



## 2.1.2. ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА (СЕМИНАР) № 2. ВЫСОКОПОТЕНЦИАЛЬНОГО ДВУХ ОБМОТОЧНОГО ТРАНСФОРМАТОРА, РАБОТАЮЩЕГО НА ПОВЫШЕННОЙ ЧАСТОТЕ

**Цель работы:** изучение принципов расчета высокопотенциального двух обмоточного трансформатора, работающего на повышенной частоте, изучение конструкции и принципов его работы, получение заданных входных и выходных параметров трансформатора, получение навыков расчета трансформатора по заданным параметрам выходных напряжения и тока.

### Задание по работе

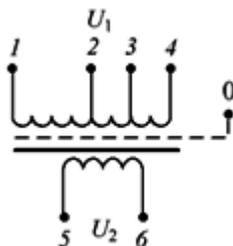
1. Получить задание.
2. Рассчитать параметры трансформатора по заданным характеристикам.
3. Проанализировать результаты работы, сформулировать краткие выводы по работе

### Методические указания по выполнению работы

**Исходные данные.** Частота тока  $f = 400$  Гц (синусоида). Напряжение  $U_1 = 115$  В. Напряжение вторичной обмотки  $U_2 = 12,6$  В. Ток вторичной обмотки  $I_2 = 6$  А. Потенциал, приложенный к вторичной обмотке,  $U = 30$  кВ. Допустимое падение напряжения  $\Delta U = 10$  %. Температура окружающей среды  $t_{\text{окр}} = +85$  °С. Срок службы 5000 ч. Режим работы – непрерывный. Специальные требования: а) обеспечить регулировку  $U_2$  на  $\pm 3$  % при  $I_2 = \text{const}$ ; б) в качестве материала магнитопровода использовать электротехническую сталь марки 3421.

**Расчет трансформатора.**

1. Электрическая схема рассчитываемого трансформатора приведена на рис. 2.2.1.



**Рис. 2.2.1.** Электрическая схема высокопотенциального трансформатора повышенной частоты: 1-6 – выводы обмоток

2. Расчетная мощность вторичной обмотки трансформатора:

$$P_{II} = U_2 \cdot I_2 = 12,6 \cdot 6 = 75,6 \text{ В} \cdot \text{А}.$$

3. Габаритная мощность трансформатора:

$$P_T = 1/2(P_1 + P_{II}) \approx P_{II} = 75,6 \text{ В} \cdot \text{А}.$$

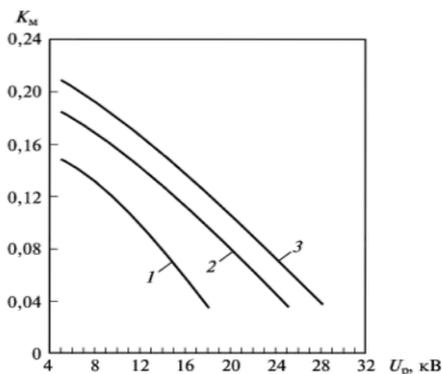
4. Максимальное рабочее напряжение, действующее на изоляцию:

$$\begin{aligned} U_p &= U_2(1 + \xi \cdot 10^{-2}) + U/\sqrt{2} = \\ &= 12,6 \cdot 1,03 + 30\ 000/\sqrt{2} = 21,3 \cdot 10^3 \text{ В} = 21,3 \text{ кВ}. \end{aligned}$$

5. Допустимый перегрев обмоток для срока службы 5000 ч при  $t_{\max} = 120 \text{ }^\circ\text{C}$ :

$$\theta' = t_{\max} - t_{\text{окр}} = 120 - 85 = 35 \text{ }^\circ\text{C}.$$

6. Коэффициент заполнения окна медью определяем по графикам, приведенным на рис. 2.1.5. При  $U_p = 21,3 \text{ кВ}$ ;  $K_M = 0,07$  для ПЛВ12,5Х12,5. Коэффициент заполнения окна медью  $K_M$  определяют по наименьшему типоразмеру магнитопровода, соответствующему значению  $U=21,3 \text{ кВ}$ .



**Рис. 2.2.2.** Зависимости коэффициента заполнения окна медью  $K_M$  от рабочего напряжения  $U_p$ :  
1 – ПЛВ10; 2 – ПЛВ12,5; 3 – ПЛВ16

7. Типоразмер магнитопровода определяем по графикам, приведенным на рис. 2.1.5. С учетом табл. 2.1.4 при  $\theta = 35^\circ\text{C}$ ,  $K_M = 0,07$ , для ПЛВ12,5х 2,5-62,5 допустимая мощность  $P_T \approx 76 \text{ В}\cdot\text{А}$ .

