



## 2.1.1. ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА (СЕМИНАР) № 1. НИЗКОВОЛЬТНОГО ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ТРАНСФОРМАТОРА НА БАЗЕ СТАНДАРТНОГО МАГНИТОПРОВОДА

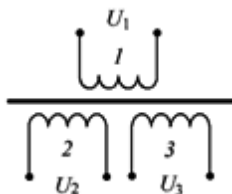
**Цель работы:** изучение принципов расчета низковольтного высокочастотного трансформатора на базе стандартного магнитопровода, изучение конструкции и принципов их работы, получение заданных входных и выходных параметров трансформатора, получение навыков расчета силового трансформатора по заданным параметрам 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.** Входное напряжение подается от двухтактного инвертора и имеет форму меандра. Трансформатор, работающий на частоте  $f = 50$  кГц, выполнен с одной первичной и двумя вторичными обмотками (рис. 2.1.1). Напряжение на первичной обмотке определяется входным напряжением ИЭП и схемой инвертора. При входном напряжении 220 В с выхода трехфазного моста с емкостным фильтром на полумостовой инвертор и далее на первичную обмотку подается напряжение, которое с учетом допустимого отклонения в меньшую сторону принимаем равным  $U_1 = 132$  В.



**Рис. 2.1.1.** Электрическая схема низковольтного трансформатора: 1-3 - обмотки



Напряжения на обмотках 2 и 3 заданы с учетом падения напряжения на диодах выходных выпрямителей:  $U_2 = 4$  В;  $U_3 = 10$  В. Токи обмоток 2 и 3 определяются нагрузками и принимаются равными:  $I_2 = 60$  А;  $I_3 = 0,5$  А. Диапазон изменения температуры окружающей среды задан с учетом размещения трансформатора в составе аппаратуры от  $-50$  до  $+65$  °С.

Расчет трансформатора.

1. Выходная мощность трансформатора:

$$P_{\text{вых}} = U_2 I_2 + U_3 I_3 = 4 \cdot 60 + 10 \cdot 0,5 = 245 \text{ В} \cdot \text{А}$$

2. Принимаем КПД трансформатора  $\eta = 0,99$ . Тогда для активной нагрузки входная мощность трансформатора:

$$P_1 \approx P / \eta = 245 / 0,99 = 247,5 \text{ В} \cdot \text{А}$$

3. Входной ток трансформатора:

$$I_1 = \frac{P_1}{U_1} = \frac{247,5}{132} = 1,875 \text{ А}$$

Округляем значение входного тока в большую сторону:  $I_1 = 2$  А.

4. По значению входной мощности  $P_1 = 247,5$  В·А для частоты  $f = 50$  кГц выбираем из табл. 2.1.1. типоразмер магнитопровода Ш12х15 марки М2000НМ1-14. (В технической документации записывается: «сердечник замкнутый М2000НМ1-14. Ш12х15..ТУ».)

5. Площадь эквивалентного поперечного сечения выбранного магнитопровода  $A_e = 1,8$  см<sup>2</sup> (см. табл. 2.1.1).

6. Площадь поперечного сечения провода обмотки определяется допустимой плотностью тока  $j$ :  $q = I / j$ . Для выбранного магнитопровода из табл. 1.20 определяем допустимую плотность тока  $j \leq 4,4$  А/мм<sup>2</sup>.

6.1. Учитывая значительный запас по мощности ( $247,5$  В·А <  $400$  В·А), для первичной обмотки принимаем  $j_1 = 2$  А/мм<sup>2</sup>. Тогда сечение провода первичной обмотки  $q_1 = I_1 / j_1 = 2/2 = 1$  мм<sup>2</sup>. В каче-



стве обмоточного выбираем провод марки ПЭТВ-2 с параметрами, приведенными в табл. 2.1.1.

