



2.1.3. ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА (СЕМИНАР) № 3. МНОГООБМОТОЧНОГО ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ТРАНСФОРМАТОРА ДЛЯ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ОДНОПОЛЯРНЫХ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ ИМПУЛЬСОВ НАПРЯЖЕНИЯ

Цель работы: изучение принципов расчета многообмоточного высокочастотного трансформатора для преобразования однополярных прямоугольных импульсов напряжения, 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 следования импульсов $f = 50000$ Гц. Отношение длительности импульса к периоду $\frac{t_u}{T} = K_{\text{И}} = 0,48$. Амплитуда входных импульсов $U_{1A} = 24$ В. Амплитуды выходных импульсов: $U_{2A} = 305$ В; $U_{3A} = 305$ В; $U_{4A} = 282$ В; $U_{5A} = 85$ В. Токи нагрузки вторичных обмоток: $J_{2A} = J_{3A} = J_{4A} = J_{5A} = 0,125$ А. Индуктивность первичной обмотки $L_1 = (210 \dots 310)$ мкГн. Диапазон изменения температуры окружающей среды от минус 50 до плюс 65 °С. Перегрев обмоток $\theta \leq 50$ °С. Испытательные напряжения обмоток относительно корпуса: $U_{1\text{исп}} = 500$ В; $U_{2\text{исп}} = 1500$ В; $U_{3\text{исп}} = 2300$ В; $U_{4\text{исп}} = 3000$ В; $U_{5\text{исп}} = 500$ В.

Расчет трансформатора. Электрическая схема рассчитываемого трансформатора приведена на рис. 2.3.1.

1. Рассчитаем выходную мощность трансформатора:

$$P_{\text{вых}} = K_{\text{И}}(U_{2A}J_{2A} + U_{3A}J_{3A} + U_{4A}J_{4A} + U_{5A}J_{5A}) =$$



$$\begin{aligned} &= 0,48(305 \cdot 0,125 + 305 \cdot 0,125 + 282 \cdot 0,125 + 85 \cdot 0,125) \\ &= 58,52 \text{ ВА.} \end{aligned}$$

2. Принимаем КПД трансформатора $\eta = 0,96$. Тогда входная мощность трансформатора для активной нагрузки будет равна:

$$P_1 = \frac{P_{\text{вых}}}{\eta} = \frac{58,62}{0,96} = 61,06 \text{ ВА.}$$

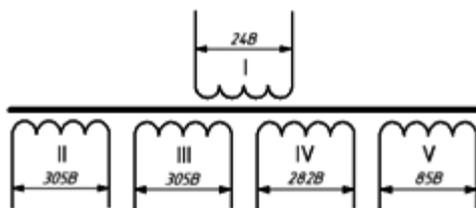


Рис. 2.3.1. Электрическая схема многообмоточного высокочастотного трансформатора для преобразования однополярных прямоугольных импульсов напряжения

3. Сила тока во входной обмотке вычисляется по формуле:

$$J_{1A} = \frac{P_1}{K_{II} \cdot U_{1A}} = \frac{61,06}{0,48 \cdot 24} = 5,3 \text{ А.}$$

4. Ток намагничивания магнитопровода находим из следующего соотношения:

$$J_{\mu A} = \frac{U_{1A} \cdot K_{II}}{f \cdot L_{1min}} = \frac{24 \cdot 0,48}{50000 \cdot 210 \cdot 10^{-6}} = 1,097 \text{ А.}$$

5. Эффективные значения токов трансформатора определяются по следующим зависимостям.

5.1. Ток намагничивания:

$$J_{\mu} = J_{\mu A} \sqrt{\frac{K_{II}}{3}} = 1,097 \sqrt{\frac{0,48}{3}} = 0,4388 \text{ А.}$$



5.2. Ток первичной обмотки:

$$J_1 = J_{1A}\sqrt{K_{И}} + J_{\mu} = 5,3\sqrt{0,48} + 0,4388 = 4,11 \text{ А.}$$

5.3. Ток вторичных обмоток:

$$J_2 = J_3 = J_4 = J_5 = J_{iA}\sqrt{K_{И}} = 0,125\sqrt{0,48} = 0,0866 \text{ А, } i = 2,3,4,5.$$

6. Из таблицы 2.3.1 выбираем типоразмер и марку магнитопровода, для которого $P_{\text{вых}} \leq P_1$, причем P_1 наименьшее из представленных в таблице. Указанным требованиям удовлетворяет магнитопровод К32х20х10 ГМ54ДС-700.

Таблица 2.3.1.

