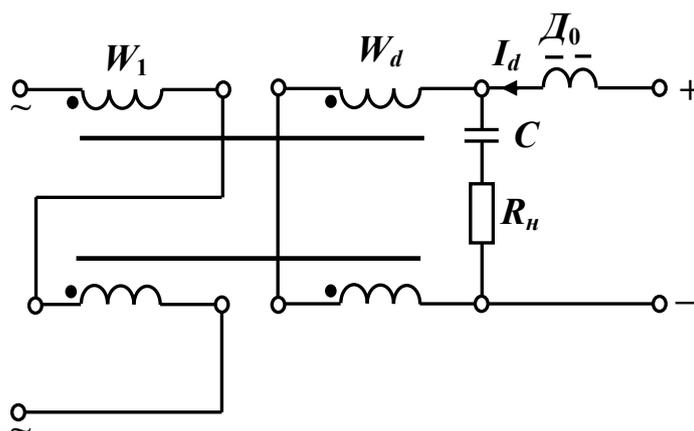


Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

В.П. Обрусник
Т.Н. Зайченко

МАГНИТНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

Учебно-методическое пособие по практическим
занятиям и самостоятельной работе студентов



Томск
2023

УДК 621.318
ББК 31.261
О-245

Рецензент:

Легостаев Н.С., профессор кафедры промышленной электроники ТУСУР, канд. техн. наук

Обрусник, Валентин Петрович

О-245 Магнитные элементы электронных устройств: Учебно-методическое пособие по практическим занятиям и самостоятельной работе студентов / В.П. Обрусник, Т.Н. Зайченко.— Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2023.— 70 с.

Изложены вопросы выполнения расчетных работ в рамках практических занятий и самостоятельной работы студентов, а также контрольные и тестовые вопросы для проверки усвоения материала. Приведены примеры выполнения двух индивидуальных заданий и двух контрольных работ.

Одобрено на заседании каф. Промышленной электроники
протокол № 24 от 8.11.2023

УДК 621.318
ББК 31.261

© Обрусник В.П., Зайченко Т.Н.,
2023

© Томск. гос. ун-т систем упр. и
радиоэлектроники, 2023

СОДЕРЖАНИЕ

1 Цели и задачи дисциплины, ее место в учебном процессе	4
2 Индивидуальное задание № 1 (ИЗ1).....	5
2.1 Содержание ИЗ1 и как оно формируется	5
2.2 Пример техзадания на ИЗ1 при шифре САЕ18КГ	6
2.3 Рейтинг ИЗ1	7
2.4 Требования к оформлению отчета	8
2.5 Пример выполнения ИЗ1 с шифром СМЕ12КГ	10
2.6 Пример выполнения и оформления ИЗ1 с шифром ЧАЕ9МВ ..	21
3 Индивидуальное задание № 2 (ИЗ2).....	34
3.1 Содержание.....	34
3.2 Рейтинг ИЗ2	34
3.3 Пример выполнения ИЗ2.....	35
3 Шифры ИЗ1, КР1, КР2	39
5 Контрольная работа № 1 (КР1)	40
5.1 Как формируется содержание и выполняется работа	40
5.2 Рейтинг КР1	40
5.2 Пример выполнения КР1 по варианту БМЕ11.3.....	42
6 Контрольная работа № 2 (КР2)	47
6.1 Как формируется содержание.....	47
6.2 Рейтинг КР2	47
6.3 Пример выполнения КР2 по варианту 3	49
7 Вопросы для проверки знаний, полученных при изучении дисциплины МЭЭУ.....	54
8 Примеры тестовых вопросов для проверки знаний, полученных при изучении дисциплины МЭЭУ	56
Учебно-методические материалы по дисциплине МЭЭУ	69

1 ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ДИСЦИПЛИНЫ, ЕЕ МЕСТО В УЧЕБНОМ ПРОЦЕССЕ

Цель преподавания дисциплины «Магнитные элементы электронных устройств» (МЭЭУ) – изучить устройство, принцип действия, основные характеристики в статике и динамике типовых магнитных элементов (трансформаторов и дросселей), являющихся неотъемлемой частью электронных устройств.