*Таблица 2.1.1.*

Значения параметров трансформаторов для различных значений мощности и частоты при напряжениях до 300 В

$A_e S_o,$ $\text{см}^4$	$P, \text{ Вт, при } f, \text{ кГц}$			Типоразмер магнитопровода	Параметры конструкции трансформаторов, мм				
	10	20	50		$a$	$b$	$L_n$	$h_o$	$h_s$
0,008	0,4	0,6	1	Ш2,5x2,5	–	–	–	–	–
0,015	0,8	1,2	2	Ш3x3	–	–	–	–	–
0,053	2	3	5	Ш4x4	–	–	–	–	–
0,13	4	6	8	Ш5x5	–	–	–	–	–
0,29	8	12	20	Ш6x6	6,6	6,8	13	5	4
0,56	15	20	35	Ш7x7	7,7	7,9	16	6	4,9
1,06	30	45	80	Ш8x8	8,8	9	20	7,5	6,3
2,08	60	90	120	Ш10x10	10,8	11	23	8	6,8
4,9	140	210	400	Ш12x15	12,8	16	27	9	7,8
13,4	380	570	900	Ш16x20	16,8	21	35	11	9,6
30,0	840	1000	1500	Ш20x28	20,8	29	41	12	10,5



Таблица 2.1.1.  
Продолжение

$A_e$ , см <sup>2</sup>	$L_{ср.с}$ , см	$M_c$ , г	$\mu_3$	$\xi$ , °C/Вт	Рекомендуемые параметры				
					$j$ , А/мм <sup>2</sup>	$B$ , Тл, при $f$ , кГц			$\Delta U$ , %
						10	20	50	
0,075	2,15	0,47x2	1027	–	8,0	0,2	0,2	0,2	9,0
0,105	2,64	0,79x2	1130	–	7,0	0,2	0,2	0,2	8,5
0,193	3,45	1,91x2	1260	–	6,5	0,2	0,2	0,2	8,0
0,3	4,31	3,70x2	1345	–	6,0	0,2	0,2	0,2	7,5
0,424	5,28	6,22x2	1445	25,4	6,0	0,2	0,2	0,2	7,0
0,62	6,29	11,75x2	1520	19,1	5,5	0,2	0,2	0,19	6,0
0,692	7,51	13,6x2	1575	16,0	5,0	0,2	0,2	0,18	5,0
1,0	8,38	22,2x2	1615	11,6	4,7	0,2	0,2	0,17	4,0
1,8	9,67	46,0x2	1655	9,17	4,4	0,2	0,19	0,16	3,0
3,2	12,30	104,0x2	1720	5,72	4,0	0,2	0,18	0,15	2,0
5,77	14,40	223,0x2	1755	3,63	3,2	0,2	0,17	0,14	1,0

*Примечание.*

$A_e S_0$  – произведение эквивалентного сечения и площади окна магнитопровода, см<sup>4</sup>;

$P$  – мощность при частоте тока  $f$ , кГц;

$A_e$  – эквивалентное сечение магнитопровода, см<sup>2</sup>;

$L_{ср.с}$  – длина средней линии магнитопровода, см;

$M_c$  – масса магнитопровода, г;

Для увеличения коэффициента заполнения окна магнитопровода и снижения потерь мощности возьмем два провода с диаметрами по меди  $d_{м1} = 0,8$  мм (сечение  $0,5$  мм<sup>2</sup>) и по изоляции  $d_{из1} = 0,88$  мм.

6.2. Для второй обмотки принимаем  $j_2 = 2,4$  А/мм<sup>2</sup>. Тогда сечение провода второй обмотки  $q_2 = 60/2,4 = 25$  мм<sup>2</sup>. Для второй обмотки выбираем ленту медную ГОСТ 1173-2006 с поперечными размерами 25 x 1 мм.

6.3. Для третьей обмотки принимаем  $j_3 = 2,55$  А/мм<sup>2</sup>. Тогда сечение провода третьей обмотки  $q_3 = 60/2,55 = 0,196$  мм<sup>2</sup>. Этому се-



чению соответствует провод с диаметром по меди  $d_{м3} = 0,5$  мм и диаметром по изоляции  $d_{из3} = 0,56$  мм.

