольными :

$$\frac{P_K - P_{K\text{конт}}}{P_{K\text{конт}}} * 100\% = \frac{1346 - 1280}{1280} * 100\% = 5,2\% < 15\%$$

б) приведенные к первичной обмотке составляющие сопротивления короткого замыкания  $r_K, x_K, z_K$  в омах; составляющие напряжения короткого замыкания  $u_a$  и  $u_p$ , напряжение короткого замыкания  $u_K$  в процентах и  $\cos\varphi$ .  
Потери короткого замыкания в трех фазах обмоток:

$$P_K = 3 * I_{\text{ном ф}}^2 * r_K$$

Активная составляющая напряжения короткого замыкания, фазное значение  $U_{a.\Phi} = I_{\text{ном.}\Phi} * r_K$  или  $u_a = (U_{a.\Phi} / U_{\text{ном.}\Phi}) * 100\%$

Реактивная составляющая напряжения короткого замыкания, фазное значение

$$U_{p.\Phi} = I_{\text{ном.}\Phi} * x_K \text{ или } u_p = (U_{p.\Phi} / U_{\text{ном.}\Phi}) * 100\%$$

Сопротивление  $Z_K$

$$Z_K = \sqrt{r_K^2 + x_K^2}$$

$$\cos \gamma_K = \frac{r_K}{z_K}$$

Находим активные составляющие :

$$r_K = \frac{P_K}{3 * I_{\Phi}^2} = \frac{1346}{3 * 11^2} = 3,7 \text{ Ом}$$

$$U_{a\Phi} = I_{\text{ном}\Phi} * r_K = 11 * 3,7 = 40,79 \text{ В}$$

$$U_a = (U_{a\Phi} / U_{\text{ном}\Phi}) * 100\% = (40,79 / 1905) * 100\% = 2,14 \%$$

$$l\sigma = l_1 / 0,95 = 40 / 0,95 = 42 \text{ см}$$

$$D_{cp} = D_1 + 2a_1 + a_{21} = 11,9 + 2 * 1,4 + 1,4 = 16,1 \text{ см}$$

Коэффициент Роговского

$$k_R := 1 - \frac{a_1 + a_{12} + a_2}{\pi * l_1} \quad k_R = 0,95$$

Тогда

$$x_K := \frac{2 \cdot \pi^2 \cdot f \cdot \mu_0 \cdot D_{cp} \cdot 10^{-2} \cdot a_{\sigma} \cdot 10^{-2} \cdot w_{BH}^2 \cdot k_R}{l_1 \cdot 10^{-2}}$$

..

$$a_{\sigma} = a_{12} + \frac{a_1 + a_2}{3}$$

$$\mu_0 = 4 * \pi * 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}}$$

$$x_K = 7,251 \text{ Ом}$$

Находим реактивные составляющие :

$$U_{p\Phi} = I_{\text{ном}\Phi} * x_K = 79,761 \text{ В}$$

$$U_p = (U_{p\Phi} / U_{\text{ном}\Phi}) * 100\% = 4,187 \%$$

Напряжение КЗ :

$$U_K = \sqrt{U_{a\Phi}^2 + U_{p\Phi}^2} = \sqrt{40,79^2 + 79,761^2} = 90 \text{ В}$$

В процентах :

$$U_K = \sqrt{U_a^2 + U_p^2} = \sqrt{2,14^2 + 4,187^2} = 4,7\%$$

Сравним с контрольными данными :

$$\frac{U_K - U_{K\text{КОНТ}}}{U_{K\text{КОНТ}}} * 100\% = \frac{4,7 - 4,5}{4,5} * 100\% = 4\%$$

Сопротивление  $Z_K$  :

$$Z_K = \sqrt{r^2 + x^2} = 8,1 \text{ Ом}$$

$$\cos \gamma_K = \frac{rk}{zk} = 0.42$$

$$\gamma = 65^\circ$$

в) рассчитать и построить график изменения вторичного напряжения трансформатора  $\Delta u = f(\cos \varphi_2)$  при номинальном токе. Определить  $\cos \varphi_2$ , при котором  $\Delta u$  принимает максимально значение. Построить на одной диаграмме внешнюю характеристику  $U_2 = f(I_2)$  и график  $\Delta u = f(I_2)$  при  $\cos \varphi_2 = 1$  и  $\cos \varphi_2 = 0,7$ .

