

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	$S = 63 \text{ кВА}$	
Схема и группа соединений	$Y/Y - 0$	
Частота	$f = 50 \text{ Гц}$	
Номинальные напряжения	Высокое напряжение	$U_{\text{ном ВН}} = 3300 \text{ В}$
	Низкое напряжение	$U_{\text{ном НН}} = 230 \text{ В}$
Число витков	Высокое напряжение	$w_{\text{ВН}} = 710$
	Низкое напряжение	$w_{\text{НН}} = 49$
Сечение витка	Высокое напряжение	$S_{\text{ВН}} = 9,1 \text{ мм}^2$
	Низкое напряжение	$S_{\text{НН}} = 84,5 \text{ мм}^2$
Внутренний диаметр		$D_1 = 11,9 \text{ см}$
Радиальные размеры	Высокое напряжение	$a_2 = 3,5 \text{ см}$
	Низкое напряжение	$a_1 = 1,4 \text{ см}$
Канал между обмотками ВН и НН		$a_{12} = 1,4 \text{ см}$
Высота обмотки		$l_1 = l_2 = 40,0 \text{ см}$
Магнитная система		
Диаметр стержня		$d = 11,0 \text{ см}$
Активное сечение	Стержень	$\Pi_c = 80,6 \text{ см}^2$
	Ярмо	$\Pi_y = 92,4 \text{ см}^2$
Высота	Стержень	$h_c = 44,0 \text{ см}$
	Ярмо	$h_y = 10,5 \text{ см}$
Расстояние между осями С		$C = 26,0 \text{ см}$
Бак		
Масса масла		$m_{\text{масла}} = 170 \text{ кг}$
Масса бака		$m_{\text{бака}} = 80 \text{ кг}$
Контрольные данные		
Потери при КЗ		$P_k = 1280 \text{ Вт}$
Потери при ХХ		$P_x = 265 \text{ Вт}$
Напряжение КЗ		$U_k = 4,5 \%$
Ток ХХ		$I_0 = 2,8 \%$
Напряжение нулевой последовательности		$U_{\text{н.п.}} = 50 \%$

Обмотка трансформатора алюминиевая. Магнитная система собрана впереплет, 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:

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

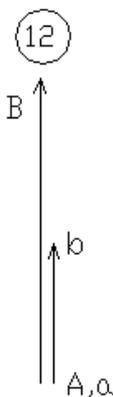
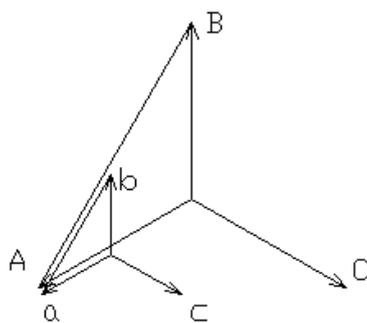
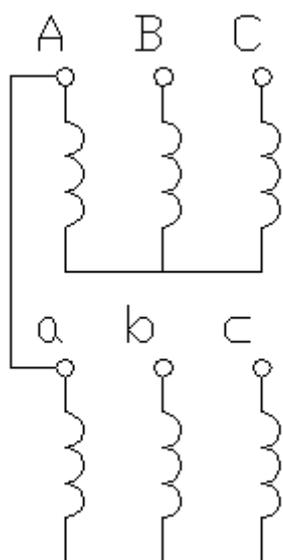
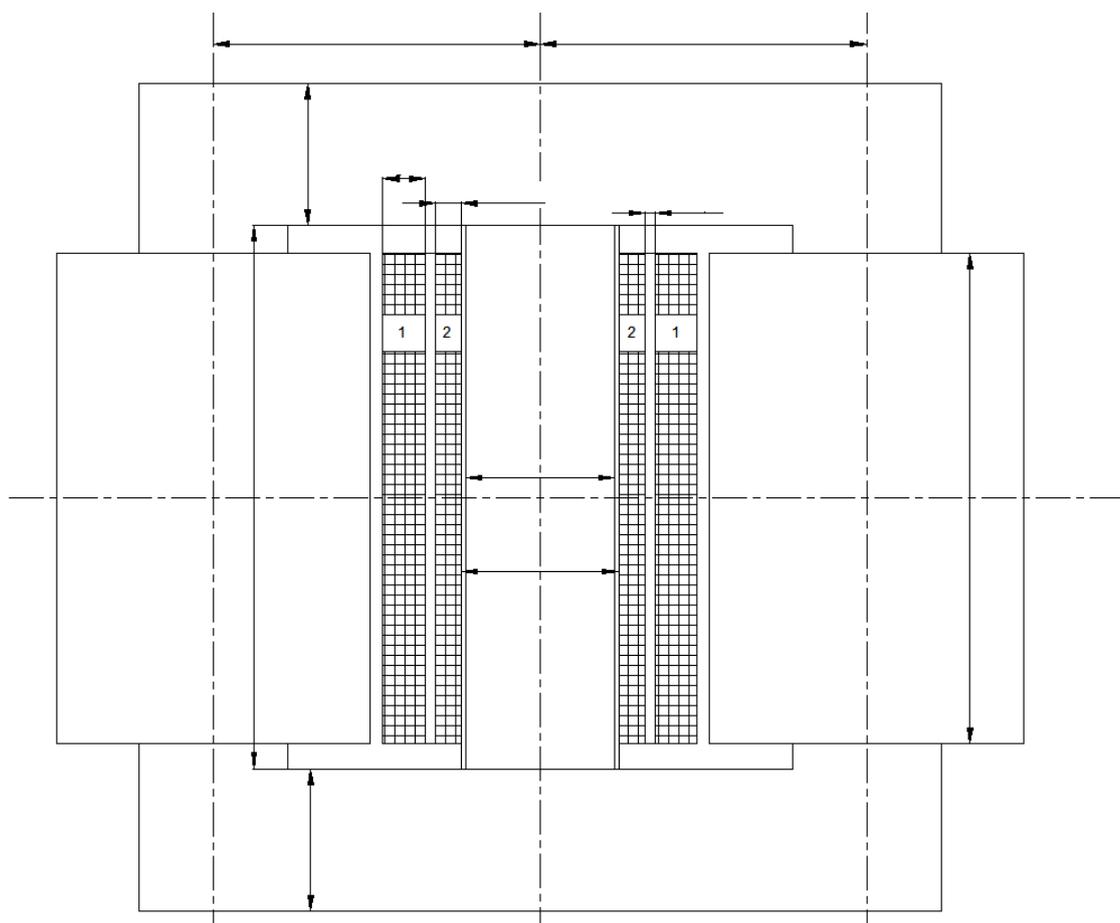
$$I_{\text{номНН}} = I_{\phi\text{НН}} = \frac{S}{U_{\text{номНН}} * \sqrt{3}} = \frac{63 * 10^3}{230 * \sqrt{3}} = 158,1 \text{ А}$$

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:

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

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

Отсюда

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

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

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 g_0 и x_0 и z_0 в омах при $U = U_{ном}$.

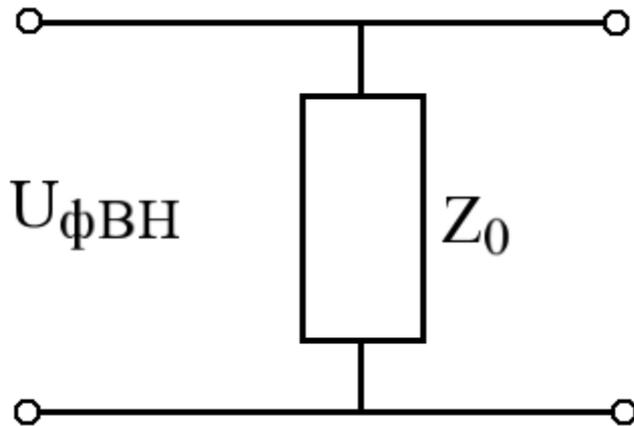


Схема замещения трансформатора при ХХ

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

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

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

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 $U_{ном}$.

