

## РАСЧЕТНОЕ ЗАДАНИЕ ПО ТРАНСФОРМАТОРАМ

Для 3-фазного двухобмоточного трансформатора № 13 из таблицы 2 (первичная обмотка – обмотка ВН):

1. Определить фазные значения номинальных напряжений и токов обмоток и коэффициент трансформации.
2. Вычертить схемы соединения обмоток, обеспечивающие заданную группу соединения.
3. Определить массы стержней и ярм, потери холостого хода  $P_{0н}$ , среднее значение тока холостого хода  $I_{0н}$  (А) и  $i_{0н}$  (%), его активную  $I_{0а}$  и реактивную  $I_{0р}$  составляющие и коэффициент мощности для номинального напряжения и частоты 50 Гц.
4. Определить приведенные значения параметров схемы замещения  $r_{12}$ ,  $x_{12}$ ,  $z_{12}$  в Омах.
5. Определить массу обмоток ВН и НН и потери короткого замыкания  $P_{к.н}$ .
6. Определить приведенные значения параметров схемы замещения  $r_k$ ,  $x_k$ ,  $z_k$  в Омах, напряжение короткого замыкания  $U_{к.н}$  (В) и  $u_{к.н}$  (%) и коэффициент мощности.

### МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

#### к расчетному заданию

Перед выполнением расчетного задания необходимо прочитать соответствующие разделы конспекта лекций и рекомендованной литературы.

**К п.1.** При определении фазных значений напряжений и токов обмоток ВН и НН следует учитывать их схему соединения:

Для схемы У –  $U_{\phi} = U_{л} / \sqrt{3}$ ,  $I_{\phi} = I_{л}$ ; для схемы Д -  $U_{\phi} = U_{л}$ ,  $I_{\phi} = I_{л} / \sqrt{3}$ .

**К п. 2.** Порядок определения группы соединения:

1. Построить треугольник линейных и звезду фазных ЭДС обмотки ВН с маркировкой начал и концов (А-Х, В-У, С-З).

2. Построить фазные ЭДС обмотки НН с маркировкой начал и концов (а-х, b-у, с-з) и соединить их в соответствии со схемой соединения обмотки НН.

3. Вектор линейной ЭДС  $E_{AB}$  обмотки ВН совместить с минутной стрелкой часов, установленной на цифре 12. Тогда вектор линейной ЭДС  $E_{ab}$  обмотки НН, совмещенный с часовой стрелкой часов, будет указывать номер группы соединения.

**К п. 3.** Марка электротехнической стали указана в табл.1. Массы стержней и ярм равны:

$$G_c = 3 \cdot h_c \cdot P_c \cdot \gamma_{ст} \cdot 10^{-3}, \quad G_{я} = 4 \cdot c \cdot P_{я} \cdot \gamma_{ст} \cdot 10^{-3}, \text{ кг},$$

Где геометрические размеры стержня ( $h_c$ ,  $P_c$ ) и ярма ( $c$ ,  $P_{я}$ ) по табл.2,  $\gamma_{ст} = 7,65 \text{ г/см}^3$  - плотность электротехнической стали.

Потери холостого хода равны

$$P_{0н} = k_{п} \cdot (p_c \cdot G_c + p_{я} \cdot G_{я}), \text{ Вт},$$

где  $k_n = 1,4$  – коэффициент добавочных потерь;  $p_c, p_y$  – удельные потери в стали стержней и ярм (по табл. 2) для соответствующих значений индукций, которые определяются по формулам:

$$B_c = U_\phi / (4,44 \cdot w_1 \cdot f \cdot \Pi_c), \quad B_y = B_c \cdot \Pi_c / \Pi_y, \text{ Тл.}$$

Здесь  $U_\phi, w_1$  – фазное напряжение и число витков первичной обмотки (ВН).

Для определения тока холостого хода необходимо дополнительно рассчитать намагничивающую мощность  $Q_{0H}$

$$Q_{0H} = k_T \cdot (q_c \cdot G_c + q_y \cdot G_y), \text{ вар,}$$

Где  $k_T = 11-10$  (для трансформаторов мощностью 63-630 кВА), 5 (1000-6300 кВА), 4,5 ( $\geq 10000$  кВА) – коэффициент увеличения намагничивающей мощности, учитывающий технологию сборки сердечников;  $q_c, q_y$  – удельные намагничивающие мощности для рассчитанных значений индукций  $B_c$  и  $B_y$  (по табл. 1).