8. Проверяем неравенство  $P_T \leq P_{T\text{max}}$ :  $75,6 \leq 76$ . Неравенство выполняется. Принимаем магнитопровод типа ПЛВ 12,5х12,5-62,5.

9. Плотность тока (предварительное значение) определяем по графикам, представленным на рис. 1.5.13. Для  $K_M = 0,07$  при  $\theta = 35^\circ\text{C}$  магнитопроводу ПЛВ12,5х12,5 соответствует  $j_0 = 4,5 \text{ А/мм}^2$ .

10. Значение рабочей индукции определяется по графикам, приведенным на рис. 2.1.5. Для  $K_M = 0,07$  при  $\theta = 35^\circ\text{C}$  магнитопроводу ПЛВ12,5х12,5 соответствует  $B = 1,4 \text{ Тл}$ .

11. Электродвижущая сила, индуцированная в одном витке,

$$e = 4,44 B f S_c K_c 10^{-6} = 4,44 \cdot 1,4 \cdot 400 \cdot 156 \cdot 0,85 \cdot 10^{-6} = 0,33 \text{ В/вит},$$

где  $S_c = 156$  (см. табл. 2.2.1),  $K_c = 0,85$ ,  $f = 400 \text{ Гц}$ .



Таблица 2.2.1.  
 Значения основных параметров магнитопроводов типа ПЛВ и  
 размеры гильз для них

Размер окна магнитопровода, мм		$S_c, \text{мм}^2$	$l_c, \text{см}$	Масса магнитопровода $G_c, \text{г}$		Расчетные коэффициенты			Размеры гильз, мм				
$C_{\min}$	$h_{\min}$			при толщине стали, мм		$K_1$	$K_2$	$K_3$	$a_r$	$b_r$	$l_r$	$S_r$	
20,0	40,0	64	14,5	0,08	0,35	$K_1$	$K_2$	$K_3$	11,1	10,6	38,5	0,8	
				60	–	10,00	31,70	58,10					
				75	–	9,77	28,70	53,10					
				80	–	9,50	25,70	48,00					
				100	–	9,32	22,70	43,17					
20,0	50,0	100	18,1	115	–	6,67	20,50	39,10	13,5	13	48,5	1,0	
				125	–	6,51	18,55	35,80					
				160	–	6,35	16,60	32,50					
				200	–	6,20	14,65	29,00					
31,5	52,5	156	22,6	260	285	4,50	13,30	26,50	16	15,5	61	1,0	
				200	330	365	4,39	12,00					24,20
				250	415	470	4,28	10,70					21,90
				312	520	570	4,17	9,44					19,60
40,0	80,0	256	29,0	470	510	2,91	8,30	17,30	21	20,0	78,5	1,5	
				320	580	640	2,84	7,50					15,814,1 40
				400	730	800	2,77	6,60					14,14
				512	940	1020	2,70	5,85					12,84

Примечание.  $S_c$  – сечение стержня магнитопровода;  $l_c$  – длина средней магнитной силовой линии



12. Относительное падение напряжения (предварительное значение):

$$\Delta U_0 = 2,1 \cdot 10^{-2} j_0 l_{\text{к.ср}} / e = 2,1 \cdot 10^{-2} \cdot 4,5 \cdot 14,7 / 0,33 = 4,21 \%$$

При этом  $l_{\text{к.ср}}$  – средняя длина витка катушки, определяемая по выражению:

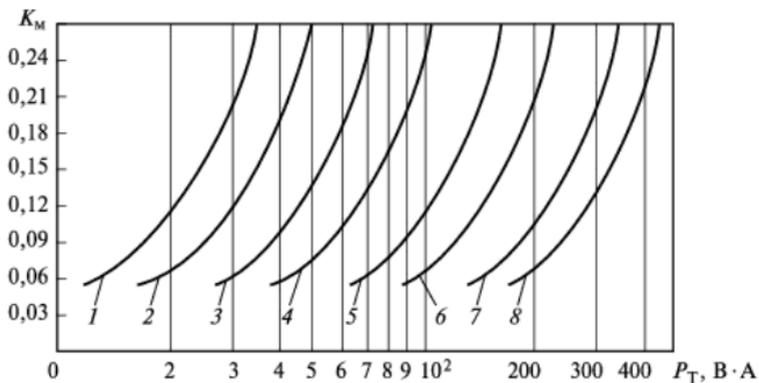
$$l_{\text{к.ср}} = 2a + 2b + \pi C_{\text{min}}$$