$i := 0..4$

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

$$B_c := \frac{U_i}{4.44 \cdot f \cdot w_{ВН} \cdot \Pi_c \cdot 10^{-4} \cdot \sqrt{3}}$$

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

Тл

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

$\frac{\text{Вт}}{\text{кг}}$

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

$\frac{\text{ВА}}{\text{кг}}$

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

Тл

$$\rho_{я} := \begin{pmatrix} 0.210 \\ 0.400 \\ 0.650 \\ 0.785 \\ 0.950 \end{pmatrix}$$

$\frac{\text{Вт}}{\text{кг}}$

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

$\frac{\text{ВА}}{\text{кг}}$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

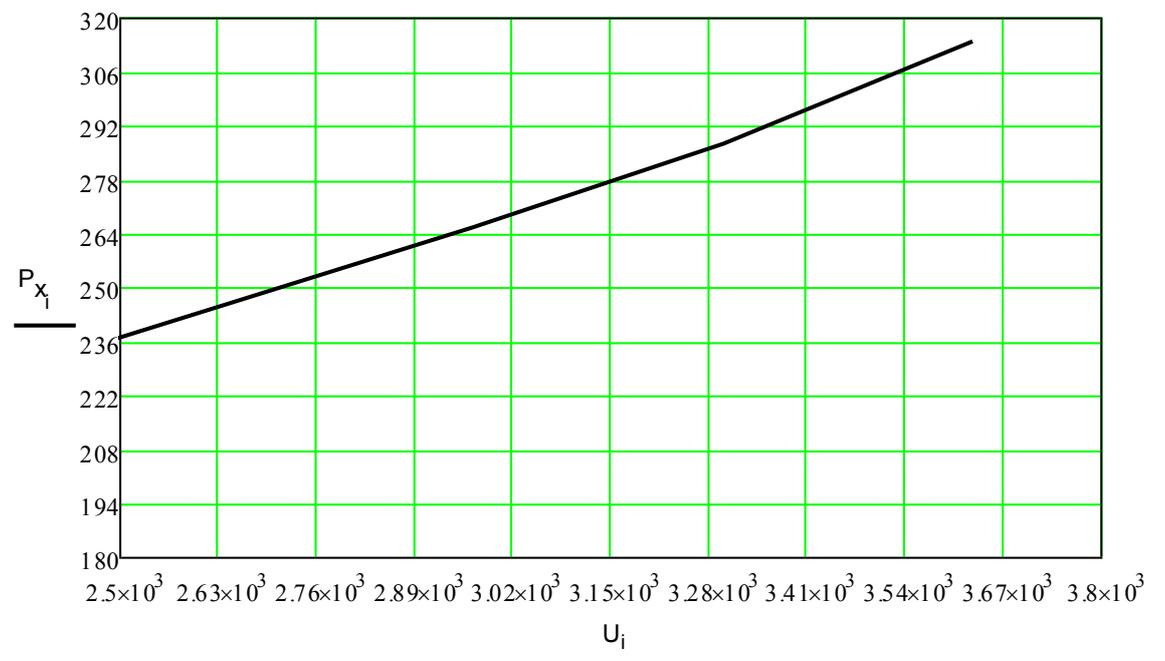
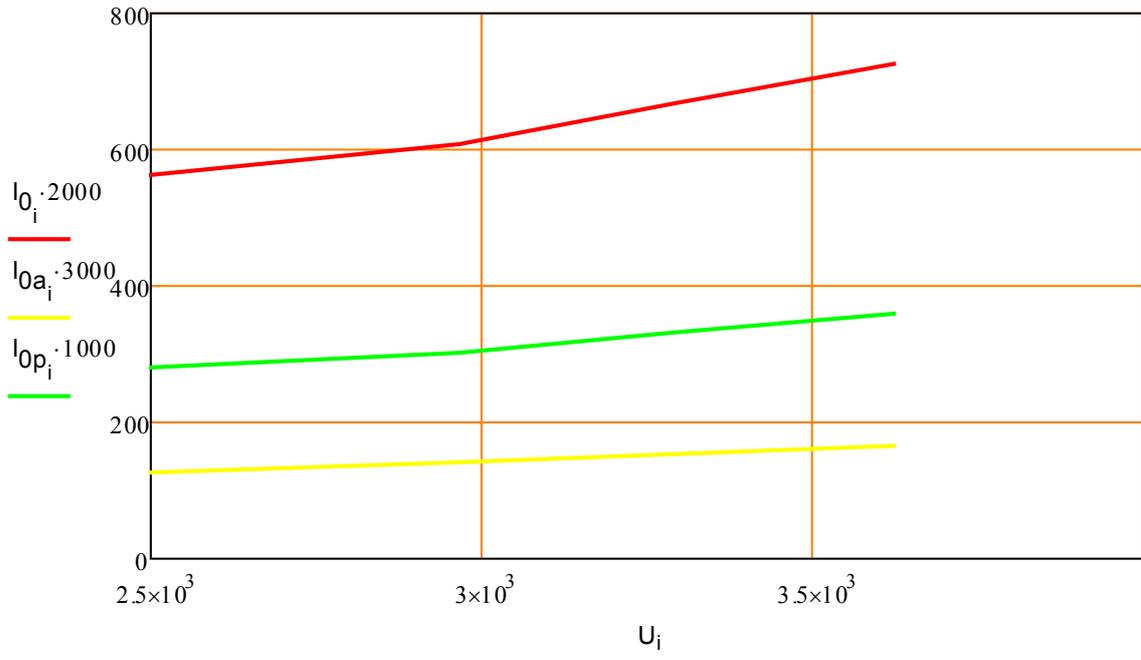
$$I_{0p} = \begin{pmatrix} 0.2486 \\ 0.2689 \\ 0.3 \\ 0.3296 \\ 0.3577 \end{pmatrix} \quad \text{А}$$