Магнитопроводы ГМ54ДС на базе магнитомягкого нанокристаллического сплава для преобразования однополярных импульсов

Типоразмер и марка магнитопровода	$D_{\text{н}}^*$	$d_{\text{в}}^*$	h^*	A_e	l_c	P_{Γ}	K_{Π}
К18х12х10 ГМ54ДС-500	1 9	1 0	1 1,4	0, 3	4, 71	1 5	1, 15
К22х16х10 ГМ54ДС-500	2 3	1 4	1 1,4	0, 3	5, 97	3 0	1, 15
К28х16х10 ГМ54ДС-500	2 9	1 4	1 1,4	0, 6	6, 92	4 5	1, 15
К32х20х10 ГМ54ДС-700	3 3	1 8	1 1,4	0, 6	8, 17	6 5	1, 0
К36х16х15 ГМ54ДС-500	3 7	1 4	1 6,4	1, 5	8, 17	8 5	1, 15
К40х25х10 ГМ54ДС-700	4 1	2 3	1 1,4	0, 75	1 0,2	1 00	1, 0

Примечание:

$D_{\text{н}}^*$ – наружный диаметр магнитопровода с учетом изоляции изготовителя, мм;

$d_{\text{в}}^*$ – внутренний диаметр магнитопровода с учетом изоляции изготовителя, мм;



- h^* – высота магнитопровода с учетом изоляции изготовителя, мм;
 A_e – эквивалентное сечение магнитопровода, см²;
 l_c – длина магнитного потока в магнитопроводе, см;
 P_r – габаритная мощность трансформатора на частоте $f = 50$ кГц при перегреве $\theta \leq 50$ °С и испытательном напряжении обмотки $U_{i \text{ исп}} \leq 3000$ В, В·А;
 $K_{\text{п}}$ – коэффициент потерь.
7. Для обмотки выбираем теплостойкий провод марки ПЭТВ-2.
8. Площадь q поперечного сечения провода обмотки определяется допустимой плотностью тока j :

$$q = \frac{J}{j}.$$

Для выбранного магнитопровода определяем допустимую плотность тока $j = 8,8$ А/мм². Поскольку из конструктивных соображений обмотка 1 укладывается последней, т. е. имеет наибольшую длину витка, плотность тока в ней выбираем ниже (6,5 А/мм²). Тогда:

$$q_1 = \frac{4,11}{6,5} = 0,6323 \text{ мм}^2; \quad q_2 = q_3 = q_4 = q_5 = \frac{0,0866}{8,8} = 0,0098 \text{ мм}^2.$$

9. По полученным значениям q_i из табл. 1.5.12 находим ближайшие к ним значения сечений проводов, а также их диаметры по меди d_i и по изоляции $d_{\text{из}i}$:

$$q_1 = 0,63617 \text{ мм}^2; \quad d_1 = 0,9 \text{ мм}; \quad d_{\text{из}1} = 0,99 \text{ мм};$$

$$q_2 = q_3 = q_4 = q_5 = 0,00985 \text{ мм}^2;$$

$$d_2 = d_3 = d_4 = d_5 = 0,112 \text{ мм};$$

$$d_{\text{из}2} = d_{\text{из}3} = d_{\text{из}4} = d_{\text{из}5} = 0,14 \text{ мм}.$$



10. Число витков первичной обмотки вычисляется по формуле:

$$W_1 = \frac{U_{1A} \cdot K_{И}}{f \cdot \Delta B \cdot Ae'}$$

где f – частота следования импульсов в Гц; ΔB – изменение магнитной индукции при прохождении однополярного импульса в Тл; Ae – эффективная площадь сечения магнитопровода в м². Тогда:

$$W_1 = \frac{24 \cdot 0,48}{50000 \cdot 0,19 \cdot (0,6 \cdot 10^{-4})} = 20,2 \approx 20 \text{ витков.}$$

11. Индуктивность обмотки 1 (индуктивность намагничивания) находим из следующего соотношения:

$$L_1 = \frac{\mu_0 \cdot W_1^2 \cdot Ae \cdot \mu}{l_e},$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная; $\mu = 700$ – магнитная проницаемость магнитопровода; $l_e = 8,17 \cdot 10^{-2}$ м – эффективная длина пути магнитной линии; W_1 – число витков обмотки 1. Следовательно:

$$L_1 = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 20^2 \cdot (0,6 \cdot 10^{-4}) \cdot 700}{8,17 \cdot 10^{-2}} = 258,3 \cdot 10^{-6} \text{ Гн.}$$

Как можно видеть из неравенства $210 < 258,3 < 310$, значение индуктивности обмотки 1 удовлетворяет заданным требованиям.