Полная мощность холостого хода равна  $S_{0H} = \sqrt{P_{0H}^2 + Q_{0H}^2}, \text{ ВА.}$

Ток холостого хода и его составляющие равны:

$$I_{0a} = P_{0H} / (3 \cdot U_{\phi 1}), \text{ А; } i_{0a} = 100 \cdot I_{0a} / I_{\phi 1}, \text{ \%; } I_{0p} = Q_{0H} / (3 \cdot U_{\phi 1}), \text{ А; } i_{0p} = 100 \cdot I_{0p} / I_{\phi 1}, \text{ \%};$$

$$I_{0H} = S_{0H} / (3 \cdot U_{\phi 1}), \text{ А; } i_{0H} = 100 \cdot I_{0H} / I_{\phi 1}, \text{ \%},$$

где  $U_{\phi 1}$  и  $I_{\phi 1}$  – фазные напряжение и ток обмотки ВН.

Коэффициент мощности равен  $\cos \varphi_{0H} = P_{0H} / S_{0H}, \text{ о.е.}$

*Сравнить полученные значения  $P_{0H}$  и  $i_{0H}$  с их значениями, приведенными в табл. 2.*

**К п. 4.** Параметры схемы замещения (в Омах) равны

$$r_{12} = P_{0H} / (3 \cdot I_{0H}^2), \quad x_{12} = Q_{0H} / (3 \cdot I_{0H}^2), \quad z_{12} = S_{0H} / (3 \cdot I_{0H}^2).$$

**К п. 5.** Масса обмоток ВН и НН ( $k_2$ ) определяется по формулам:

- для обмоток из медного провода  $G_{M1} = 84 \cdot 10^3 \cdot D_{cp1} \cdot w_1 \cdot \Pi_1, G_{M2} = 84 \cdot 10^3 \cdot D_{cp2} \cdot w_2 \cdot \Pi_2,$

- для обмоток из алюминиевого провода  $G_{M1} = 25,4 \cdot 10^3 \cdot D_{cp1} \cdot w_1 \cdot \Pi_1,$

$G_{M2} = 25,4 \cdot 10^3 \cdot D_{cp2} \cdot w_2 \cdot \Pi_2.$

Здесь  $D_{cp1} = D_1 + 2a_1 + 2a_{12} + a_2, D_{cp2} = D_1 + a_1$  – средние диаметры обмоток ВН и НН, м;  $\Pi_1$  и  $\Pi_2$  – сечения витка обмоток ВН и НН,  $m^2$ ;  $w_1, w_2$  – число витков обмоток ВН и НН (все размеры и числа витков приведены в табл. 2).

Потери короткого замыкания  $P_{к.н}$  равны  $P_{к.н} = k \cdot P_{к.осн},$

где  $k = 1,03$  (для  $S \leq 100$  кВА); 1,06 (160 – 630 кВА); 1,1 (1000 – 6300 кВА) – коэффициент добавочных потерь от полей рассеяния;  $P_{к.осн} = P_{к1} + P_{к2}$  – основные электрические потери в обмотках ВН и НН, равные:

- для обмоток из медного провода при расчетной рабочей температуре  $75^0C$

$$P_{к1} = 2,4 \cdot G_{M1} \cdot J_1^2, \quad P_{к2} = 2,4 \cdot G_{M2} \cdot J_2^2, \text{ Вт,}$$

- для обмоток из алюминиевого провода

$$P_{к1} = 12,75 \cdot G_{M1} \cdot J_1^2, \quad P_{к2} = 12,75 \cdot G_{M2} \cdot J_2^2, \text{ Вт.}$$

Здесь  $J_1 = I_{\phi 1} / \Pi_1$ ,  $J_2 = I_{\phi 2} / \Pi_2$  - плотность тока в обмотках ВН и НН, соответственно,  $A / \text{мм}^2$ .