7. Число витков первичной обмотки  $W_1 = U_1 \cdot 10^4 / 4k_\phi fBA_e$ , где  $k_\phi$  – коэффициент формы трансформируемого напряжения (для синусоиды  $k_\phi = 1,11$ , для меандра = 1). По данным табл. 1.5.4 индукция в выбранном магнитопроводе при частоте  $5 \cdot 10^4$  Гц не должна превышать значение 0,16 Тл. Принимаем значение индукции меньше допустимого приблизительно на 30 % (учитывая запас по мощности):  $B = 0,115$  Тл. Тогда число витков первичной обмотки:

$$W_1 = 132 \cdot 10^4 / (4 \cdot 1 \cdot 5 \cdot 10^4 \cdot 0,115 \cdot 1,8) = 31,99.$$

Для удобства расположения выводов первичной обмотки принимаем  $W_1 = 32,5$  витка.

8. Значение электродвижущей силы, приходящейся на один виток первичной обмотки:

$$e = U_1 / n_1 = 132 / 32,5 = 4,06 \text{ В/виток.}$$

9. Число витков обмотки 2 определяется по формуле:

$$W_2 = U_2 m_2 / e,$$

где  $m_2$  – коэффициент, учитывающий падение напряжения на обмотке 2. По данным табл. 1.5.4 для выбранного магнитопровода падение напряжения  $\Delta U_2 \leq 3\%$ . Принимаем  $\Delta U_2 = 0,5\%$ . Для этого значения падения напряжения коэффициент  $m_2 = 1,005$ . Тогда число витков

$$W_2 = 4 \cdot 1,005 / 4,06 = 0,98 \text{ витка.}$$

Округляем полученное значение:  $W_2 = 1$  виток.

10. Число витков обмотки 3

$$W_3 = U_3 m_3 / e_1.$$

Для обмотки 3 принимаем  $\Delta U_3 = 0,4\%$  и  $m_3 = 1,004$ . Тогда число витков

$$W_3 = 10 \cdot 1,004 / 4,06 = 2,47 \text{ витка.}$$



Округляем полученное значение:  $W_3 = 2,5$  витка.

11. Определяем число витков в одном слое. Обмотки размещаются на изолирующем каркасе.

11.1. В первичной обмотке

$$W_{1\text{сл}} = L_{\text{н}} k_{y1} / d_{\text{из1}},$$

где  $L_{\text{н}}$  – размер обмотки (рис. 2.1.1) выбирается из табл. 2.1.1;  $k_{y1}$  – коэффициент укладки провода первичной обмотки. Принимаем  $k_{y1} = 0,95$  по табл. 2.1.1. Для выбранного магнитопровода  $L_{\text{н}} = 27$  мм. Тогда:

$$W_{1\text{сл}} = 27 \cdot 0,95 / 0,88 = 29,148 \text{ витка.}$$

Число витков округляем в меньшую сторону и принимаем  $W_{1\text{сл}} = 29$  витков.

11.2. В обмотке 2 в соответствии с п. 9 имеем:

$$W_{2\text{сл}} = 1 \text{ виток.}$$

11.3. В обмотке 3:

$$W_{3\text{сл}} = L_{\text{н}} k_{y3} / d_{\text{из3}},$$

где  $k_{y3}$  – коэффициент укладки провода обмотки 3. Принимаем  $k_{y3} = 0,93$ . Тогда число витков в одном слое обмотки 3:

$$W_{3\text{сл}} = 27 \cdot 0,93 / 0,56 = 44,84.$$

Принимаем  $W_{1\text{сл}} = 44$  (округляем в сторону меньших значений).

12. Рассчитываем число слоев в обмотках.

12.1. В первичной обмотке число слоев:

$$N_1 = W_1 k_{\text{пар}} / W_{1\text{сл}},$$

где  $k_{\text{пар}}$  – коэффициент, учитывающий количество параллельных проводов, используемых при изготовлении обмотки. Согласно и. 6.1, имеем  $k_{\text{пар}} = 2$ . Тогда:



$$N_1 = 32,5 \cdot 2/29 = 2,24.$$

Число слоев округляем в сторону больших значений и принимаем  $N_1 = 3$ .