$$\beta := 1$$

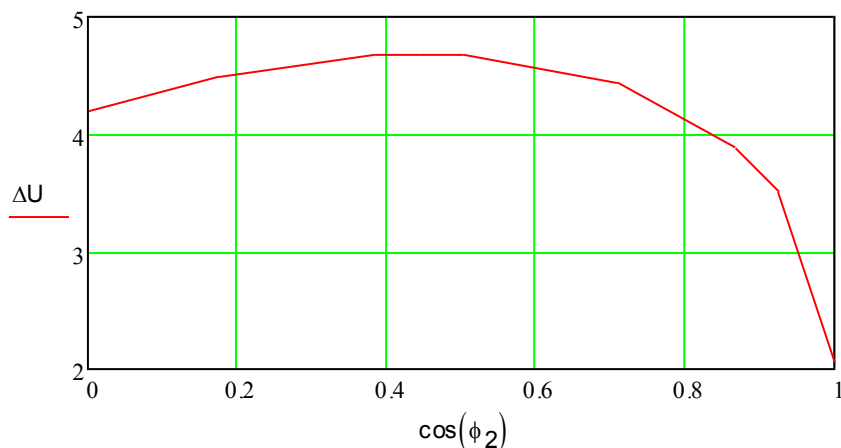
$$\phi_2 := \phi_2^T$$

$$\phi_2 := \left( 0 \quad \frac{\pi}{8} \quad \frac{\pi}{6} \quad \frac{\pi}{4} \quad \frac{\pi}{3} \quad \phi_K \quad \frac{3\pi}{8} \quad 4\frac{\pi}{9} \quad \frac{\pi}{2} \right)$$

$$\cos(\phi_2)^T = (1 \quad 0.924 \quad 0.866 \quad 0.707 \quad 0.5 \quad 0.444 \quad 0.383 \quad 0.174 \quad 0)$$

$$\Delta U := \beta \cdot (u_a \cdot \cos(\phi_2) + u_p \cdot \sin(\phi_2))$$

$$\Delta U^T = (2.076 \quad 3.523 \quad 3.895 \quad 4.434 \quad 4.671 \quad 4.68 \quad 4.67 \quad 4.491 \quad 4.195) \quad \%$$



$$\Delta U_{\max} := u_K \quad \Delta U_{\max} = 4.68 \quad \text{при} \quad \cos \varphi_2 = \cos \varphi_K = 0.42$$

Зависимость  $U_2 = f(I_2)$  и  $\Delta u = f(I_2)$  при  $\cos \varphi_2 = \text{const}$

$$c = u_a \cdot \cos \varphi_2 + u_p \cdot \sin \varphi_2 = \text{const}$$

$$\Delta U = c \cdot \beta$$

$$\text{при} \quad U_{2\text{ ном}} = U_{\text{НН}}$$

$$U_2 := U_{2\text{ ном}} \left( 1 - \frac{\Delta U}{100} \right) \quad \text{В}$$

$$\text{при} \quad \cos \varphi_2 := 0.7 \quad \text{RL нагрузка} \quad I_{2\text{ ном}} = I_{\varphi 2} \quad I_{2\text{ ном}} = 158.144 \quad \text{А}$$

$$\beta := \begin{pmatrix} 0.2 \\ 0.4 \\ 0.6 \\ 0.8 \\ 1.0 \end{pmatrix} \quad \Delta U := \beta \cdot c \quad \Delta U^T = (0.89 \quad 1.779 \quad 2.669 \quad 3.559 \quad 4.449) \quad \%$$

$$U_2 := U_{2\text{ном}} \left( 1 - \frac{\Delta U}{100} \right) \quad U_2 = \begin{pmatrix} 227.954 \\ 225.907 \\ 223.861 \\ 221.814 \\ 219.768 \end{pmatrix} \quad \text{В} \quad I_2 := \beta \cdot I_{2\text{ном}} \quad I_2 = \begin{pmatrix} 31.629 \\ 63.258 \\ 94.886 \\ 126.515 \\ 158.144 \end{pmatrix} \quad \text{А}$$

при  $\cos \phi_2 := 1$  **активная нагрузка**

$$c := u_a \cdot \cos \phi_2 + u_p \cdot \sin(\arccos(\cos \phi_2)) \quad c = 2.076$$

$$\Delta U := \beta \cdot c \quad \Delta U^T = (0.415 \quad 0.83 \quad 1.246 \quad 1.661 \quad 2.076) \quad \%$$

$$U_{2.1} := U_{2\text{ном}} \left( 1 - \frac{\Delta U}{100} \right) \quad U_{2.1} = \begin{pmatrix} 229.045 \\ 228.09 \\ 227.135 \\ 226.18 \\ 225.225 \end{pmatrix} \quad \text{В} \quad I_2 = \begin{pmatrix} 31.629 \\ 63.258 \\ 94.886 \\ 126.515 \\ 158.144 \end{pmatrix} \quad \text{А}$$