**К п. 6.** Сопротивление короткого замыкания равно  $Z_{\kappa} = \sqrt{r_{\kappa}^2 + x_{\kappa}^2}$ ,  $\text{Ом}$ ,

где активная составляющая сопротивления короткого замыкания  $r_{\kappa} = P_{\kappa.н} / (3 \cdot I_{\phi}^2)$ , а индуктивная составляющая равна  $x_{\kappa} = (7,9 \cdot f \cdot w_1^2 \cdot \pi \cdot d_{12} \cdot a_p \cdot k_p \cdot 10^{-6}) / I_1$ ,  $\text{Ом}$ .

Здесь  $k_p = 1 - \sigma$  - коэффициент Роговского,  $\sigma = (a_{12} + a_1 + a_2) / (\pi \cdot l)$ ,  $d_{12} = D_1 + 2a_1 + a_{12}$  - средний диаметр канала между обмотками, м;  $l_1$  - высота обмотки ВН, м;  $a_p = a_{12} + (a_1 + a_2) / 3$ , м;

Напряжение короткого замыкания равно  $U_{\kappa.н} = \sqrt{U_{\kappa.а}^2 + U_{\kappa.р}^2}$ ,  $\text{В}$ ,

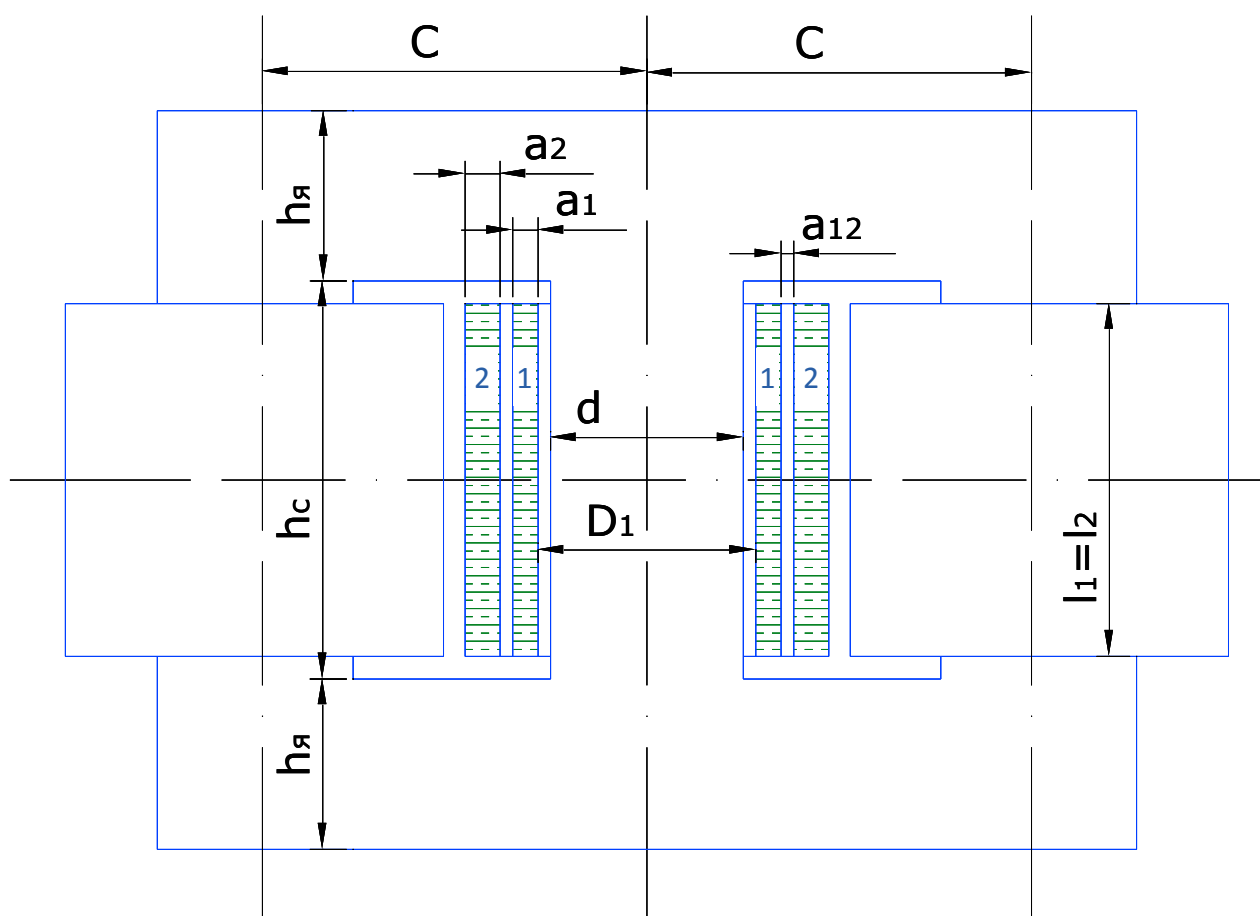
где  $U_{\kappa.а} = I_{\phi 1} \cdot r_{\kappa}$  - активная составляющая напряжения КЗ;  $U_{\kappa.р} = I_{\phi 1} \cdot x_{\kappa}$  - индуктивная составляющая.