12.2. В обмотке 2, согласно п. 9, число слоев:

$$N_2 = 1$$

12.3. В обмотке 3 число слоев:

$$N_3 = W_3/W_{3\text{сл}} = 2,5/44 = 0,057.$$

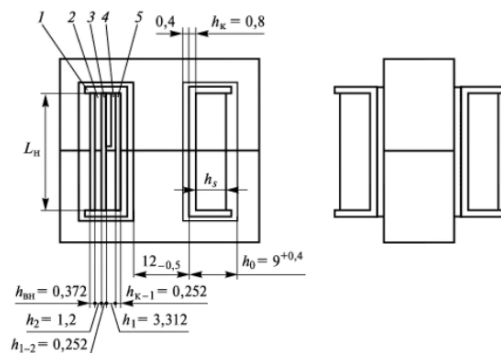
Обмотку 3 размещаем в незаполненном слое первичной обмотки на расстоянии 5 мм от крайнего витка первичной обмотки.

13. Определяем размеры обмоток по высоте намотки. Высота  $i$ -й обмотки (см. рис.2.1.2):

$$h_i = [N_i d_{\text{изи}i} + (N_i - 1)\delta_i]k_{pi}, \quad i = 1, 2, 3.$$

где  $k_p$  – коэффициент разбухания обмотки;  $\delta$  – толщина межслоевой изоляции (табл. 2.1.2).

Число слоев округляем в сторону больших значений и принимаем  $N_1 = 3$ .



**Рис. 2.1.2.** Эскиз трансформатора с Ш-образным магнитопроводом:

1- каркас; 2- обмотка 2; 3- межобмоточная изоляция; 4- обмотка 3;  
5- первичная обмотка (обмотка 1)



Таблица 2.1.2.

Значения коэффициентов  $k_y$  и  $k_p$  и толщины изоляции для расчета размеров обмоток

Диаметр провода по изоляции $d_{из}$ , мм	Коэффициент укладки провода $k_y$	Коэффициент разбухания обмотки $k_p$	Наименование межслоевой изоляции	Толщина межслоевой изоляции, мм
0,07...0,20	0,83	1,1	Бумага конденсаторная марки КОН2 ГОСТ 1908	0,022
0,21...0,28	0,86	1,1		0,022
0,30...0,38	0,92	1,1	Бумага изоляционная намоточная ЭН-50 ГОСТ 1931	0,050
0,41...0,64	0,93	1,1		0,050
0,66...0,99	0,95	1,15	Бумага кабельная марки К-120 ГОСТ 23436	0,12
Более 0,99	0,97	1,15		0,12

### 13.1. Обмотка 1:

$$h_1 = [N_1 d_{из1} + (N_1 - 1) \delta_1] k_{p1},$$

где  $\delta$  – толщина межслоевой изоляции (см. табл. 1.5.4),  $\delta_1 = 0,12$  мм – толщина слоя изолирующей бумаги марки К-120. Принимаем коэффициент разбухания  $k_{p1} = 1,15$ . Таким образом

$$h_1 = [3 \cdot 0,88 + (3 - 1) \cdot 0,12] \cdot 1,15 = 3,312 \text{ мм.}$$

### 13.2. Обмотка 2:

$$h_2 = [N_2 d_{из2} + (N_2 - 1) \delta_2] k_{p2},$$





где  $\delta_2 = 0,12$  мм.

Коэффициент разбухания принимаем  $k_{p2} = 1,2$  мм. Таким образом:

$$h_2 = [1 \cdot 1 + (1 - 1) \cdot 0,12] \cdot 1,2 = 1,2 \text{ мм.}$$

### 13.3. Обмотка 3:

$$h_3 = [N_3 d_{из3} + (N_3 - 1) \delta_3] k_{p3},$$

где  $\delta_3 = 0,12$  мм.

Коэффициент разбухания принимаем  $k_{p3} = 1,1$  мм. Тогда:

$$h_3 = [1 \cdot 0,56 + (1 - 1) \cdot 0,12] \cdot 1,1 = 0,616 \text{ мм.}$$

14. Определяем изолирующие зазоры в конструкции катушки. Для обеспечения конструктивного сопряжения выбираем значение воздушного зазора между магнитопроводом и каркасом по размеру  $a=0,4$  мм, а по размеру  $b = 0,5$  мм. Толщина каркаса  $h_k$ , определяется размерами магнитопровода и значением испытательного напряжения. Для приведенных выше условий принимаем  $h_k = 0,8$  мм.