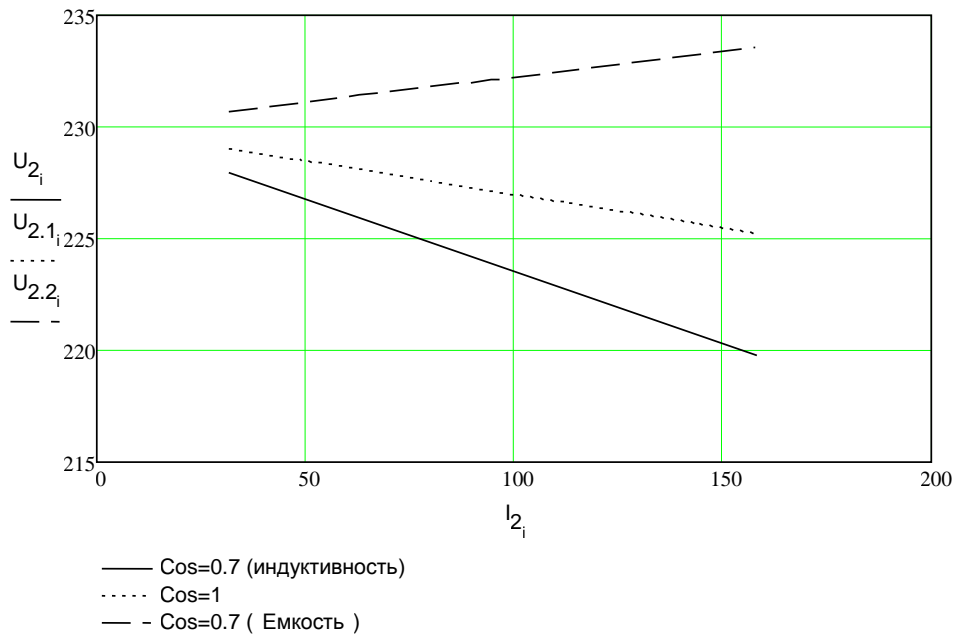
при  $\cos \phi_2 := 0.7$  **РС нагрузка**

$$c := u_a \cdot \cos \phi_2 - u_p \cdot \sin(\arccos(\cos \phi_2)) \quad c = -1.542$$

$$\Delta U := \beta \cdot c \quad \Delta U^T = (-0.308 \quad -0.617 \quad -0.925 \quad -1.234 \quad -1.542) \quad \%$$

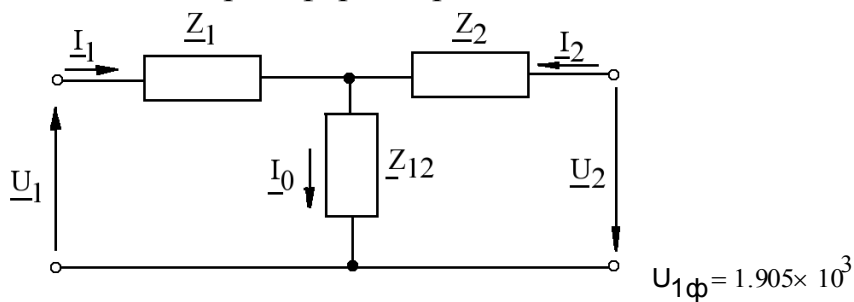
$$U_{2.2} := U_{2\text{ном}} \left( 1 - \frac{\Delta U}{100} \right) \quad U_{2.2} = \begin{pmatrix} 230.709 \\ 231.419 \\ 232.128 \\ 232.838 \\ 233.547 \end{pmatrix} \quad \text{В} \quad I_2 = \begin{pmatrix} 31.629 \\ 63.258 \\ 94.886 \\ 126.515 \\ 158.144 \end{pmatrix} \quad \text{А}$$

По найденным значениям строим зависимости



5. Построить в масштабе приведенную векторную диаграмму для одной фазы трансформатора при нагрузке номинальным током и  $\cos\gamma_2=0,8$