12. Определим по следующей зависимости число вольт на виток для нашего трансформатора:

$$e = \frac{U_{1A}}{W_1} = \frac{24}{20} = 1,2 \text{ вольт/виток.}$$

13. Число витков во вторичных обмотках вычисляется по формуле:

$$W_i = \frac{U_{iA} \cdot m_i}{e},$$



где m_i – коэффициент, учитывающий падение напряжения в обмотке.

По предварительным данным $m_2 \leq 1,03$; $m_3 \leq 1,03$; $m_4 \leq 1,03$; $m_5 \leq 1,03$.

Тогда:

$$W_2 = W_3 = \frac{305 \cdot 1,03}{1,2} \approx 262 \text{ витка};$$

$$W_3 = \frac{282 \cdot 1,03}{1,2} \approx 242 \text{ витка};$$

$$W_3 = \frac{85 \cdot 1,03}{1,2} \approx 73 \text{ витка}.$$

14. Намотаем на магнитопровод демпфирующую изоляцию: 1 слой БДХ толщиной 0,02 мм в полуперекрытии по наружному диаметру. Тогда толщина изоляции $\Delta_{\text{из-0}} = 0,02 \cdot 2 = 0,04$ мм. Найдем наружный диаметр магнитопровода с учетом демпфирующей изоляции:

$$D_{\text{ОН}} = D_{\text{Н}} + 2\Delta_{\text{из-0}} = 33 + 2 \cdot 0,04 = 33,08 \text{ мм};$$

Внутренний диаметр магнитопровода с учетом демпфирующей изоляции:

$$d_{\text{ОВ}} = d_{\text{В}} - 2\Delta_{\text{из-0}} \frac{D_{\text{Н}}}{d_{\text{В}}} = 18 - 2 \cdot 0,04 \cdot \frac{33}{18} = 17,85 \text{ мм}.$$

15. Порядок укладки обмоток.

15.1. Из конструктивных соображений обмотки наматываем в следующей последовательности:

2 3 4 5 1. ~ ~ ~ ~ ~



15.2. Укладка обмотки 2.

Длина окружности по внутреннему диаметру магнитопровода с учетом изоляции равна:

$$l_2 = \pi \cdot d_{ов} = 3,14 \cdot 17,85 = 56 \text{ мм.}$$

Найдем длину окружности, необходимой для размещения обмотки 2 в одном слое, по формуле:

$$l_{2НАМ} = W_2 \cdot d_{из2} \cdot K_{y2},$$

где K_{y2} – коэффициент укладки провода обмотки 2.

Согласно табл. 2.3.2 для $d_{из2} = 0,14$ мм, коэффициент $K_{y2} = 1,2$. Тогда $l_{2НАМ} = 262 \cdot 0,14 \cdot 1,2 = 44$ мм.

Таблица 2.3.2.

Значения конструктивных коэффициентов при размещении обмоток на тороидальном магнитопроводе

$d_{из}$, мм	менее 0,12	0,12...0,3	0,31...0,8	0,81...1,5 6
K_y	1,25	1,2	1,15	1,1
K_B	1,1	1,15	1,2	1,25
K_p	1,1	1,15	1,2	1,25

Поскольку $l_2 > l_{2НАМ}$, обмотка 2 размещается в одном слое, т.е. $N_{2Н} = N_{2В} = 1$,

где $N_{2Н}$ и $N_{2В}$ – число слоев обмотки 2 по наружному и внутреннему диаметрам соответственно.

Наружный $D_{2Н}$ и внутренний $d_{2В}$ диаметры трансформатора после укладки обмотки 2 находим из следующих соотношений:

$$\begin{aligned} D_{2Н} &= D_{ОН} + 2N_{2Н} \cdot d_{из2} \cdot K_p = 33,08 + 2 \cdot 1 \cdot 0,14 \cdot 1,15 \\ &= 33,40 \text{ мм,} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} d_{2В} &= d_{ОВ} - 2N_{2В} \cdot d_{из2} \cdot K_p = 17,85 - 2 \cdot 1 \cdot 0,14 \cdot 1,15 \\ &= 17,53 \text{ мм.} \end{aligned}$$



15.3. Укладка изоляции на обмотку 2.

На обмотку 2 укладываем 4 слоя изоляции БДХ в полунахлест по наружному диаметру (из расчета 10 000 В испытательного напряжения на 1 мм толщины изоляции). Тогда толщина изоляции $\Delta_{\text{из-2}} = 0,02 \cdot 4 \cdot 2 = 0,16$ мм.