13. Число витков обмоток (предварительное значение) первичной:

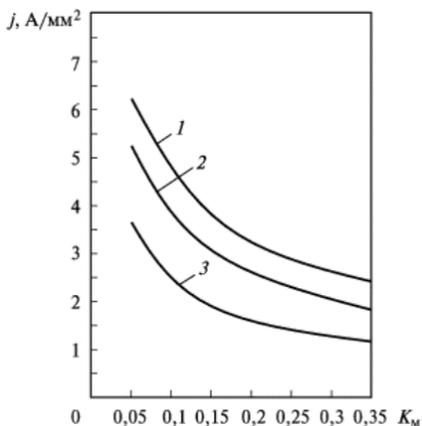
$$W_{01} = U_1 / e (1 - 0,8 \Delta U_0 \cdot 10^{-2}) = 115 / 0,33 (1 - 0,8 \cdot 4,21 \cdot 10^{-2}) = 337 \text{ витков};$$

вторичной:

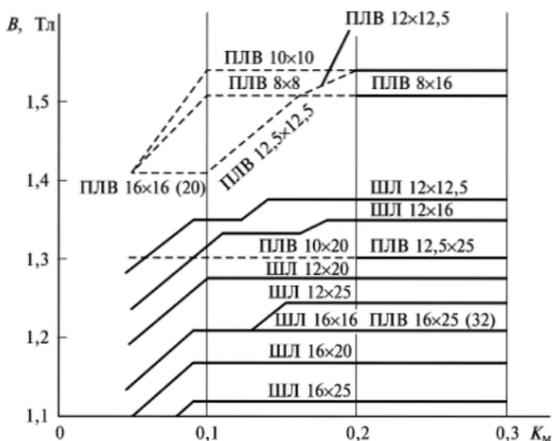
$$W_{02} = U_2 / e (1 + 1,2 \Delta U_0 \cdot 10^{-2}) = 12,6 / 0,33 (1 + 1,2 \cdot 4,21 \cdot 10^{-2}) = 40 \text{ витков}.$$



**Рис. 2.2.3.** Зависимости коэффициента заполнения окна медью  $K_M$  при  $f = 400$  Гц,  $\theta = 35$  °С от мощности трансформатора  $P_T$ : 1 – ПЛВ 8 x 8; 2 – ПЛВ 8 x 12,5; 3 – ПЛВ 10 x 10; 4 – ПЛВ 10 x 16; 5 – ПЛВ 12,5 x 12,5; 6 – ПЛВ 12 x 20; 7 – ПЛВ 16 x 16; 8 – ПЛВ 16 x 25



**Рис. 2.2.4.** Зависимости плотности тока  $j$  от коэффициента заполнения окна медью  $K_M$  при  $f = 400$  Гц,  $\theta = 35$  °С: 1 – ПЛВ 8 x 8; 2 – ПЛВ 12,5 x 12,5; 3 – ПЛВ 16 x 16



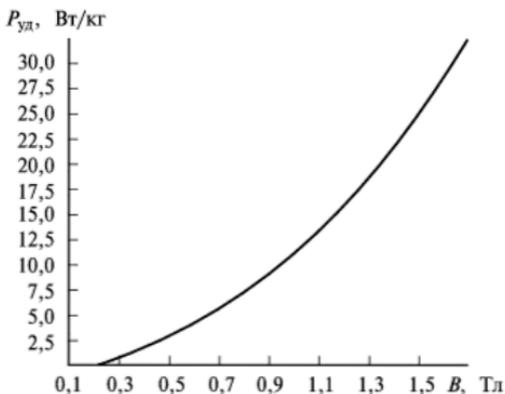
**Рис. 2.2.5.** Зависимость рабочей индукции  $B$  от коэффициента заполнения окна медью  $K_M$  при  $f = 400$  Гц,  $\theta = 35$  °С для магнитопроводов типов ШЛ и ПЛВ

14. Потери в магнитопроводе определяем по выражению:

$$P_c = P_{уд} G_c = 22 \cdot 260 \cdot 10^{-3} = 5,7 \text{ Вт.}$$



Параметр  $G_c$  определяется по табл. 2.2.1;  $P_{уд}$  – по графикам, приведенным на рис. 2.2.6.