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

$$\cos \phi_0 := \frac{P_{x_i}}{I_0 \cdot U_i \cdot \sqrt{3}}$$

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

Построим необходимые зависимости:





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

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

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

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

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

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

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

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

Тогда

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

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

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:

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

где c – число активных стержней;

D_{cp} – средний диаметр обмотки;

w – число витков обмотки;

S – сечение витка;

Найдем средний диаметр:

1) обмотки ВН:

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

2) обмотки НН:

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

Определяем массы:

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

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

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:

$$\frac{P_k - P_{\text{КОНТ}}}{P_{\text{КОНТ}}} * 100\% = \frac{1346 - 1280}{1280} * 100\% = 5,2\% < 15\%$$

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:

$$P_k = 3 * I_{\text{НОМФ}} * r_k$$

Активная составляющая напряжения короткого замыкания, фазное значение

$$U_{a.\Phi} = I_{\text{НОМФ}} * r_k \quad \text{или} \quad u_a = (U_{a.\Phi} / U_{\text{НОМ.}\Phi}) * 100\%$$

Реактивная составляющая напряжения короткого замыкания, фазное значение

$$U_{p.\Phi} = I_{\text{НОМФ}} * x_k \quad \text{или} \quad u_p = (U_{p.\Phi} / U_{\text{НОМ.}\Phi}) * 100\%$$

Сопротивление Z_k

$$Z_k = \sqrt{r_k^2 + x_k^2}$$

$$\cos \gamma_k = \frac{r_k}{z_k}$$

Находим активные составляющие :

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

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

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

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

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

Коэффициент Роговского

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

Тогда

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

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

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

$$x_k = 7,251 \text{ Ом}$$

Находим реактивные составляющие :

$$U_{p\Phi} = I_{\text{НОМФ}} * x_k = 79,761 \text{ В}$$

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

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 Δu 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 $\cos \varphi_2 = 0,7$.