Межслоевая и межобмоточная изоляция выбирается в соответствии с рекомендациями, приведенными в табл. 1.5.5. Между каркасом и первичной обмоткой размещаются два слоя изоляционной бумаги марки К-120 (толщина  $0,012 \times 2=0,24$  мм) и один слой пленки марки ПЭТ-Э толщиной  $0,012$  мм. Таким же образом выполнены изоляционный промежуток между 1 и 2 обмотками и внешняя изоляция. Кроме того, дополнительно снаружи помещается слой бумаги К-120 (толщина слоя  $0,12$  мм).

Таким образом, суммарная толщина изоляции  $h_{k-1}$  между каркасом и первичной обмоткой равна  $0,252$  мм. Такая же толщина изоляции  $h_{1-2} = 0,252$  мм между первичной и второй обмотками. Толщина внешней изоляции  $h_{вн} = 0,252 + 0,12 = 0,372$  мм.

15. Толщина катушки, определяемая размерами обмоток, каркаса и электроизоляционных зазоров, равна:

$$h_{\Sigma} = 0,4 + 0,8 + 0,24 + 0,012 + 3,312 + 0,24 + 0,012 + 1,2 + 0,24 + 0,012 + 0,12 = 6,588 \text{ мм.}$$



Полученное значение  $h_{\Sigma}$  меньше минимального размера окна магнитопровода  $h_0 = 9$  мм, что обеспечивает размещение катушки в окне. Вместе с тем оставшийся зазор около 2,4 мм позволяет в случае необходимости увеличить диаметр провода какой-либо обмотки.

16. Рассчитываем длину средних витков обмоток.

16.1. Средний виток обмотки 1:

$$\begin{aligned} L_{\text{ср1}} &= 2a + 2b + 2\pi(r_k + h_{k-1} + h_1/2) = \\ &= 2 \cdot 12,8 + 2 \cdot 16 + 2\pi(0,4 + 0,8 + 0,252 + 3,312/2) = 77,1 \text{ мм.} \end{aligned}$$

Значения  $a$  и  $b$  выбираются из табл. 1.20.

16.2. Средний виток обмотки 2:

$$\begin{aligned} L_{\text{ср2}} &= 2a + 2b + 2\pi(r_k + h_{k-1} + h_1 + h_{1-2} + h_2/2) = \\ &= 2 \cdot 12,8 + 2 \cdot 16 + 2\pi(1,2 + 0,252 + 3,312 + 0,252 + 1,2/2) \\ &= 92,87 \text{ мм.} \end{aligned}$$

16.3. Средний виток обмотки 3:

$$L_{\text{ср3}} \approx L_{\text{ср1}} = 77,1 \text{ мм.}$$

17. Определяем сопротивление обмоток постоянному току при температуре окружающей среды  $\theta_{\text{о.с}} = +20$  °С.

17.1. Сопротивление первичной обмотки:

$$R_1 = \rho L_{\text{ср1}} W_1 / q_1,$$

где  $\rho$  – удельное электрическое сопротивление медного провода, равное  $0,0175 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$ ;  $q_1$  – сечение провода первичной обмотки из п. 6.1 (два 2 провода по  $0,5 \text{ мм}^2$ );

$$R_1 = 0,0175 \cdot 77,1 \cdot 10^{-3} \cdot 32,5/1 = 0,077 \text{ Ом.}$$

17.2. Сопротивление обмотки 2:

$$R_2 = \rho L_{\text{ср2}} W_2 / q_2 = 0,0175 \cdot 92,87 \cdot 10^{-3} \cdot 1/25 = 6,49 \cdot 10^{-5} \text{ Ом.}$$



### 17.3. Сопротивление обмотки 3:

$$R_3 = \rho L_{\text{ср}3} W_3 / q_3 = 0,0175 \cdot 77,1 \cdot 10^{-3} \cdot 2,5 / 0,196 = 0,0171 \text{ Ом.}$$

18. Расчет сопротивления обмоток переменному току проводим по выражению  $R_i = k_i R_i; i=1; 2; 3$ , где  $k_i$  – коэффициент увеличения активного сопротивления в зависимости от частоты  $f$ , определяемый по графикам, приведенным на рис. 2.1.3.