Относительные значения напряжения короткого замыкания (%) равны

$$u_{\kappa.н} = 100 \cdot U_{\kappa.н} / U_{\phi 1}, \quad u_{\kappa.н.а} = 100 \cdot U_{\kappa.а} / U_{\phi 1}, \quad u_{\kappa.н.р} = 100 \cdot U_{\kappa.р} / U_{\phi 1}.$$

Коэффициент мощности равен  $\cos \varphi_{\kappa} = r_{\kappa} / Z_{\kappa}$ , о.е.

Сравнить полученные значения  $P_{\kappa.н}$  и  $u_{\kappa.н}$  с приведенными в табл.2.



1 - обмотка НН, 2 - обмотка ВН

Таблица 1

Удельные потери  $p$ , Вт/кг, и удельная намагничивающая мощность  $q$ , В·А/кг, для холоднокатаной электротехнической стали марок 3404 и 3405 толщиной 0,35 мм

В, Тл	Удельные потери $p$ , Вт/кг		Намагничивающая мощность $q$ , В·А/кг		В, Тл	Удельные потери $p$ , Вт/кг		Намагничивающая мощность $q$ , В·А/кг	
	3404	3405	3404	3405		3404	3405	3404	3405
1,00	0,475	0,450	0,548	0,533	1,60	1,295	1,230	1,775	1,602
1,20	0,675	0,635	0,752	0,732	1,62	1,353	1,278	1,956	1,748
1,30	0,785	0,755	0,900	0,860	1,64	1,411	1,326	2,131	1,894
1,40	0,930	0,875	1,060	1,020	1,66	1,472	1,380	2,556	2,123
1,50	1,100	1,030	1,330	1,246	1,68	1,536	1,440	3,028	2,435
1,52	1,134	1,070	1,408	1,311	1,70	1,600	1,500	3,400	2,747
1,54	1,168	1,110	1,486	1,376	1,72	1,672	1,560	4,480	3,547
1,56	1,207	1,150	1,575	1,447	1,74	1,744	1,620	5,560	4,347
1,58	1,251	1,190	1,675	1,524					

Таблица 2

Основные данные трехфазных двухобмоточных трансформаторов с естественным масляным охлаждением с алюминиевыми (№ 1—18) и медными (19—32) обмотками