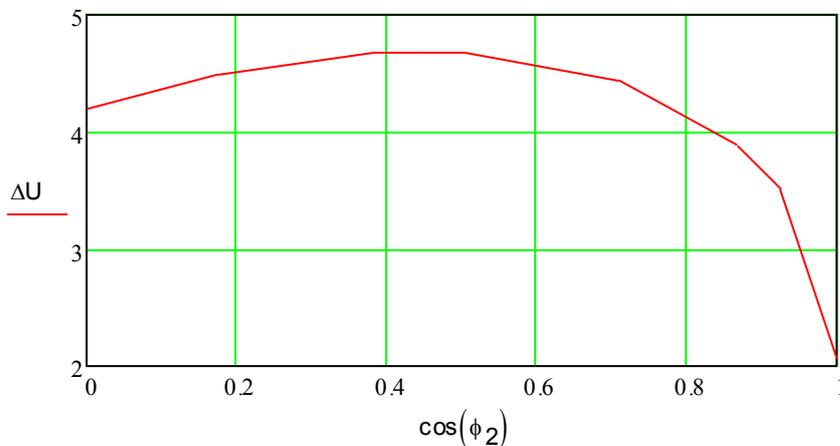
$$\beta := 1$$

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

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

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

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



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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

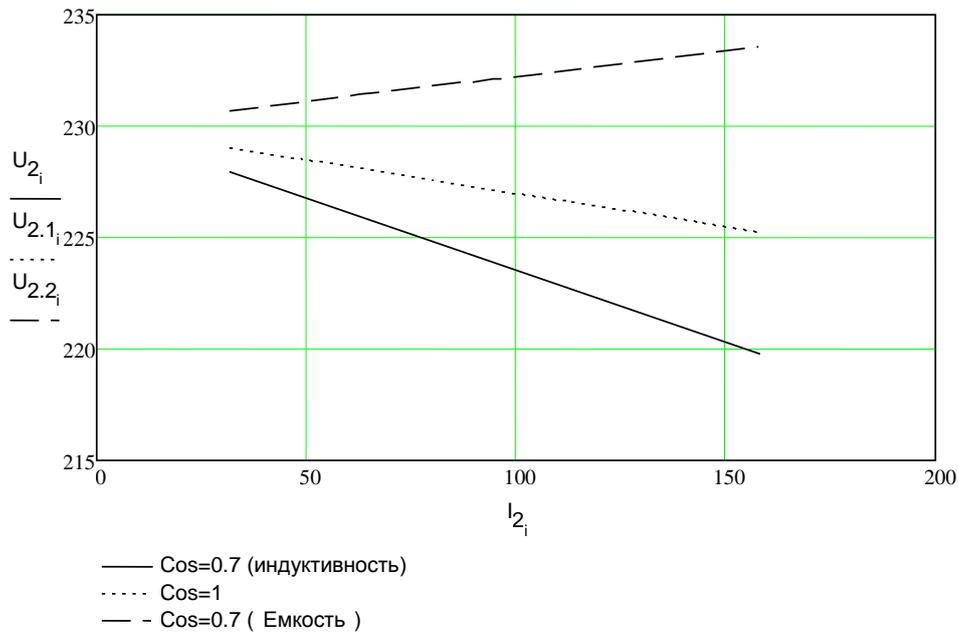
при $\cos\phi_2 := 0.7$ **РС нагрузка**

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

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

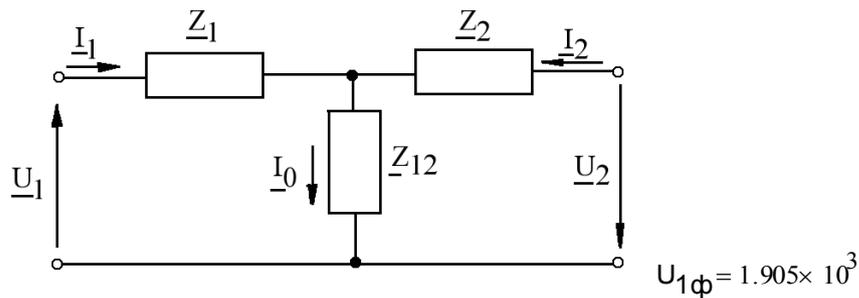
$$U_{2.2} := U_{2\text{ном}} \left(1 - \frac{\Delta U}{100} \right) \quad U_{2.2} = \begin{pmatrix} 230.709 \\ 231.419 \\ 232.128 \\ 232.838 \\ 233.547 \end{pmatrix} \quad \text{В} \quad I_2 = \begin{pmatrix} 31.629 \\ 63.258 \\ 94.886 \\ 126.515 \\ 158.144 \end{pmatrix} \quad \text{А}$$