**Рис. 2.2.6.** Зависимость удельных потерь в магнитопроводе из стали 3421 толщиной 0,08 мм  $P_{уд}$  от индукции  $B$  при  $f = 400$  Гц

15. Нагрузочная составляющая тока первичной обмотки:

$$I_{н1} = P_{II}/U_1(1 - 2\Delta U_o \cdot 10^{-2}) = 75,6/115(1 - 2 \cdot 0,0421) = 0,72 \text{ A.}$$

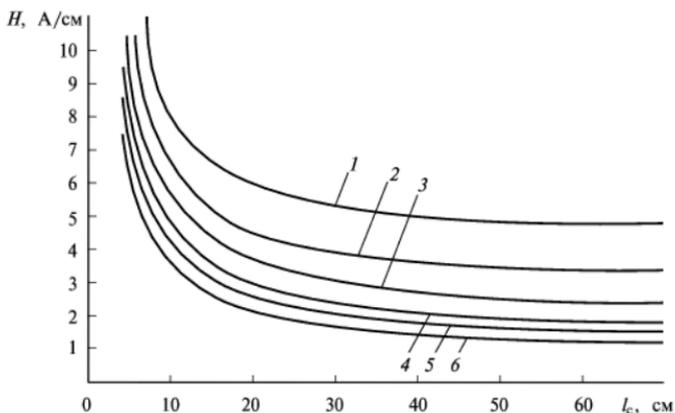
16. Активная составляющая тока первичной обмотки, учитывающая потери в магнитопроводе:

$$I_{a1} = P_c/U_1(1 - \Delta U_o \cdot 10^{-2}) = 5,7/115(1 - 0,0421) = 0,052 \text{ A.}$$

17. Реактивная составляющая намагничивающего тока в рабочем режиме:

$$I_{0p} = Hl_c/W_{01} = 3,5 \cdot 22,6/337 = 0,235 \text{ A.}$$

Значение  $l_c$ , определяется по табл. 1.23, а  $H$  - по графикам, приведенным на рис. 2.2.7.



**Рис. 2.2.7.** Зависимости напряженности магнитного поля  $H$  от средней длины магнитной силовой линии  $l_c$  для стали 3421:  
 $1 - B = 1,6$  Тл;  $2 - B = 15$  Тл;  $3 - B = 1,4$  Тл;  $4 - B = 1,3$  Тл;  $5 - B = 1,2$  Тл;  $6 - B = 1$  Тл

18. Ток первичной обмотки определяем из выражения:

$$I_1 = \sqrt{(I_{H1} + I_{A1})^2 + I_{Op}^2} = \sqrt{(0,72 + 0,0052)^2 + 0,235^2} = 0,807 \text{ А.}$$

19. Сечение обмоточного провода (предварительное значение):

$$q_{01} = I_1 / 1,15 j_0 = 0,807 / 1,15 \cdot 4,5 = 0,156 \text{ мм}^2;$$

$$q_{02} = I_2 / 0,85 j_0 = 6 / 0,85 \cdot 4,5 = 1,57 \text{ мм}^2.$$

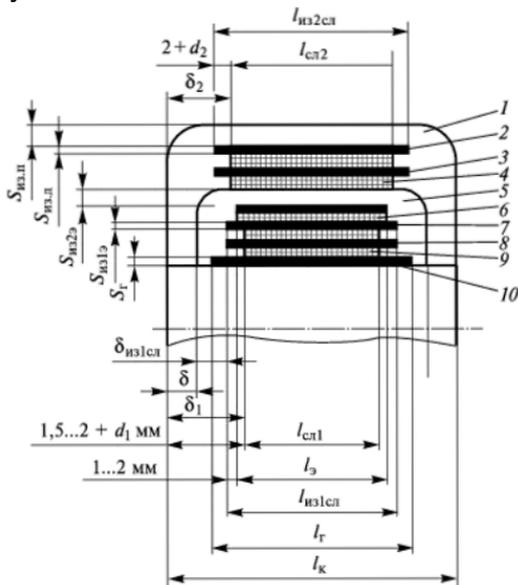
20. Определяем сечение, диаметр и марку провода. По табл. 1.18 для провода марки ПЭТВ-2  $q_1 = 0,159 \text{ мм}^2$ ;  $d_1 = 0,45 \text{ мм}$ ;  $q_2 = 1,54 \text{ мм}^2$ ;  $d_2 = 1,40 \text{ мм}$ .