Схема замещения трансформатора :



$$r_1 := \frac{r_k}{2} = r_2' \quad \frac{r_k}{2} = 1.794 \text{ Ом}$$

$$x_1 := \frac{x_k}{2} = x_2' \quad \frac{x_k}{2} = 3.625 \text{ Ом}$$

$$U_2' = K \cdot U_{2\phi} = U_{1\phi} \quad K \cdot U_{2\phi} = 1.924 \times 10^3$$

$$\cos\phi_2 := 0.8 \quad \phi_2 := \arccos(0.8) \quad \phi_2 = 36.87^\circ$$

$$I_2 := \frac{I_{2 \text{ ном}}}{K} \quad I_2 = 10.914 \text{ A} \quad I_{\phi 1} = 11.022$$

$$I_{\phi 1} r_1 = 19.777 \text{ В} = I_{\phi 2}' r_2'$$

$$I_{\phi 1} x_1 = 39.959 \text{ В} = I_{\phi 2}' x_2'$$

$$I_{0a} := 0.028 \text{ A}$$

$$I_{0p} := 0.190 \text{ A}$$

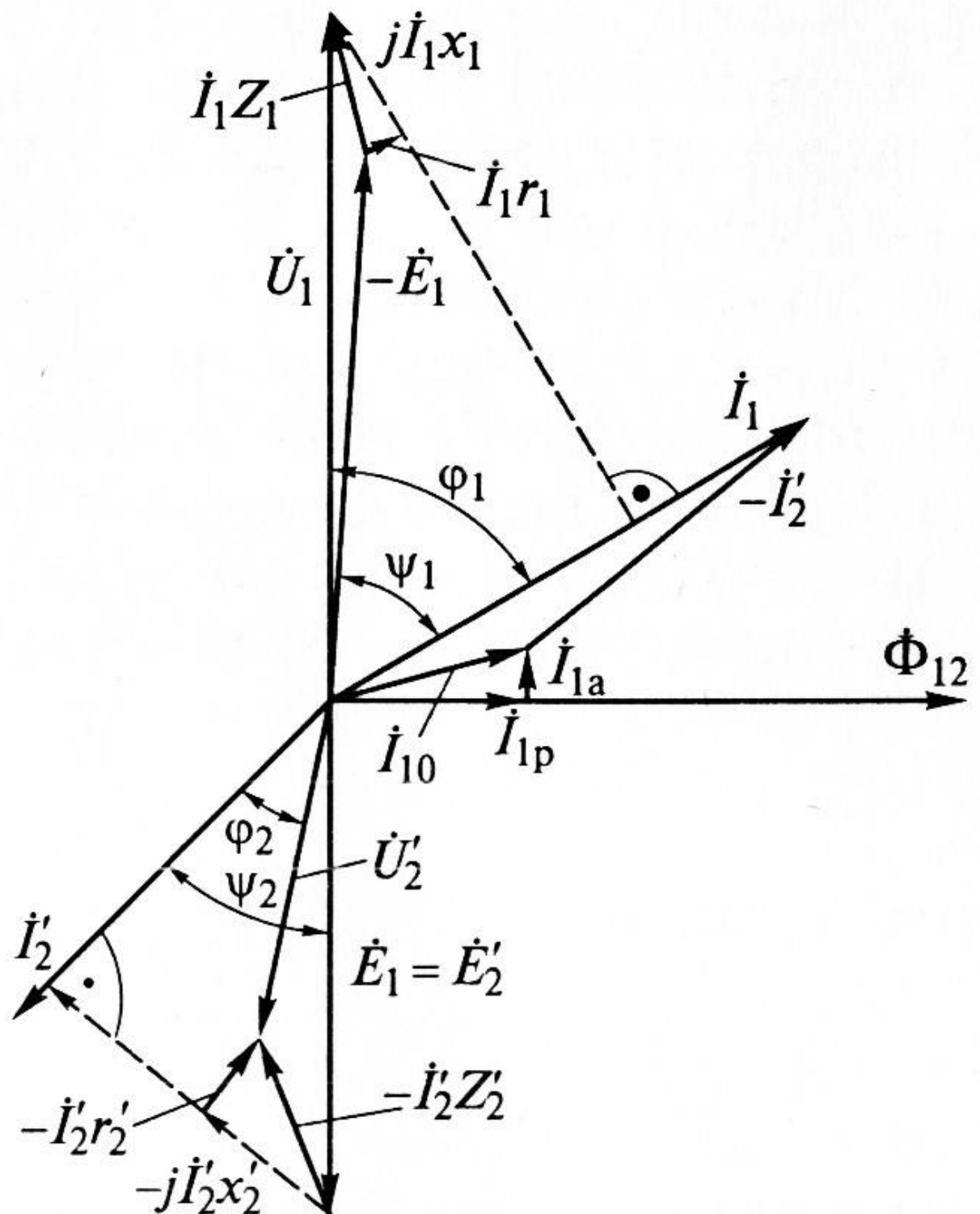
$$I_0 := 0.192 \text{ A}$$

Уравнения трансформатора (необходимы для построения векторной диаграммы)

$$I_1 = I_0 + I_2'$$

$$U_1 = -E_1 + I_1 \cdot Z_1$$

$$U_2 = E_2 - I_2 \cdot Z_2$$



6. Рассчитать и построить зависимость КПД от нагрузки  $\eta = f(P_2)$  при  $\cos\varphi_2 = 1$  и  $\cos\varphi_2 = 0,7$ . Определить  $P_2$ , при котором  $\eta$  приобретает максимальное значение.