Найдем наружный D'_{2H} внутренний d'_{2B} диаметры трансформатора после укладки изоляции обмотки 2:

$$D'_{2H} = D_{2H} + 2\Delta_{\text{из-2}} = 33,40 + 2 \cdot 0,16 = 33,72 \text{ мм};$$

$$d'_{2B} = d_{2B} - 2\Delta_{\text{из-2}} \frac{D_{2H}}{d_{2B}} = 17,53 - 2 \cdot 0,16 \cdot \frac{33,40}{17,53} = 16,92 \text{ мм}.$$

15.4. Укладка обмотки 3.

Длина окружности по внутреннему диаметру трансформатора после укладки изоляции обмотки 2 равна:

$$l_3 = \pi \cdot d'_{2B} = 3,14 \cdot 16,92 = 53,13 \text{ мм}.$$

Найдем длину окружности, необходимой для размещения обмотки 3 в одном слое, по формуле:

$$l_{\text{ЗНАМ}} = W_3 \cdot d_{\text{изз}} \cdot K_{y3} = 262 \cdot 0,14 \cdot 1,2 = 44,00 \text{ мм}.$$

Поскольку $l_3 > l_{\text{ЗНАМ}}$, обмотка 3 размещается в одном слое и $N_{3H} = N_{3B} = 1$.

Наружный D_{3H} и внутренний d_{3B} диаметры трансформатора после укладки обмотки 3 находим из следующих соотношений:

$$D_{3H} = D'_{2H} + 2N_{3H} \cdot d_{\text{изз}} \cdot K_p = 33,72 + 2 \cdot 1 \cdot 0,14 \cdot 1,15 = 34,04 \text{ мм};$$

$$d_{3B} = d'_{2B} - 2N_{3B} \cdot d_{\text{изз}} \cdot K_p = 16,92 - 2 \cdot 1 \cdot 0,14 \cdot 1,15 = 16,60 \text{ мм}.$$

15.5. Укладка изоляции на обмотку 3.

На обмотку 3 укладываем 6 слоев изоляции БДХ в полунахлест по наружному диаметру. Тогда толщина изоляции $\Delta_{\text{из-3}} = 0,02 \cdot 6 \cdot 2 = 0,24$ мм.



Найдем наружный D'_{3H} и внутренний d'_{3B} диаметры трансформатора после укладки изоляции обмотки 3:

$$D'_{3H} = D_{3H} + 2\Delta_{ИЗ-3} = 34,04 + 2 \cdot 0,24 = 34,52 \text{ мм};$$

$$d'_{3B} = d_{3B} - 2\Delta_{ИЗ-3} \frac{D_{3H}}{d_{3B}} = 16,60 - 2 \cdot 0,24 \cdot \frac{34,04}{16,60} = 15,61 \text{ мм}.$$

15.6. Укладка обмотки 4.

Длина окружности по внутреннему диаметру трансформатора после укладки изоляции обмотки 3 равна:

$$l_4 = \pi \cdot d'_{3B} = 3,14 \cdot 15,61 = 49,01 \text{ мм}.$$

Найдем длину окружности, необходимой для размещения обмотки 4 в одном слое, по формуле:

$$l_{4НАМ} = W_4 \cdot d_{ИЗ4} \cdot K_{y4} = 242 \cdot 0,14 \cdot 1,2 = 40,66 \text{ мм}.$$

Поскольку $l_4 > l_{4НАМ}$, обмотка 4 размещается в одном слое и $N_{4H} = N_{4B} = 1$.

Наружный D_{4H} и внутренний d_{4B} диаметры трансформатора после укладки обмотки 4 находим из следующих соотношений:

$$D_{4H} = D'_{3H} + 2N_{4H} \cdot d_{ИЗ4} \cdot K_p = 34,52 + 2 \cdot 1 \cdot 0,14 \cdot 1,15 = 34,84 \text{ мм};$$

$$d_{4B} = d'_{3B} - 2N_{4B} \cdot d_{ИЗ4} \cdot K_p = 15,61 - 2 \cdot 1 \cdot 0,14 \cdot 1,15 = 15,29 \text{ мм}.$$

15.7. Укладка изоляции на обмотку 4.

На обмотку 4 укладываем 8 слоёв изоляции БДХ в полунахлест по наружному. Тогда толщина изоляции $\Delta_{ИЗ-4} = 0,02 \cdot 8 \cdot 2 = 0,32 \text{ мм}$.