21. Уточненное значение плотности тока  $j_i = I_i / q_i$ . Отсюда:

$$j_1 = I_1 / q_1 = 0,807 / 0,159 = 5,08 \text{ А/мм}^2;$$

$$j_2 = I_2 / q_2 = 6 / 1,54 = 3,90 \text{ А/мм}^2.$$

22. Схема расположения обмоток и изоляционных промежутков катушки приведена на рис. 2.2.8. Проведем расчет конструктивных параметров катушки.



**Рис. 2.2.8.** Схема расположения обмоток и изоляционных промежутков в катушке высоковольтного (высокопотенциального) трансформатора с двойной заливкой: 1 – заливочный компаунд вторичной заливки; 2 – демпферная изоляция вторичной обмотки; 3 – межслоевая изоляция вторичной обмотки, 4 – вторичная обмотка; 5 – заливочный компаунд первичной заливки; 6 – экран из медной фольги толщиной 0,06 мм; 7 – изоляция между экраном и первичной обмоткой; 8 – межслоевая изоляция первичной обмотки; 9 – первичная обмотка; 10 – гильза из материала АГ-4С

22.1 Длина слоя обмотки  $l_{исл} = l_K - 2\delta_i$ . Отсюда:

$$l_{1сл} = 60,5 - 2(4,5 + 0,45) = 50,6 \text{ мм};$$

$$l_{2сл} = l_K - 2\delta_2 = 60,5 - 2 \cdot 13,0 = 34,5 \text{ мм},$$

$\delta_i$  выбирается из табл. 2.2.2.



Таблица 2.2.2.  
 Значения изоляционных промежутков

$U_p$ , кВ	$P$ , кВ А	$\delta_1$ , мм	$\delta_2$ , мм	$\delta_{из1с}$ л, мм	$\delta_{из2сл}$ , мм	$S_{из.п.}$ , М М	$S_{из2э}$ , мм	Число слоев К-120 или ГСКВ-0,1		Располо- жение ка- тушек на стерж- нях
								$S_{из1э}$ , мм	$S_{из.л.}$ М М	
14,0	0,15	$4,5+d_1$	9,5	1,5	2,0	6,0	6,0	3	3	На одной
	0,50	$5,0+d_1$	10,5	1,5	2,0	6,5	6,5	3	3	На двух
	1,00	$8,0+d_1$	12,5	2,0	3,0	7,0	7,0	4	4	
	2,00	$9,0+d_1$	12,5	2,0	3,0	7,0	7,0	6	6	
	4,00	$10,0+d_1$	12,5	2,0	3,0	8,0	8,0	8	8	
	6,00	$11,0+d_1$	12,5	3,0	3,0	8,0	8,0	10	10	
20,0	0,15	$4,5+d_1$	13,5	1,5	2,0	9,5	9,5	3	3	На одной
	0,50	$5,0+d_1$	13,5	1,5	2,0	9,5	9,5	3	3	На двух
	1,00	$1,0+d_1$	15,0	2,5	3,5	10,0	10,0	4	4	
	2,00	$9,0+d_1$	15,0	2,5	3,5	10,0	10,0	6	6	
	4,00	$10,0+d_1$	18,0	2,5	3,5	11,0	11,0	8	8	
	5,00	$11,0+d_1$	18,0	2,5	3,5	11,0	11,0	10	10	
28,0	0,15	$4,5+d_1$	18,5	1,5	2,0	12,5	12,5	3	3	На одной
	0,50	$5,0+d_1$	18,5	1,5	2,0	12,5	12,5	3	3	На двух
	1,00	$8,0+d_1$	21,0	2,0	3,0	13,0	13,0	4	4	
	2,00	$9,0+d_1$	22,5	2,0	3,0	14,0	14,0	6	6	
	4,00	$11,0+d_1$	23,5	3,0	4,0	15,0	15,0	8	8	
	5,00	$12,0+d_1$	24,5	3,0	4,0	15,0	15,0	10	10	
35,0	0,15	$4,5+d_1$	22,5	1,5	3,0	15,5	15,5	3	3	На двух
	0,50	$5,0+d_1$	22,5	1,5	3,0	15,5	15,5	3	3	
	1,00	$1,0+d_1$	24,0	2,0	4,0	16,0	16,0	4	4	
	2,00	$9,0+d_1$	25,0	2,0	4,0	17,0	17,0	6	6	

22.2. Число витков в слое  $W_{исл} = l_{исл} k_y / d_{из.}$ . Отсюда:

$$W_{1сл} = 50,6 \cdot 0,93 / 0,51 = 92 \text{ витка};$$

$$W_{1сл} = 34,5 \cdot 0,87 / 1,5 = 20 \text{ витков.}$$



Значение  $k_y$  находим по табл. 2.2.2.