#### 18.1. Сопротивление обмотки 1:

$$R_{-1} = k_{-1} R_1 = 1,18 \cdot 0,077 = 0,091 \text{ Ом,}$$

где  $k_{-1}$  определен по кривой  $b$  на рис. 1.5.9 для  $d = 0,8$  мм при частоте  $f = 50$  кГц.

#### 18.1. Сопротивление обмотки 2:

$$R_{-2} = k_{-2} R_2 = 1,18 \cdot 6,49 \cdot 10^{-5} = 7,66 \cdot 10^{-5} \text{ Ом,}$$

где  $k_{-2}$  определен по кривой  $b$  на рис. 1.5.9 для  $d = 1,0$  мм при частоте  $f = 50$  кГц.

#### 18.1. Сопротивление обмотки 3:

$$R_{-3} = k_{-3} R_3 = 1,05 \cdot 0,0171 = 0,018 \text{ Ом.}$$

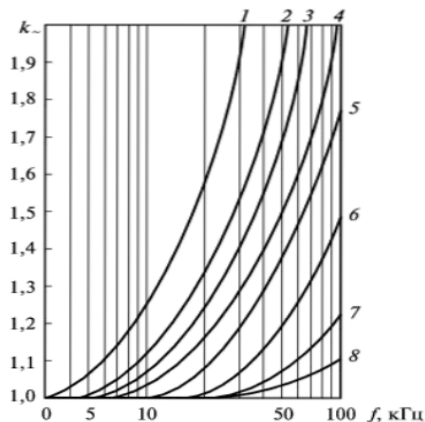
### 19. Рассчитываем массу меди обмоток.

#### 19.1. Масса меди обмотки 1:

$$M_1 = L_{\text{ср}1} W_1 q_1 \gamma,$$

где  $\gamma$  – удельная масса медного провода, равная  $8,9$  г/см<sup>3</sup>;

$$M_1 = 77,1 \cdot 10^{-1} \cdot (2 \cdot 32,5) \cdot 1 \cdot 10^{-2} \cdot 8,9 = 44,6 \text{ г.}$$



**Рис. 2.1.3.** Зависимость коэффициента увеличения активного сопротивления  $k$  от частоты  $f$  при различных диаметрах медных проводов  $d$ :

1 –  $d = 2,1 \dots 2,5$  мм; 2 –  $d = 1,81 \dots 2,02$  мм; 3 –  $d = 1,56 \dots 1,74$  мм;  
4 –  $d = 1,3 \dots 1,5$  мм;  
5 –  $d = 1,04 \dots 1,25$  мм; 6 –  $d = 0,8 \dots 1,0$  мм; 7 –  $d = 0,64 \dots 0,77$  мм; 8 –  
 $d = 0,06 \dots 0,62$  мм;

19.2 Масса меди обмотки 2:

$$M_2 = L_{\text{ср}2} W_2 q_2 \gamma = 92,87 \cdot 10^{-1} \cdot 1 \cdot 25 \cdot 10^{-2} \cdot 8,9 = 20,66 \text{ г.}$$

19.3 Масса меди обмотки 3:

$$M_3 = L_{\text{ср}3} W_3 q_3 \gamma = 77,1 \cdot 10^{-1} \cdot 1 \cdot 2,5 \cdot 0,196 \cdot 10^{-2} \cdot 8,9 = 0,336 \text{ г.}$$

Суммарная масса меди обмоток  $M = M_1 + M_2 + M_3 = 44,6 + 20,66 + 0,336 = 65,6$  г.