Задачи изучения дисциплины — научить студентов проектировать, рассчитывать параметры и характеристики трансформаторов и дросселей (индуктивностей) типовых конструктивных исполнений — броневых, стержневых, тороидальных и чашечных.

Перечень дисциплин, необходимых студентам для изучения дисциплины «Магнитные элементы электронных устройств»: теоретические основы электротехники (ТОЭ) по разделу нелинейные цепи с ферромагнетиками; математика по разделам: линейная алгебра, аппроксимация нелинейных функций; физика по разделу электрические цепи с ферромагнитными устройствами.

2 ИНДИВИДУАЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ № 1 (ИЗ1)

2.1 Содержание ИЗ1 и как оно формируется

Задание студентам для ИЗ1 выдается с подшифром, содержащим 5 составляющих, например — САЕ18КГ, что означает:

С — конструкция исполнения МЭ, **стержневая**;

А — материал обмоток, **алюминий**;

Е — охлаждение, **естественное**;

18 — цифра шифра указывает номер варианта исходных данных для расчетов из табл. 1.

В целом, буквами в шифре обозначаются:

Б, С, Т, Ч — конструкции магнитопровода: бронева (Б), стержневая (С), тороидальная (Т), чашечная (Ч);

М, А — медь и алюминий для проводников обмоток;

Е, П — вид охлаждения МЭ: естественное (Е), принудительное (П).

Параметры геометрии МЭ для условий оптимального проектирования по виду технико-экономического показателя:

МВ — минимум веса;

МО — минимум объема;

МС — минимум стоимости;

КГ — компромиссная геометрия.

Данные для параметров оптимальной геометрии приведены в табл. П.7, а, б, в, г.

Все необходимые исходные данные для расчетов в ИЗ1 студент выбирает самостоятельно, пользуясь таблицами Приложения к учебному пособию (см. табл. П.1÷П.16). Можно также использовать табл. 5.1 для КР1.

При этом следует учитывать следующее:

– при **естественном** охлаждении катушки МЭ всегда выполняются с **полным** заполнением окна магнитопровода (ПЗ) и среднерасчетное значение коэффициента теплопередачи σ принимается равным $10 \text{ Вт/ м}^2 \cdot \text{град.}$;

– для **принудительного** воздушного охлаждения катушки МЭ конструкций Б и С выполняются с **неполным** заполнением

(НЗ) окна (нужны каналы охлаждения), величину σ принимают равной $30 \text{ Вт/ м}^2 \cdot \text{град.}$;

– если не задана температура перегрева элементов трансформатора над окружающей средой, то берется $\tau = 50 \text{ }^\circ\text{C}$;

– рисунки конструкций трансформатора выполнять с обозначениями на рис. 1.1 [1] с **обязательным** обеспечением соотношений линейных размеров $x = c/a$, $y = b/a$, $z = h/a$.

Шифры для ИЗ1 выдаются преподавателем, ведущим практические занятия из табл. 4.1 либо по его усмотрению.

Таблица 2.1 — Варианты номинальных данных для ИЗ1

№ вар-та	U_2	I_2	f_1	№ вар-та	U_2	I_2	f_1
	В	А	кГц		В	А	кГц
1	6	100	0,05	11	6	50	0,05
2	12	100	0,4	12	12	80	0,4
3	24	50	1	13	24	25	1
4	36	50	2	14	36	25	2
5	48	20	2,5	15	48	15	2,5
6	100	21	5	16	100	15	5
7	400	5	10	17	120	10	10
8	12	50	15	18	400	4	15
9	24	50	20	19	500	2,5	20
10	36	15	25	20	800	1,5	25

Для всех вариантов: $U_1 = 220 \text{ В}$, $\eta = 0,95$, $\cos \varphi = 0,95$.

2.2 Пример техзадания на ИЗ1 при шифре САЕ18КГ

Рассчитать двухобмоточный *стержневой* трансформатор с *алюминиевыми* обмотками на *П-образном* магнитопроводе, работающий в условиях *естественного* воздушного охлаждения. Трансформатор должен удовлетворять **критерию компромиссных удельно-экономических показателей** с параметрами геометрии в табл. П.7 при номинальных данных варианта 18 (см. табл. 5.1):

первичное напряжение U_1 , В	220
вторичное напряжение U_2 , В	400
вторичный ток I_2 , А	4
частота сети питания f_1 , кГц	15
коэффициенты мощности $\cos \varphi$ и полезного действия η должны быть не менее 0,95.		