Найдем наружный D'_{4H} и внутренний d'_{4H} диаметры трансформатора после укладки изоляции обмотки 4:

$$D'_{4H} = D_{4H} + 2\Delta_{ИЗ-4} = 34,84 + 2 \cdot 0,32 = 35,48 \text{ мм};$$



$$d'_{4B} = d_{4B} - 2\Delta_{ИЗ-4} \frac{D_{4H}}{d_{4B}} = 15,29 - 2 \cdot 0,32 \cdot \frac{34,84}{15,29} = 13,83 \text{ мм.}$$

15.8. Укладка обмотки 5.

Длина окружности по внутреннему диаметру трансформатора после укладки изоляции обмотки 4 равна:

$$l_5 = \pi \cdot d'_{4B} = 3,14 \cdot 13,83 = 43,43 \text{ мм.}$$

Найдем длину окружности, необходимой для размещения обмотки 5 в одном слое, по формуле:

$$l_{5НАМ} = W_5 \cdot d_{ИЗ5} \cdot K_{y5} = 73 \cdot 0,14 \cdot 1,2 = 12,26 \text{ мм.}$$

Поскольку $l_5 > l_{5НАМ}$, обмотка 5 размещается в одном слое и $N_{5H} = N_{5B} = 1$.

Наружный D_{5H} и внутренний d_{5B} диаметры трансформатора после укладки обмотки 5 находим из следующих соотношений:

$$D_{5H} = D'_{4H} + 2N_{5H} \cdot d_{ИЗ5} \cdot K_p = 35,48 + 2 \cdot 1 \cdot 0,14 \cdot 1,15 = 35,80 \text{ мм;}$$

$$d_{5B} = d'_{4B} - 2N_{5B} \cdot d_{ИЗ5} \cdot K_p = 13,83 - 2 \cdot 1 \cdot 0,14 \cdot 1,15 = 13,51 \text{ мм.}$$

15.9. Укладка изоляции на обмотку 5.

На обмотку 5 укладываем 3 слоя изоляции БДХ в полунахлест по наружному диаметру. Тогда толщина изоляции $\Delta_{ИЗ-5} = 0,02 \cdot 3 \cdot 2 = 0,12 \text{ мм.}$

Найдем наружный D'_{5H} и внутренний d'_{5B} диаметры трансформатора после укладки изоляции обмотки 5:

$$D'_{5H} = D_{5H} + 2\Delta_{ИЗ-5} = 35,80 + 2 \cdot 0,12 = 36,04 \text{ мм;}$$

$$d'_{5B} = d_{5B} - 2\Delta_{ИЗ-5} \frac{D_{5H}}{d_{5B}} = 13,51 - 2 \cdot 0,12 \cdot \frac{35,80}{13,51} = 12,78 \text{ мм.}$$



15.10. Укладка обмотки 1.

Длина окружности по внутреннему диаметру трансформатора после укладки изоляции обмотки 5 равна:

$$l_1 = \pi \cdot d'_{5B} = 3,14 \cdot 12,78 = 40,41 \text{ мм.}$$

Найдем длину окружности, необходимой для размещения обмотки 1 в одном слое, по формуле:

$$l_{1\text{НАМ}} = W_1 \cdot d_{\text{ИЗ1}} \cdot K_{y1} = 20 \cdot 0,99 \cdot 1,1 = 21,78 \text{ мм.}$$

Поскольку $l_1 > l_{1\text{НАМ}}$, обмотка 1 размещается в одном слое и $N_{1H} = N_{1B} = 1$.

Наружный D_{1H} и внутренний d_{1B} диаметры трансформатора после укладки обмотки 1 находим из следующих соотношений:

$$D_{1H} = D'_{5H} + 2N_{1H} \cdot d_{\text{ИЗ1}} \cdot K_p = 36,04 + 2 \cdot 1 \cdot 0,99 \cdot 1,25 = 38,51 \text{ мм;}$$

$$d_{1B} = d'_{5B} - 2N_{1B} \cdot d_{\text{ИЗ1}} \cdot K_p = 12,87 - 2 \cdot 1 \cdot 0,99 \cdot 1,25 = 10,39 \text{ мм.}$$

15.11. Укладка изоляции на обмотку 1 (внешней изоляции).

На обмотку 1 укладываем 3 слоя изоляции БДХ в полунахлест по наружному диаметру. Тогда толщина изоляции $\Delta_{\text{ИЗ-1}} = 0,02 \cdot 3 \cdot 2 = 0,12 \text{ мм.}$

Найдем наружный D'_{1H} и внутренний d'_{1B} диаметры трансформатора после укладки изоляции обмотки 1:

$$D'_{1H} = D_{1H} + 2\Delta_{\text{ИЗ-1}} = 38,51 + 2 \cdot 0,12 = 38,75 \text{ мм;}$$

$$d'_{1B} = d_{1B} - 2\Delta_{\text{ИЗ-1}} \frac{D_{1H}}{d_{1B}} = 10,39 - 2 \cdot 0,12 \cdot \frac{38,51}{10,39} = 9,50 \text{ мм.}$$



16. Окончательные габаритные размеры трансформатора с учетом коэффициента выпучивания K_B .