№ п/п	Общие данные				Обмотки								Магнитная система					Бак		Контрольные данные					
	Мощность S, кВ×А	Схемы и группы соединений	Номинальные напряжения, В		Число витков		Сечение витка, мм <sup>2</sup>		Внутренний диаметр D <sub>1</sub> , см	Радиальные размеры, см		Канал между обмотками ВН и НН a <sub>2</sub> , см	Высота обмотки h <sub>1</sub> =l <sub>2</sub> , см	Диаметр стержня d, см	Активное сечение, см <sup>2</sup>		Высота, см		Расстояние между осями С, см	Масса масла, кг	Масса бака, кг	P <sub>к</sub> , Вт	P <sub>х</sub> , Вт	η <sub>к</sub> , %	I <sub>0</sub> , %
			ВН	НН	ВН	НН	ВН	НН		ВН a <sub>2</sub>	НН a <sub>1</sub>				стержень Пс	ярмо Пя	стержень h <sub>с</sub>	ярмо h <sub>я</sub>							
1	63	Y/Y-0	3300	230	710	49	9,1	84,5	11,9	3,5	1,4	1,4	40,0	11,0	80,6	92,4	44,0	10,5	26,0	170	80	1280	265	4,5	2,8
2	63	Y/Y-0	6000	420	1260	88	4,7	44,5	11,9	3,8	1,25	1,25	40,0	11,0	80,6	92,4	43,5	10,5	25,0	170	80	1280	265	4,5	2,8
3	63	Y/Y-0	10000	400	2100	84	2,83	46,8	11,9	3,75	1,3	1,3	39,5	11,0	80,6	92,4	43,4	10,5	25,5	170	80	1280	265	4,5	2,8
4	100	Y/Y-0	3300	230	605	42	10,9	192,5	12,4	3,15	2,2	1,1	49,5	11,5	90,2	107,9	53,5	11,5	26,0	210	150	1970	365	4,5	2,6
5	100	Y/Y-0	6000	440	1125	82	5,43	99,6	12,5	3,0	2,2	1,2	49,0	11,5	90,2	107,9	53,0	11,5	26,5	210	150	1970	365	4,5	2,6
6	100	Y/Д-11	6300	400	1180	130	5,75	63,4	12,5	3,1	2,3	1,0	49,0	11,5	90,2	107,9	53,5	11,5	26,5	210	150	1970	365	4,5	2,6
7	100	Y/Y-0	10000	400	1850	74	3,52	110,8	12,3	3,25	2,1	1,0	50,0	11,5	90,2	107,9	53,5	11,5	26,0	210	150	1970	365	4,5	2,6
8	160	Y/Y-0	3000	230	394	30	20,7	235,6	14,8	3,7	2,7	0,9	46,5	14,0	134,2	141,1	51,5	13,5	30,7	295	220	2650	565	4,5	2,4
9	160	Д/Y-11	3300	690	730	88	10,85	77,5	15,0	3,6	2,8	0,9	47,0	14,0	134,2	141,1	52,0	13,5	31,5	295	220	2650	565	4,5	2,4
10	160	Y/Д-11	6000	690	770	152	10,25	44,8	14,7	3,85	2,50	1,0	47,0	14,0	134,2	141,1	51,5	13,5	31,0	295	225	2650	565	4,5	2,4
11	160	Y/Y-0	10000	400	1273	51	6,15	132,6	14,8	3,95	2,45	0,95	46,5	14,0	134,2	141,1	51,5	13,5	30,7	295	225	2650	565	4,5	2,4
12	250	Y/Y-0	3300	230	358	25	33,5	348,0	16,0	4,5	2,5	1,0	55,0	15,0	155,1	168,1	59,0	14,5	33,5	340	260	3700	820	4,5	2,3
13	250	Д/Y-11	6600	440	1200	46	10,65	181,0	16,0	4,5	2,5	1,1	55,0	15,0	155,1	168,1	60,0	14,5	34,0	340	260	3700	850	4,5	2,3
14	250	Y/Д-11	6000	690	630	126	17,8	64,4	16,0	4,0	2,5	1,2	54,0	15,0	155,1	168,1	59,0	14,5	34,0	340	260	3700	820	4,5	2,3
15	250	Y/Y-0	10000	400	1050	42	11,1	198,0	16,0	4,55	2,45	0,95	55,0	15,0	155,1	168,1	59,0	14,5	33,0	340	260	3700	820	4,5	2,3
16	630	Д/Y-11	6000	400	624	24	29,2	469,0	21,0	5,2	3,15	0,9	59,3	20,0	271,6	282,6	66,0	19,5	40,5	790	480	7000	1420	5,0	1,5
17	1000	Д/Y-11	6000	400	441	17	40,7	754,8	25,0	4,45	1,95	3,05	68,0	24,0	371,0	372,5	78,0	23,0	48,0	1500	900	10000	2400	5,5	1,4
18	1600	Y/Y-0	10000	400	376	15	63,1	1403	29,4	4,35	3,6	1,1	97,0	26,0	435,0	440,7	107,0	25,0	52,0	2400	1120	14500	3100	5,0	1,3
19	25	Y/Y-0	3300	230	1032	72	2,78	22,3	9,8	1,8	2,2	1,45	28,0	9,0	56,1	57,7	34,0	8,5	21,3	95	60	490	120	4,5	3,0
20	25	Y/Y-0	11000	230	3441	72	0,785	32,4	9,8	2,7	1,25	1,35	28,05	9,0	56,1	57,7	34,0	8,5	21,3	95	60	490	120	4,5	3,0
21	40	Y/Y-0	3000	230	938	72	4,01	54,2	9,8	2,7	1,55	1,05	43,0	9,0	56,1	57,7	49,5	8,5	21,3	110	75	850	145	4,5	2,8