Расчитать:

1. Габаритную мощность.
2. Рабочую индукцию.
3. Сечение магнитопровода.
4. Плотность тока обмоток.
5. Линейные размеры магнитопровода.
6. Число витков обмоток.
7. Сечение проводников обмоток.
8. Конструктивные параметры катушки — с раскладкой проводников обмоток в окне магнитопровода.
9. Параметры схемы замещения:
 - активные сопротивления R_1, R_2 ;
 - реактивные сопротивления X_{S1}, X'_{S2}, X_S ;
 - сопротивления контура намагничивания X_μ, R_μ .
10. Технические показатели (по разделу 11.7).

2.3 Рейтинг И31

1. Выбор исходных данных с таблицами — 4 б.
2. Рисунок в масштабе — 2 б.
3. Габаритная мощность и индукция — 3 б.
4. Сечение магнитопровода — 2 б.
5. Плотность тока — 2 б.
6. Линейные размеры с округлением — 2 б.
7. Число витков — 1 б.
8. Сечения проводников, их выбор и раскладка в окне — 10 б.
9. Весовые показатели — 1 б.

10. Расчет технических показателей — 4 б.

11. Оформление записки — 4 б.

12. Защита — 10 б.

Всего: 45 баллов.

Примечание: очень аккуратно нужно отнестись к расчетам индукции, плотности тока и сечения магнитопровода. Ошибки здесь приведут к неправильным результатам для других показателей.

2.4 Требования к оформлению отчета

Оформлять результаты выполнения индивидуальных заданий желательно на бумаге формата А4 (210×297 мм), можно на тетрадных листах. Изложение текста — рукописное или печатное. Основные требования: аккуратность, нумерация страниц, рисунков, таблиц и формул.

Рисунки нужно выполнить в масштабах, учитывающих пропорции (соотношение размеров) рассчитываемых конструкций.

После формулы в общем виде она должна быть записана с цифрами параметров ($S_c = a \cdot b = 20 \times 40 = 800 \text{ мм}^2$). Нельзя писать формулу и сразу ответ, иначе трудно проверить правильность подстановки значений параметров, в том числе — их размерность. Обязательно нужно указывать *размерности* рассчитанных величин. Выполняемые действия должны кратко поясняться, в том числе — ссылками на литературу, и заканчиваться анализом полученного конечного результата. В конце отчета должен быть приведен список использованной литературы.

При выполнении расчетов в системе MathCad следует сопровождать расчеты комментариями и в отчет включить все присваивания, чтобы можно было выполнить проверку расчетов.

Форма обложки отчета

**Томский государственный университет систем
управления и радиоэлектроники (ТУСУР)**

Кафедра промышленной электроники (ПрЭ)

**Индивидуальное задание № 1
по дисциплине «Магнитные элементы
электронных устройств»**

Шифр ЧАЕ9МВ

ВЫПОЛНИЛ

студент группы 360-1

Чатуров А.И.

« 20 » мая 2022 г.

(Подпись студента)

Томск – 2023

2.5 Пример выполнения И31 с шифром СМЕ12КГ

Рассчитать двухобмоточный трансформатор с медными (М) обмотками на стержневом (С) магнитопроводе, работающий в условиях естественного (Е) воздушного охлаждения. Трансформатор должен удовлетворять критерию компромиссных удельно-экономических показателей (КГ) при номинальных данных:

Первичное напряжение $U_1 = 220$ В;

Вторичное напряжение $U_2 = 12$ В;

Вторичный ток $I_2 = 80$ А;

Частота сети питания $f_1 = 400$ Гц.

Коэффициенты мощности $\cos\varphi$ и полезного действия η — не менее 0,95.