16.1. Наружный диаметр будет равен:

$$D_{ТН} = D'_{1Н} \cdot K_B - D_H(K_B - 1) = 38,75 \cdot 1,15 - 33 \cdot (1,15 - 1) \\ = 44,56 - 4,95 = 39,61 \text{ мм.}$$

16.2. Внутренний диаметр вычисляется по формуле:

$$d_{ТВ} = d'_{1В} \cdot K_B - d_B(K_B - 1) = 9,50 \cdot 1,15 - 18 \cdot (1,15 - 1) \\ = 10,93 - 2,07 = 8,23 \text{ мм;}$$

16.3. Высоту трансформатора находим из следующего соотношения:

$$H_T = h + d_B - d_{ТВ} = 11,4 + 18 - 8,23 = 21,17 \text{ мм.}$$

17. Средние длины витков определяются по следующей формуле:

$$L_{i\text{cp}} = 2 \cdot (a + b) + \frac{\pi}{2} \left[\frac{D'_{(i-1)H} - d'_{(i-1)B} + D_{iH} - d_{iB}}{2} - (D_H - d_B) \right]$$

17.1. Средняя длина витка обмотки 2:

$$L_{2\text{cp}} = 2 \cdot (7,5 + 11,4) \\ + \frac{\pi}{2} \left[\frac{33,08 - 17,85 + 33,40 - 17,53}{2} - (33 - 18) \right] \\ = 38,66 \approx 38,7 \text{ мм}$$

17.2. Средняя длина витка обмотки 3:

$$L_{3\text{cp}} = 2 \cdot (7,5 + 11,4) \\ + \frac{\pi}{2} \left[\frac{33,72 - 16,92 + 33,04 - 16,6}{2} - (33 - 18) \right] \\ = 41,13 \approx 41,1 \text{ мм}$$



17.3. Средняя длина витка обмотки 4:

$$\begin{aligned}L_{4\text{cp}} &= 2 \cdot (7,5 + 11,4) \\ &+ \frac{\pi}{2} \left[\frac{34,52 - 15,61 + 34,84 - 15,29}{2} - (33 - 18) \right] \\ &= 44,44 \approx 44,4 \text{ мм}\end{aligned}$$

17.4. Средняя длина витка обмотки 5:

$$\begin{aligned}L_{5\text{cp}} &= 2 \cdot (7,5 + 11,4) \\ &+ \frac{\pi}{2} \left[\frac{35,48 - 13,83 + 35,80 - 13,51}{2} - (33 - 18) \right] \\ &= 48,74 \approx 48,7 \text{ мм}\end{aligned}$$

17.5. Средняя длина витка обмотки 1:

$$\begin{aligned}L_{1\text{cp}} &= 2 \cdot (7,5 + 11,4) \\ &+ \frac{\pi}{2} \left[\frac{36,04 - 12,78 + 38,51 - 10,39}{2} - (33 - 18) \right] \\ &= 54,59 \approx 54,6 \text{ мм}\end{aligned}$$

18. Найдем активные сопротивления обмоток постоянному току:

$$R_i = L_{i\text{cp}} \cdot W_i \cdot r_i \cdot 10^{-6},$$

где r_i – активное сопротивление 1000 м провода i обмотки.

$$R_2 = 38,7 \cdot 262 \cdot 1777 \cdot 10^{-6} = 18,02 \text{ Ом.}$$

$$R_3 = 41,1 \cdot 262 \cdot 1777 \cdot 10^{-6} = 19,14 \text{ Ом.}$$

$$R_4 = 44,4 \cdot 242 \cdot 1777 \cdot 10^{-6} = 19,09 \text{ Ом.}$$

$$R_5 = 48,7 \cdot 73 \cdot 1777 \cdot 10^{-6} = 6,32 \text{ Ом.}$$

$$R_1 = 54,6 \cdot 20 \cdot 27,5 \cdot 10^{-6} = 0,03 \text{ Ом.}$$

19. Активные сопротивления обмоток переменному току R_{-i} ; определяются следующей зависимостью: $R_{-i} = k_{-i}(f, d)$, где $k_{-i}(f, d)$ – коэффициент увеличения активного сопротивления, за-