22.3. Определяем число слоев  $m_i = W_i / W_{исл}$ . Отсюда:

$$m_1 = \frac{337}{92} = 3,66 \approx 4; \quad m_2 = 40/20 = 2.$$

Отсюда:

$$m_1 = 2 \cdot 0,33 \cdot 92 = 61 \text{ В}; \quad m_2 = 2 \cdot 0,33 \cdot 20 = 13,2 \text{ В}.$$

22.5. Толщину межслоевой изоляции определяем по табл. 2.2.3. Для первой обмотки она равна 0,05 мм (ЭН-50), для второй обмотки – 0,12 мм (К-120).

Таблица 2.2.3.

Значения параметров межслоевой изоляции

Материал	Количество и толщина слоев изоляционного материала, мм	Максимальное допустимое межслоевое напряжение, кВ	Диаметр провода, мм
Пленка электроизоляционная ПЭТ-Э	1 x 0,02	0,20	До 0,3
Намоточная бумага ЭН50, ЭН70	2 x 0,02	0,40	0,3–0,6
	1 x 0,05	0,22	
	2 x 0,05	0,44	Свыше 0,9
	1 x 0,07	0,28	0,6–0,9
	2 x 0,07	0,56	Свыше 0,9
Изоляционная бумага К-120	1 x 0,12	0,37	Свыше 0,9
	2 x 0,12	0,74	
Конденсаторная бумага КОН	1 x 0,033	0,16	До 0,3
	2 x 0,033	0,32	
	3 x 0,033	0,46	Свыше 0,9
Стеклослоудинит ГСКВ 0,1	1 x 0,1	0,40	

22.6. Определим межобмоточную и поверхностную изоляции. По табл. 2.2.3 с учетом рис. 2.2.8:  $S_{из1э} = 0,36$  мм (три слоя бумаги К-120);  $S_{из2э} = 10,5$  мм (компаунд ЭЗК-10);  $S_{из.л} = 0,36$  мм (три слоя бумаги К-120);  $S_{из.л} = 10,5$  мм (компаунд ЭЗК-10).



22.7. Рассчитываем толщину обмотки по выражению  $S_i = [m_i d_{\text{изи}} + (m_i - 1) S_{\text{изисл}}] k_p$ , мм:

$$S_1 = [4 \cdot 0,51 + (4 - 1) \cdot 0,05] \cdot 1,1 = 2,41 \text{ мм};$$

$$S_2 = [21,5 + (2 - 1) \cdot 0,12] \cdot 1,15 = 3,59 \text{ мм}.$$

22.8. Толщина катушки:

$$\begin{aligned} S_k &= S_r + S_1 + S_{\text{из1э}} + S_э + S_{\text{из2э}} + S_2 + S_{\text{из,д}} + S_{\text{из,п}} = \\ &= 1,0 + 2,41 + 0,36 + 0,05 + 10,5 + 3,59 + 0,46 + 10,5 \\ &= 28,87 \text{ мм}. \end{aligned}$$

22.9. Проверяем неравенство  $S_k < C_{\text{min}}$ :

$$28,87 < 31,5.$$

22.10. Средняя длина витка обмотки:

$$l_{1\text{cp}} = 2(a_r + b_r) + \pi S_1 = 2(16 + 15,5) = 3,14 \cdot 2,41 = 70,6 \text{ мм};$$

$$\begin{aligned} l_{2\text{cp}} &= 2(a_r + b_r) + 2\pi(S_1 + S_{\text{из1э}} + S_э + S_{\text{из2э}} + 0,5S_2) = \\ &= 2(16 + 15,5) + 2 \cdot 3,14(2,41 + 0,36 + 0,05 + 10,5 + 0,5 \cdot 3,59) \\ &\approx 158 \text{ мм}. \end{aligned}$$

Значения  $a_r, b_r$  выбираем из таблицы 2.2.3.