Рассчитать:

1. Габаритную мощность.
2. Рабочую индукцию.
3. Сечения магнитопровода.
4. Плотность тока обмоток.
5. Линейные размеры магнитопровода.
6. Число витков обмоток.
7. Сечение проводников обмоток.
8. Конструктивные параметры катушки.
9. Параметры схемы замещения.
 - активные сопротивления R_1 и R_2 ;
 - реактивные сопротивления X_{s1} , X'_{s2} , X_s ;
 - сопротивления контура намагничивания X_μ , R_μ .
10. Технические показатели.
11. Сделать раскладку проводников обмоток в катушке.

Решение

Естественное охлаждение воздухом разрешает принять для расчетов значение коэффициента теплоотдачи $\sigma = 10$ Вт/м²·град. Температура перегрева элементов трансформатора над окружающей средой не задана, поэтому принимается среднерасчетное $\tau = 50$ °С и общая температура нагрева

$$t = t_0 + \tau = 20 + 50 = 70 \text{ °С.}$$

Низковольтность обмоток (до 1 кВ) и невысокая температура их нагрева (до 105 °С) позволяет использовать простые обмоточные провода с изоляцией класса А и применять для межслойной и межобмоточной изоляции недорогую конденсаторную или кабельную бумагу с пропиткой. Ожидаются большие сечения обмоток. Например, при среднерасчитанной плотности тока $j = 2,5 \text{ А/мм}^2$ получается:

$$S_{n2} = I_2/j = 80/2,5 = 32 \text{ мм}^2;$$

$$S_{n1} = I_1/j = U_2 \cdot S_{n2}/U_1 = 12 \cdot 32/220 = 1,745 \text{ мм}^2.$$

Наибольшее сечение проводников обмоток допускается не более

$$S_{nf} = 14/f_1 = 14/0,4 = 35 \text{ мм}^2.$$

При заданной частоте $f_1 = 400 \text{ Гц}$ материалом для магнитопровода целесообразно выбрать нетекстурованную электротехническую сталь из листов горячей прокатки марки 3414(Э44) с толщиной листов 0,2 мм.

Пользуясь данными таблиц П1–П7, выбираем для расчёта трансформатора параметры материала магнитопровода, медных обмоток и показатели геометрии для минимальной стоимости. Выбранные параметры записаны в таблицах 1, 2, 3.

Таблица 1 — параметры материала магнитопровода

Параметр Марка	Δ_c	$\kappa_{зс}$	g_c	$\rho_{со}$	κ_p	f_{10}	B_0	f_1	γ	γ_1	B_s	μ_a
	мм	—	г/см ³	Вт/кг	—	кГц	Тл	кГц	—	—	Тл	Гн/м
3414(Э44)	0,2	0,85	7,65	0,8	1,5	0,4	0,5	0,4	1,7	1,8	1,6	$0,5 \cdot 10^{-3}$

Таблица 2 — Параметры материала обмоток

Материал	Форма сечения	Класс изоляции	Вид охлаждения	$\kappa_{зк}$	g_k	ρ_k	τ	σ
				—	г/см ³	Ом·мм ² /м	°С	Вт/(м ² ·°С)
Медь	круглый прямоугольный	А	естественное	0,35	8,8	0,021	50	10
				0,45				

Таблица 3 — Геометрические параметры для компромиссных удельно-экономических показателей

Исполнение	Заполнение окна	x	y	z	K_s	N_c	N_k	β	B	l_c	l_k
стержневой	полное	1,4	2	2,8	2	4,3	4,8	1,3	2,5	8,1	5,5

Расчет электромагнитных показателей

1. Габаритная мощность:

$$P_1 = \frac{U_2 \cdot I_2}{(\cos \varphi \cdot \eta)} = \frac{12 \cdot 80}{0,95 \cdot 0,95} \cong 1064 \text{ ВА.}$$

2. Рабочая индукция:

$$B_p = B_0 \cdot \sqrt[12]{(M_b \cdot N_c)^7 \cdot M_j \cdot N_k \cdot K_s \cdot M_p^2 / (P_1^2 \cdot f_{1*}^{7 \cdot \gamma - 2})}.$$

Определим: M_b, M_j, M_p .