20. Определяем потери в меди обмоток по выражению:

$$P_{mi} = k_{\theta} I_i^2 R_{-i}; \quad i = 1; 2; 3,$$

где  $k_{\theta}$  – температурный коэффициент сопротивления, учитывающий температуру перегрева обмотки  $\theta$  относительно температуры окружающей среды  $t_{\text{окр}} = 65$  °С;  $k_{\theta} = 1 + \nu\theta$ . Для меди коэффициенте  $\nu = 0,004$  1/град. Ограничим допустимый перегрев об-



моток  $\theta_{\text{доп}}$  относительно температуры окружающей среды значением  $70^\circ\text{C}$ . Тогда температурный коэффициент  $k_\theta = 1 + 0,004 \cdot 70 = 1,28$ .

Потери в обмотках составят:

$$P_{M1} = k_\theta I_1^2 R_{-1} = 1,28 \cdot 2^2 \cdot 0,091 = 0,466 \text{ Вт};$$

$$P_{M2} = k_\theta I_2^2 R_{-2} = 1,28 \cdot 60^2 \cdot 7,66 \cdot 10^{-5} = 0,353 \text{ Вт};$$

$$P_{M3} = k_\theta I_3^2 R_{-3} = 1,28 \cdot 0,5^2 \cdot 0,018 = 0,006 \text{ Вт}.$$

Суммарные потери в меди обмоток:

$$P_M = P_{M1} + P_{M2} + P_{M3} = 0,466 + 0,353 + 0,006 = 0,825 \text{ Вт}.$$

21. Рассчитываем потери в феррите магнитопровода по выражению:

$$P_c = P_{\text{уд}} M_c,$$

где  $P_{\text{уд}}$  – удельные потери в магнитопроводе,  $P_{\text{уд}} = \rho_0 (f/f^*)^\alpha (B_m/B_m^*)^\beta$ , где  $f^* = 1 \text{ кГц}$  – базовое значение частоты;  $B_m^* = 1 \text{ Тл}$  – базовое значение индукции;  $\rho_0$ ,  $\alpha$  и  $\beta$  – коэффициенты, полученные из экспериментальных данных (табл. 2.1.3);  $M_c$  – масса магнитопровода, равная суммарной массе двух Ш-образных деталей:  $M_c = 0,046 \cdot 2 = 0,092 \text{ кг}$ .

Таблица 2.1.3.

Значения коэффициентов для расчета удельных потерь в магнитопроводах

Марка феррита	Коэффициент удельных потерь		
	$\rho_0$ , Вт/кг	$\alpha$	$\beta$
1500НМ3	23,2	1,2	2,2
2000НМ1	68,0	1,2	2,8
2000НМ3	44,6	1,3	2,7
2500НМС1	7,3	1,4	1,9
2500НМС2	11,5	1,2	1,7



Из табл. 1.5.6 находим для феррита марки 2000НМ1:  $\rho_0 = 68$  Вт/кг;  $\alpha = 1,2$ ;  $\beta = 2,8$ . Значение рабочей частоты  $f = 50$  кГц берем из исходных данных, значение индукции  $B_m = 0,115$  Тл – согласно п. 7. Тогда получим:

$$P_{уд} = 68(50/1)^{1,2}(0,115/1)^{2,8} = 17,427 \text{ Вт/кг}; P_c = 17,427 \cdot 0,092 = 1,603 \text{ Вт.}$$

22. Потери в трансформаторе:

$$P_{тр} = P_M + P_c = 0,825 + 1,603 = 2,43 \text{ Вт.}$$

23. Проверяем значение КПД на основании полученных расчетных значений мощностей:

$$\eta = P_{вых}/(P_{вых} + P_{тр}) = 245/(245 + 2,43) = 0,9902.$$

Таким образом, значение КПД, принятое в п. 2, практически совпадает с рассчитанным значением и изменять его не требуется.

24. Уточняем значение входного тока трансформатора. Активная составляющая тока холостого хода:

$$I_{0a} = P_c/U_1 = 1,603/132 = 0,0121 \text{ А.}$$

Реактивная составляющая тока холостого хода:

$$I_{0p} = HL_{ср.с}/W_1,$$

где  $H = B/\mu_0\mu_3$ ;  $B = 0,115$  Тл – берется из п.7;  $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$  Гн/м;  $\mu_3=1655$  – эквивалентная магнитная проницаемость (определяем из табл. 1.19 для магнитопровода Ш12х15;  $L_{ср.с}= 9,67$  см – длина средней линии магнитопровода Ш12х15 из табл. 1.20.