По найденным значениям строим зависимости



5. Построить в масштабе приведенную векторную диаграмму для одной фазы трансформатора при нагрузке номинальным током и $\cos\phi_2=0,8$

Схема замещения трансформатора :



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

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

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

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

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

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

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

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

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

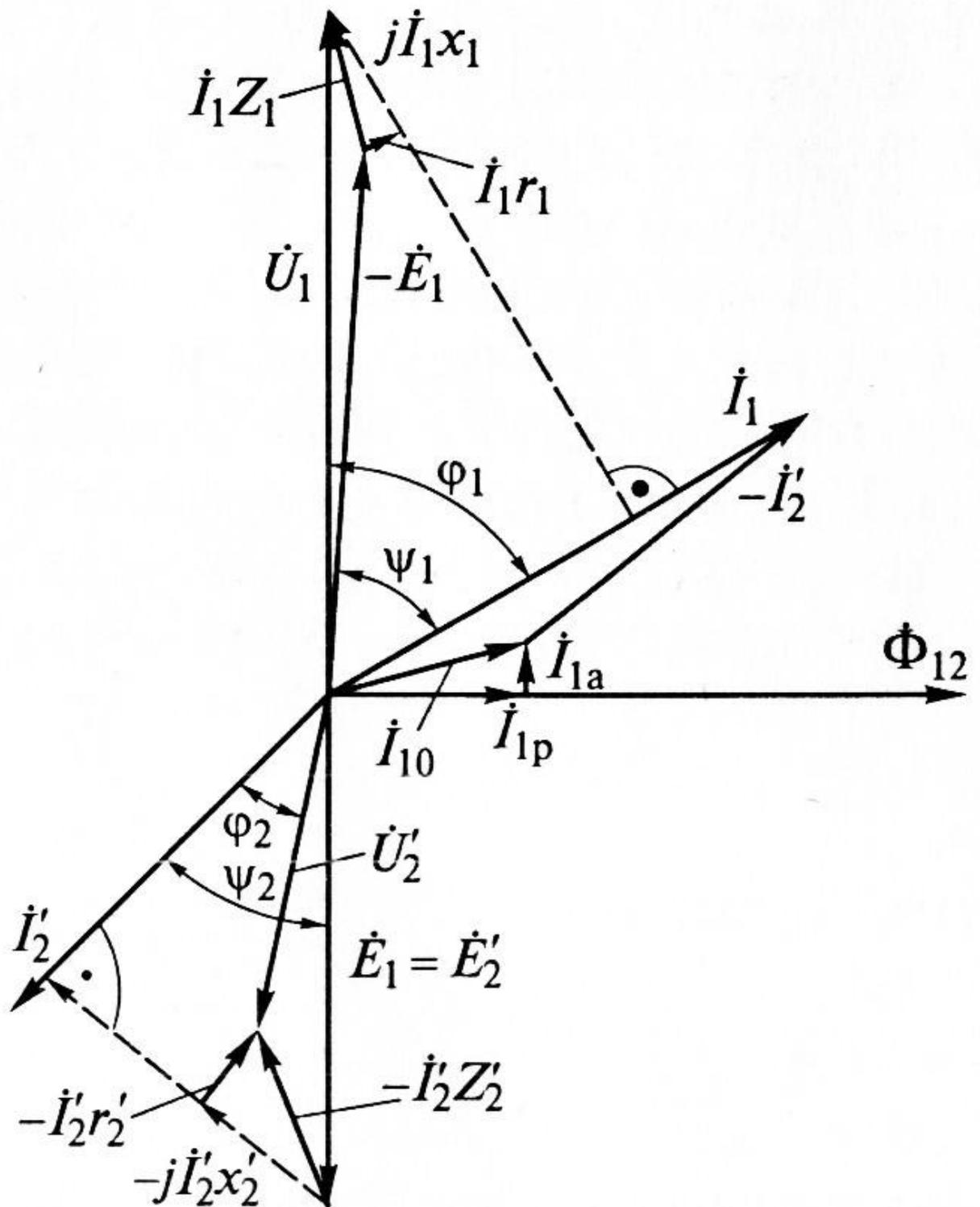
$$I_0 := 0.192 \text{ A}$$

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 η приобретает максимальное значение.