22	40	Y/Y-0	6000	400	1877	125	2,06	27,8	9,8	2,75	1,65	0,95	43,1	9,0	56,1	57,7	49,5	8,5	21,3	110	75	850	145	4,5	2,8
23	40	Y/Y-0	10000	400	3128	125	1,23	27,8	9,8	2,7	1,65	0,95	43,1	9,0	56,1	57,7	49,5	8,5	21,3	110	75	850	145	4,5	2,8
24	160	Y/Y-0	11000	440	1450	58	4,68	120	14,9	3,7	2,7	0,9	45,6	14,0	135,2	137,6	52,0	13,5	30,7	225	175	2100	460	4,5	1,7
25	250	Y/Y-0	11000	440	1100	44	7,3	154,8	17,0	3,65	2,6	1,2	49,5	16,0	166,0	172,0	55,5	15,5	33,0	315	225	3000	650	4,5	2,3
26	250	Y/Д-11	11000	190	1100	33	7,3	210	17,0	3,65	2,6	1,2	49,6	16,0	166,0	172,0	55,5	15,5	33,0	315	225	3000	650	4,5	2,3
27	400	Y/Д-11	11000	190	869	26	11,0	309,6	19,0	3,6	2,75	1,3	55,2	18,0	222,6	230,6	62,0	17,5	36,0	465	300	4100	900	5,0	1,5
28	400	Y/Y-0	11000	440	875	35	11,0	242,0	19,0	3,6	2,75	1,3	55,6	18,0	222,6	230,6	62,0	17,5	36,0	465	300	4100	900	5,0	1,5
29	630	Д/Д-0	11000	190	1158	20	11,1	564	21,0	4,45	3,4	1,4	58,0	20,0	271,6	282,6	66,0	19,5	40,5	800	480	5000	1400	5,5	1,6
30	630	Д/Y-11	11000	440	1170	27	11,1	417,6	21,0	4,45	3,4	1,4	58,0	20,0	271,6	282,6	66,0	19,5	40,5	840	480	5100	1400	5,5	1,6
31	630	Y/Y-0	6600	420	409	26	34,8	412,8	21,0	4,4	3,4	1,4	60,0	20,0	271,6	282,6	66,0	19,5	40,5	840	480	5100	1400	5,5	1,6
32	1600	Д/Y-11	11000	440	779	18	25,8	1120	27,0	4,55	3,6	1,9	97,0	26,0	463,5	469,5	107,0	25,0	52,0	2400	1120	12500	2400	5,5	1,3

1.  $f=50$  Гц.

2. Трансформаторы № 1—18 с алюминиевыми обмотками; трансформаторы № 19—32 с медными обмотками.

3. Обмотки ВН имеют пять ступеней напряжения: 95; 97,5; 100; 102,5;

105% от  $U_{ном}$ . Напряжения и числа витков обмотки ВН даны для средней ступени.

4. Магнитные системы собраны впереплет, с косыми стыками над крайними стержнями и прямым над средним стержнем, из холоднокатаной стали марки 3404 — 0,35 мм по ГОСТ 21427-83

5. Напряжение нулевой последовательности в процентах от номинального фазного отнесено к току нулевой последовательности, равному номинальному току.

6. Обмотки НН трансформаторов № 1—5, 7—10, 11—13, 15—25, 28, 30—32 соединены по схеме звезда с нулевым выводом.