Вычисляем значения  $H$  и  $I_{0p}$ :

$$H = 0,115/4\pi 10^{-7} \cdot 1655 = 55,13 \text{ А/м} = 0,5513 \text{ А/см,}$$

$$I_{0p} = 0,5513 \cdot 9,67/32,5 = 0,164 \text{ А.}$$



Ток холостого хода трансформатора:

$$I_0 = \sqrt{(I_{0a})^2 + (I_{0p})^2} = \sqrt{(0,0121)^2 + (0,164)^2} \approx 0,164 \text{ А.}$$

Уточненное значение входного тока:

$$I_{1\text{ут}} = \sqrt{I_0^2 + I_1^2} = \sqrt{(0,164)^2 + (1,875)^2} = 1,882 \text{ А.}$$

Учитывая, что  $\cos\varphi$  в цепи первичной обмотки при нагруженном трансформаторе равен примерно 0,9, окончательно уточненное значение входного тока:

$$I_{1\text{ут.о}} = I_{1\text{ут}}/\cos\varphi = 1,882/0,9 = 2,1 \text{ А.}$$

25. Определяем падение напряжения на обмотках трансформатора.

Падение на обмотке 1:

$$\Delta U_1 = k_\theta I_{1\text{ут.о}} R_{-1} = 1,28 \cdot 2,1 \cdot 0,091 = 0,245 \text{ В.}$$

Падение на обмотке 2:

$$\Delta U_2 = k_\theta I_2 R_{-2} = 1,28 \cdot 60 \cdot 7,66 \cdot 10^{-5} = 0,0059 \text{ В.}$$

Падение на обмотке 3:

$$\Delta U_3 = k_\theta I_3 R_{-3} = 1,28 \cdot 0,5 \cdot 0,018 = 0,0115 \text{ В.}$$

В процентном выражении:

$$\Delta U_1 \% = \Delta U_1 / U_1 \cdot 100\% = 0,186 \%;$$

$$\Delta U_2 \% = \Delta U_2 / U_2 \cdot 100\% = 0,148 \%;$$

$$\Delta U_3 \% = \Delta U_3 / U_3 \cdot 100\% = 0,115 \%;$$



Проверяем принятые в пп. 9 и 10 значения падений напряжений. Для этого определяем приведенные падения напряжения  $\Delta U_{1-2}\%$  (на обмотках 1 и 2) и  $\Delta U_{1-3}\%$  (на обмотках 1 и 3):

$$\Delta U_{1-2}\% = \Delta U_1\% + \Delta U_2\% = 0,186 + 0,148 = 0,334\%;$$

$$\Delta U_{1-3}\% = \Delta U_1\% + \Delta U_3\% = 0,186 + 0,115 = 0,301\%;$$

Полученное значение  $\Delta U_{1-2}\%$  близко к значению 0,5 %, принятому в п. 9, а значение  $\Delta U_{1-3}\%$  близко к значению 0,4 %, принятому в п. 10. Таким образом, принятые значения падений напряжения и, следовательно, количество витков не требуют уточнения.

26. Определяем перегрев обмоток трансформатора по выражению:

$$\theta = P_{\text{тр}} \xi,$$

где  $\xi = 9,17$  °С/Вт температурный коэффициент мощности из табл. 1.20;  $\theta = 2,43 \cdot 9,17 = 22,3$  °С. Таким образом, перегрев обмоток значительно ниже предполагаемого значения 70 °С (см. п. 20).

Для уточнения значения КПД и падения напряжения следует повторить часть расчета, начиная с п. 20, учитывая  $k_{\theta} = 1 + 0,004 \cdot 22,3 \approx 1,09$ .

### Контрольные вопросы

1. Назовите основные компоненты трансформатора?
2. Для чего используется трансформатор?
3. От чего зависит выбор типа магнитопровода?
4. Чем определяется тип и диаметр провода обмоток?