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

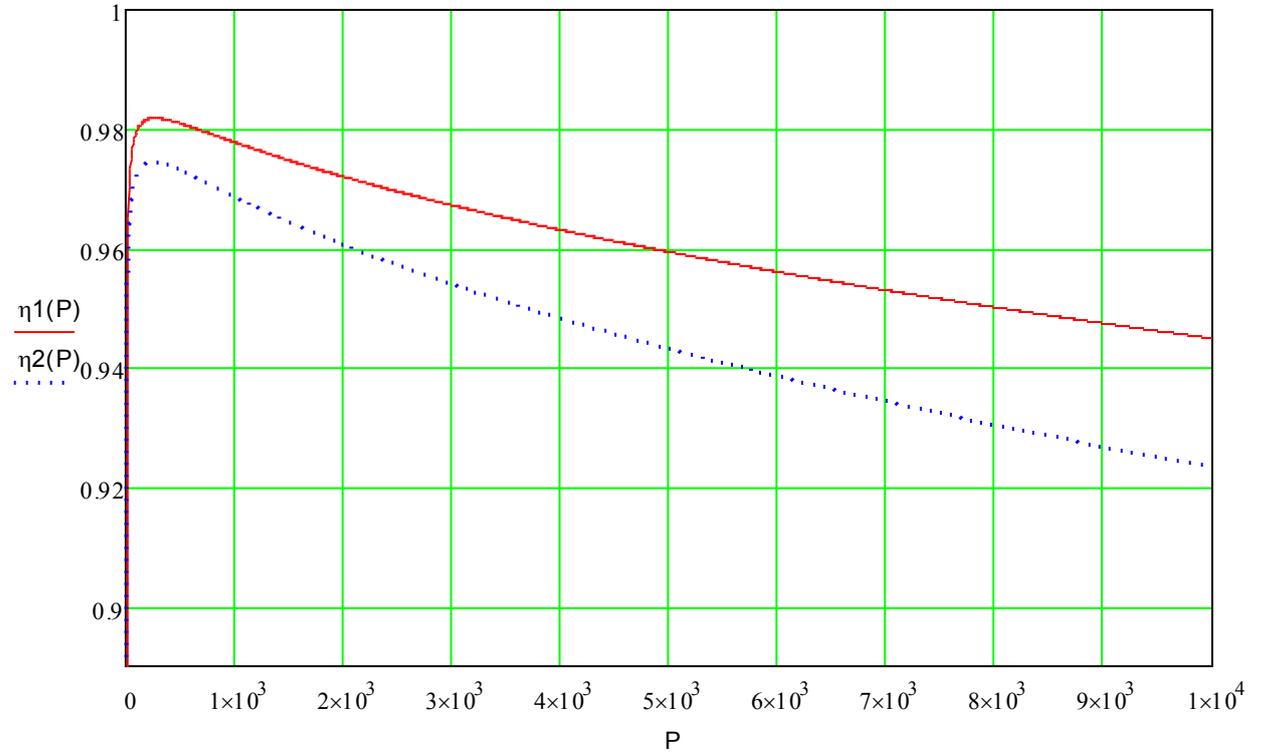
$$\eta_2(P) := 1 - \frac{\left(\frac{P}{P_k}\right) \cdot P_k + P_{xx}}{\sqrt{\frac{P}{P_k}} \cdot S \cdot \cos(\psi_3) \cdot 10^3 + \frac{P}{P_k} \cdot P_k + P_{xx}}$$

P - мощность потерь ХХ при номинальном напряжении.

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

$$\psi_2 := 0$$

$$\psi_3 := \text{acos}(0.7)$$



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