висящий от частоты и диаметра провода и определяемый по графикам, приведенным на рис. 2.3.2:

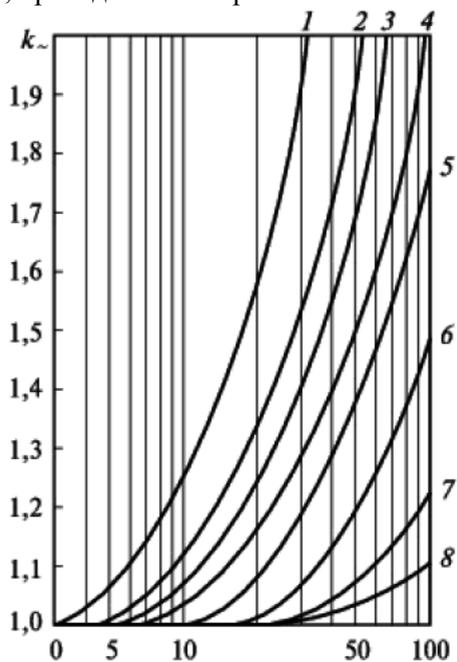


Рис. 2.3.2. Графики коэффициента увеличения активного сопротивления, зависящего от частоты и диаметра провода

$$R_{-2} = 1,03 \cdot 18,02 = 18,558 \text{ Ом.}$$

$$R_{-3} = 1,03 \cdot 19,14 = 19,709 \text{ Ом.}$$

$$R_{-4} = 1,03 \cdot 19,09 = 19,666 \text{ Ом.}$$

$$R_{-5} = 1,03 \cdot 6,32 = 6,507 \text{ Ом.}$$

$$R_{-1} = 1,20 \cdot 0,03 = 0,036 \text{ Ом.}$$

20. Находим массу меди в обмотках:

$$M_{Cu} = \sum_{i=1}^5 m_{iCu} = \sum_{i=1}^5 (L_{i\text{ср}} \cdot W_i \cdot q_i \cdot \gamma),$$

где γ – плотность меди ($\gamma = 8,9 \cdot 10^{-3} \text{ г/мм}^3$).

$$m_{2Cu} = 38,7 \cdot 262 \cdot 0,00985 \cdot 8,9 \cdot 10^{-3} = 0,89 \text{ г}$$



$$\begin{aligned}m_{3Cu} &= 41,1 \cdot 262 \cdot 0,00985 \cdot 8,9 \cdot 10^{-3} = 0,94 \text{ г} \\m_{4Cu} &= 44,4 \cdot 242 \cdot 0,00985 \cdot 8,9 \cdot 10^{-3} = 0,94 \text{ г} \\m_{5Cu} &= 48,7 \cdot 73 \cdot 0,00985 \cdot 8,9 \cdot 10^{-3} = 0,31 \text{ г} \\m_{1Cu} &= 54,6 \cdot 20 \cdot 0,63617 \cdot 8,9 \cdot 10^{-3} = 6,18 \text{ г} \\M_{Cu} &= 9,27 \cdot 10^{-3} \text{ кг.}\end{aligned}$$

21. Определяем в процентном выражении падения напряжений в обмотках, обусловленные активным сопротивлением проводов:

$$\Delta U_i = \frac{k_t \cdot J_{iA} \cdot R_{-i}}{U_i} \cdot 100\%,$$

где k_t – коэффициент увеличения активного сопротивления, учитывающий температуру перегрева обмотки относительно окружающей среды:

$$\Delta U_2 = \frac{1,16 \cdot 0,125 \cdot 18,558}{305} \cdot 100\% = 0,88\%$$

$$\Delta U_3 = \frac{1,16 \cdot 0,125 \cdot 19,709}{305} \cdot 100\% = 0,94\%$$

$$\Delta U_4 = \frac{1,16 \cdot 0,125 \cdot 19,666}{282} \cdot 100\% = 1,01\%$$

$$\Delta U_5 = \frac{1,16 \cdot 0,125 \cdot 6,507}{85} \cdot 100\% = 1,11\%$$

$$\Delta U_1 = \frac{1,16 \cdot 5,3 \cdot 0,036}{24} \cdot 100\% = 0,92\%$$

22. Находим суммарные падения по выходному напряжению:

$$\Delta U_{1-2} = \Delta U_1 + \Delta U_2 = 0,92 + 0,88 = 1,80\%$$

$$\Delta U_{1-3} = \Delta U_1 + \Delta U_3 = 0,92 + 0,94 = 1,86\%$$

$$\Delta U_{1-4} = \Delta U_1 + \Delta U_4 = 0,92 + 1,01 = 1,93\%$$

$$\Delta U_{1-5} = \Delta U_1 + \Delta U_5 = 0,92 + 1,11 = 2,03\%$$



23. Сравнение полученных значений суммарного падения по выходному напряжению с принятыми в п. 13 ($m_2 \leq 1,03$; $m_3 \leq 1,03$; $m_4 \leq 1,03$; $m_5 \leq 1,03$) показывает, что выходные напряжения будут на 1% выше номинальных. Такое превышение вполне приемлемо для трансформаторов, работающих в составе импульсных источников электропитания, т.е. корректировать количество витков в обмотках не требуется.