22.11. Рассчитываем длину провода обмотки по формуле:

$$L_i = l_{i\text{cp}} W_i \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$L_1 = 70,6 \cdot 337 \cdot 10^{-3} = 23,8 \text{ м};$$

$$L_2 = 159 \cdot 40 \cdot 10^{-3} = 6,32 \text{ м}.$$



22.12. Определяем сопротивление обмотки по формуле:

$$R_{i20} = 1,75 \cdot 10^{-2} L_i / q_i:$$

$$R_{1-20} = 1,75 \cdot 10^{-2} \cdot 23,8 / 0,159 = 2,62 \text{ Ом};$$

$$R_{i20} = 1,75 \cdot 10^{-2} \cdot 63,2 / 1,54 \approx 0,0723 \text{ Ом}.$$

22.13. Маса провода обмотки рассчитывается по формуле:

$$G_{mi} = L_i q_i \gamma \cdot 10^{-3} \text{ кг};$$

$$G_{mi} = 23,8 \cdot 0,159 \cdot 8,9 \cdot 10^{-3} = 0,0337 \text{ кг};$$

$$G_{mi} = 6,32 \cdot 1,54 \cdot 8,9 \cdot 10^{-3} = 0,0870 \text{ кг},$$

где  $\gamma$  – удельная масса меди, равная  $8,9 \text{ г/см}^3$ .

23. Активное сопротивление обмотки:

$$R_{it} = R_{i20} [1 + 0,004(5 + \theta_{\text{доп}})]:$$

$$R_{1t} = 2,62 [1 + 0,004(5 + 35)] = 3,04 \text{ Ом};$$

$$R_{2t} = 0,0723 [1 + 0,004(5 + 35)] = 0,0839 \text{ Ом}.$$

24. Потери в меди:

$$P_M = \sum I_i^2 R_{it} = I_1^2 R_{1t} = I_2^2 R_{2t};$$

$$0,807^2 \cdot 3,04 + 6^2 \cdot 0,0839 = 5,00 \text{ Вт}.$$

25. Определим перегрев обмоток трансформатора:

$$\theta = K_1 [P_M - (P_M K_1 - P_c K_2) / K_3] \\ = 4,5 [5 - (5 \cdot 4,5 - 5,7 \cdot 13,3) / 26,5] = 32 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Коэффициенты  $K_1, K_2, K_3$  выбираем по табл. 2.2.3.



26. Проверяем неравенство  $\theta \leq \theta: 32 \leq 35$ . Неравенство соблюдается. При несоблюдении неравенства следует перейти к большему типоразмеру магнитопровода и повторить расчет.

27. Рассчитаем активную составляющую полного падения напряжения по:

$$\begin{aligned}\Delta U_{ai} &= I_i R_{it}; \\ \Delta U_{a1} &= 0,807 \cdot 3,04 = 2,45 \text{ В}; \\ \Delta U_{a2} &= 6 \cdot 0,0839 = 0,5934 \text{ В}.\end{aligned}$$

28. Реактивная составляющая полного падения напряжения:

$$\begin{aligned}\Delta U_{pi} &= 7,85 \cdot 10^{-8} I_i f (W_{i2} l_{icp} K_R / l_{cli}) [(S_{из1э} + S_{из2э}) / 2 + S_i / 3]: \\ \Delta U_{p1} &= 7,85 \cdot 10^{-8} \cdot 0,807 \cdot 400 (332^2 \cdot 70,6 \cdot 0,8 / 50,6) \times \\ &\quad \times [(1,05 + 0,03 / 2 + 0,241 / 3)] = 2,00 \text{ В}; \\ \Delta U_{p2} &= 7,85 \cdot 10^{-8} \cdot 6,0 \cdot 400 (40^2 \cdot 159 \cdot 0,8 / 34,5) \times \\ &\quad \times [(1,05 + 0,03 / 2 + 0,359 / 3)] = 0,732 \text{ В}.\end{aligned}$$

29. Полное падение напряжения на обмотках:

$$\begin{aligned}\Delta U_i &= \Delta U_{ai} + \Delta U_{pi}^2 / 200: \\ \Delta U_1 &= 2,45 + 2,00^2 / 200 = 2,47 \text{ В}; \\ \Delta U_2 &= 0,5934 + 0,732^2 / 200 = 0,506 \text{ В};\end{aligned}$$