$$\eta_1(P) := 1 - \frac{\left(\frac{P}{P_k}\right) \cdot P_k + P_{xx}}{\sqrt{\frac{P}{P_k}} \cdot S \cdot \cos(\psi_2) \cdot 10^3 + \frac{P}{P_k} \cdot P_k + P_{xx}}$$

$P$ - мощность потерь ХХ при номинальном напряжении.

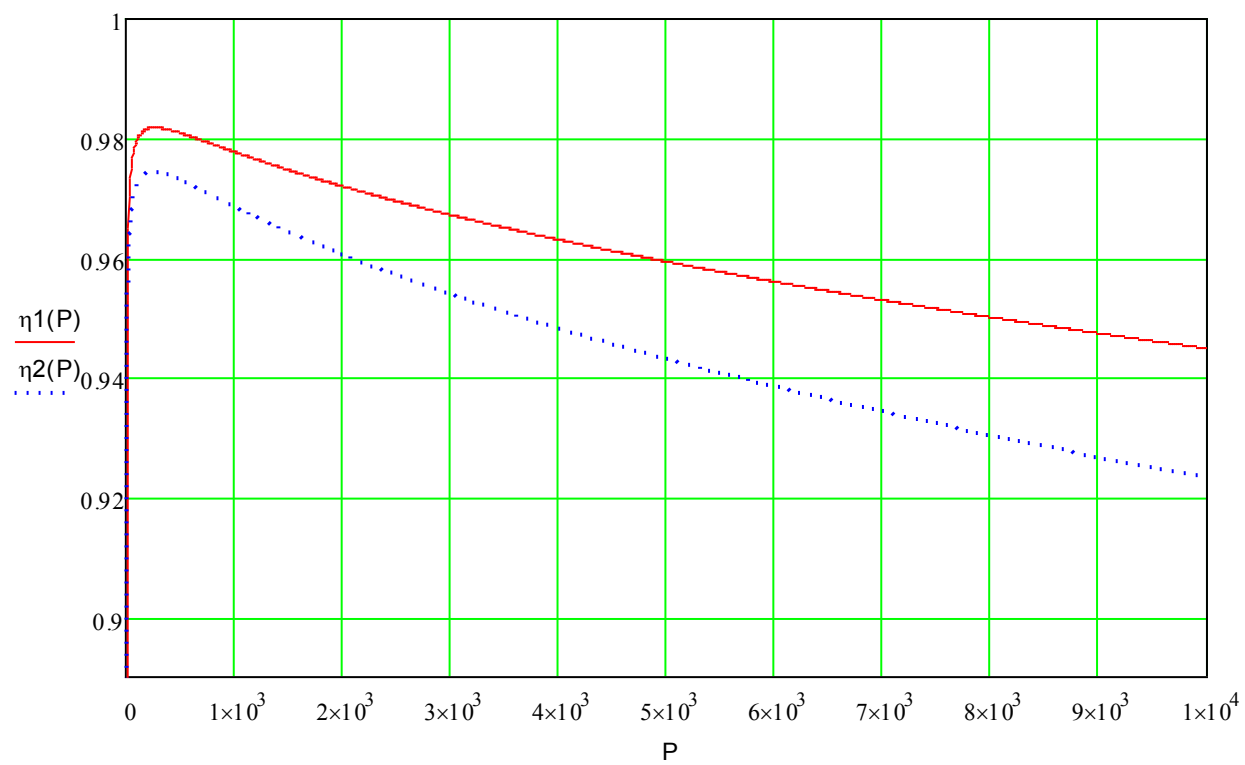
$$\eta_2(P) := 1 - \frac{\left(\frac{P}{P_k}\right) \cdot P_k + P_{xx}}{\sqrt{\frac{P}{P_k}} \cdot S \cdot \cos(\psi_3) \cdot 10^3 + \frac{P}{P_k} \cdot P_k + P_{xx}}$$



$$P_{xx}=265 \text{ Bт} \quad P_{\kappa}=1280 \text{ Bт}$$

$$\psi_2 := 0$$

$$\psi_3 := \arccos(0.7)$$



$$P_{1\max} := 276 \quad \text{Bт} \quad P_{2\max} := 244 \quad \text{Bт}$$