24. Определяем теперь тепловые потери в меди P_M :

$$\Delta P_2 = k_t \cdot J_2^2 \cdot R_{-2} = 1,16 \cdot 0,0866^2 \cdot 18,558 = 0,1614 \text{ Вт}$$

$$\Delta P_3 = k_t \cdot J_3^2 \cdot R_{-3} = 1,16 \cdot 0,0866^2 \cdot 19,709 = 0,1715 \text{ Вт}$$

$$\Delta P_4 = k_t \cdot J_4^2 \cdot R_{-4} = 1,16 \cdot 0,0866^2 \cdot 19,666 = 0,1711 \text{ Вт}$$

$$\Delta P_5 = k_t \cdot J_5^2 \cdot R_{-5} = 1,16 \cdot 0,0866^2 \cdot 6,507 = 0,0566 \text{ Вт}$$

$$\Delta P_1 = k_t \cdot J_1^2 \cdot R_{-1} = 1,16 \cdot 4,11^2 \cdot 0,036 = 0,7061 \text{ Вт}$$

$$P_M = \sum_{i=1}^n \Delta P_i = 0,1614 + 0,1715 + 0,0566 + 0,7061 = 1,2667 \text{ Вт.}$$

25. Найдем также тепловые потери в магнитопроводе (в сердечнике) P_C по следующей формуле:

$$P_C = K_T \cdot P_{уд} \cdot V,$$

где $K_T = 2$ – технологический коэффициент, $V = 4,9 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$ – объём магнитопровода, $P_{уд}$ – удельные потери в магнитопроводе (Вт/м^3). Удельные потери определяются по следующей зависимости $P_{уд} = K_p \cdot f^{1,48} \cdot B_m^{1,85}$, где $B_m = \frac{\Delta B}{2}$ (т.к. импульсы однополярные). $P_{уд} = 1 \cdot (50000)^{1,48} \cdot \left(\frac{0,19}{2}\right)^{1,85} = 115681,6 \text{ Вт/м}^3$.

Тогда:

$$P_C = 2 \cdot 115681,6 \cdot 4,9 \cdot 10^{-6} = 1,1337 \text{ Вт.}$$

26. Определим КПД трансформатора.



Суммарные потери в трансформаторе $P_{\text{ТР}} = P_{\text{М}} + P_{\text{С}} = 1,2667 + 1,1337 = 2,4004 \approx 2,4$ Вт. Тогда:

$$\eta = \frac{P_{\text{ВЫХ}}}{P_{\text{ВЫХ}} + P_{\text{ТР}}} = \frac{58,62}{58,62 + 2,4} = 0,96066.$$

Таким образом, значение КПД, принятое в п. 2, достаточно точно совпало с рассчитанным значением, и корректировка не требуется.

27. Рассчитаем перегрев обмоток по формуле:

$$\theta = \frac{P_{\text{ТР}}}{\alpha \cdot S_{\text{охл}}},$$

где $\alpha = 1,2 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$ – коэффициент теплоотдачи, $S_{\text{охл}} = \pi \cdot D_{\text{ТН}} \cdot \left(H_{\text{T}} + \frac{D_{\text{ТН}}}{2} \right) = 3,14 \cdot 39,61 \cdot \left(21,17 + \frac{39,61}{2} \right) = 5096,3 \text{ мм}^2 \approx 50,96 \text{ см}^2$. Тогда:

$$\theta = \frac{2,4}{1,2 \cdot 10^{-3} \cdot 50,96} = 39,2 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Перегрев удовлетворяет требованию в исходных данных.

Контрольные вопросы

1. Какой тип ферромагнетика используется в магнитопроводах высокочастотных импульсных трансформаторов?
2. В чем разница между магнито-мягкими и магнито-жесткими ферромагнетиками?
3. Возможно ли использование трансформатора для конвертации однополярного импульсного напряжения?
4. От чего зависит КПД трансформатора?
5. Допустимо ли секционирование обмоток трансформатора и к чему это приводит?