30. Относительное падение напряжения:

$$\begin{aligned}\Delta U_{10} &= [\Delta U_1 / (U_1 - \Delta U_1) + \Delta U_i / (U_i + \Delta U_i)] 10^2, i = 2 \dots n; \\ \Delta U_{20} &= [2,49 / 115 - 2,49 + 0,508 / 12,6 + 0,508] \cdot 100 \% = 6,1 \%\end{aligned}$$



31. Проверяем неравенство  $\Delta U_{i0} \leq \Delta U$ :

$$6,1 \leq 10.$$

Неравенство выполняется. При несоблюдении неравенства следует перейти к большему типоразмеру магнитопровода и повторить расчет. При этом плотность тока корректируется по формуле

$$j_k = jP_r/P_T.$$

32. Уточняем значение числа витков первичной обмотки:

$$W_1 = (U_1 - \Delta U_1)/e = (115 - 2,47)/0,33 = 341 \text{ виток.}$$

33. Уточняем значение числа витков вторичной обмотки:

$$W_2 = (U_2 + \Delta U_2)/e = (12,6 + 0,506)/0,33 = 40 \text{ витков.}$$

34. КПД трансформатора:

$$\eta = P_{II}/(P_{II} + P_m + P_c) = 75,6/(75,6 + 5 + 5,7) = 0,876.$$

35. Потери в магнитопроводе при холостом ходе составляют

$$P_{cx} = P_{уд}G_c = 23,5 \cdot 260 \cdot 10^{-3} = 6,1 \text{ Вт.}$$

При этом  $P_{уд}$  определяется по рис. 1.5.15 при

$$B_x = U_1/(U_1 - \Delta U_{a1})B = 115/(115 - 2,45) \cdot 1,4 = 1,430 \text{ Тл.}$$

36. Активная составляющая тока холостого хода:

$$I_{0a} = P_{cx}/U_1 = 6,0/115 = 0,053 \text{ А.}$$

37. Реактивная составляющая тока холостого хода:

$$I_{0p} = H_x l_{cp}/W_1 = 3,8 \cdot 22,6/341 = 0,252 \text{ А.}$$



38. Ток холостого хода:

$$I_0 = \sqrt{I_{0a}^2 + I_{0p}^2} = \sqrt{0,053^2 + 0,252^2} = 0,258 \text{ А.}$$

39. Масса изоляции трансформатора:

$$\begin{aligned} G_{\text{из}} &= 1,65(1 - K_M)hc l_{\text{к.ср}} \cdot 10^{-3} \\ &= 1,65(1 - 0,07) \cdot 6,25 \cdot 3,1 \cdot 14,7 \cdot 10^{-3} \\ &= 0,437 \text{ кг.} \end{aligned}$$

40. Масса трансформатора:

$$\begin{aligned} G_{\text{ТР}} &= 1,1(G_c + G_M + G_{\text{из}}) = 1,1(0,26 + 0,0337 + 0,089 + 0,437) \\ &\approx 0,9 \text{ кг.} \end{aligned}$$

41. Отводы в первичной обмотке для регулировки вторичного напряжения рассчитываются по формуле:

$$W_{i\xi\pm} = (W_1 \pm \Delta U_1 / e \cdot 10^{-2})(1 \pm \xi \cdot 10^{-2});$$

$$W_{1\xi-} = (341 + 3 \cdot 2,47 / 0,33 \cdot 10^{-2})0,97 = 331 \text{ виток;}$$

$$W_{1\xi+} = (341 - 3 \cdot 2,47 / 0,33 \cdot 10^{-2})1,03 = 351 \text{ виток.}$$

42. Проверка укладки обмоток с учетом отводов: должно быть:  
 $W_{\text{исл}} m_i \geq W_{i\xi\pm}(W_i)$ ;  $W_{\text{исл}} m_1 = 92,4 \cdot 4 = 368 > 351$ ;  $W_{\text{исл}} m_2 = 20 \cdot 2 = 40$ .

Вывод: обмотки укладываются.

### Контрольные вопросы

1. Какой коэффициент заполнения окна рекомендуется?
2. Можно ли использовать для обмоток медный не изолированный провод?
3. Как определить диаметр провода по известному току, протекающему по этому проводу?
4. Что такое габаритная мощность?
5. Как зависят удельные потери в магнитопроводе от индукции  $B$ ?