Здесь взято $\nu = 1$, среднерасчетное; $g_c = 7,65 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$,

$$M_j = \frac{\tau \cdot \sigma \cdot B}{\rho_k \cdot \kappa_{ок}} \cdot \frac{\nu}{\nu + 1} = \frac{50 \cdot 10 \cdot 2,5}{2,1 \cdot 10^{-8} \cdot 0,35} \cdot \frac{1}{1 + 1} = 8,5 \cdot 10^{10} \text{ А}^2/\text{м}^2,$$

где при полном заполнении $\kappa_{ок} = \kappa_{зк}$.

$$\begin{aligned} M_p &= 4 \cdot \kappa_\phi \cdot n_0 \cdot \kappa_{ок} \cdot \kappa_{зс} \cdot B_0 \cdot f_{10} = \\ &= 4 \cdot 1,11 \cdot 0,5 \cdot 0,85 \cdot 0,35 \cdot 0,5 \cdot 400 = 1,32 \cdot 10^2 \text{ В/м}^2; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_b &= \frac{\tau \cdot \sigma \cdot B}{\rho_{со} \cdot \kappa_p \cdot g_c \cdot \kappa_{зс}} \cdot \frac{\nu}{\nu + 1} = \\ &= \frac{50 \cdot 10 \cdot 2,5}{0,8 \cdot 1,5 \cdot 7,65 \cdot 10^3 \cdot 0,85} \cdot \frac{1}{1 + 1} = 8 \cdot 10^{-2} \text{ м.} \end{aligned}$$

Здесь, для синусоидального напряжения $\kappa_\phi = 1,11$ и величина n_0 для трансформатора равна 0,5.

Определяем рабочую индукцию B_p трансформатора при вычисленных значениях M_b, M_j, M_p и $f_{1*} = \frac{f_1}{f_{10}} = \frac{0,4}{0,4} = 1$

$$B_p = B_0 \cdot \sqrt[12]{(M_b \cdot N_c)^7 \cdot M_j \cdot N_k \cdot K_s \cdot M_p^2 / (P_1^2 \cdot f_{1*}^{7 \cdot \gamma - 2})},$$

получаем

$$B_p = B_0 \cdot \sqrt[12]{\frac{(8 \cdot 10^{-2} \cdot 4,3)^7 \cdot 8,5 \cdot 10^{10} \cdot 4,8 \cdot 2 \cdot (1,32 \cdot 10^2)^2}{1064^2 \cdot 1^{7 \cdot 1,7 - 2}}} = B_0 \cdot 5,8 \text{ Тл.}$$

Получаем: $B_p = 0,5 \cdot 5,8 = 2,9 \text{ Тл} > (B_s = 1,6 \text{ Тл})$.

Так как расчетное значение B_p превышает величину насыщения ферромагнитного материала B_s , то принимаем что $B_p = B_s$

$$B_* = \frac{B_p}{B_0} = 3,2.$$

3. Сечение магнитопровода:

$$S_c = \sqrt[7]{\frac{P_1^4}{(M_p \cdot B_* \cdot f_{1*})^4 \cdot (K_s \cdot M_j \cdot N_k)^2}};$$

$$S_c = \sqrt[7]{\frac{1064^4}{(1,32 \cdot 10^2 \cdot 3,2 \cdot 1)^4 \cdot (2 \cdot 8,5 \cdot 10^{10} \cdot 4,8)^2}} = 1,63 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2 = 16,3 \text{ см}^2.$$

4. Усреднённая плотность тока обмоток:

$$j = \sqrt{M_j \cdot \frac{N_k}{K_s \cdot S_c^{0,5}}} = \sqrt{8,5 \cdot 10^{10} \cdot \frac{4,8}{2 \cdot (1,63 \cdot 10^{-3})^{0,5}}} = 2,25 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2 = 2,25 \text{ А/мм}^2.$$

5. Линейные размеры магнитопровода:

$$a = \sqrt{\frac{S_c}{y}} = \sqrt{\frac{16,3}{2}} = 2,85 \text{ см} = 28 \text{ мм.}$$

$$c = a \cdot x = 28,5 \cdot 1,4 = 40 \text{ мм},$$

$$b = a \cdot y = 28,5 \cdot 2 \approx 58 \text{ мм}.$$

$$h = a \cdot z = 28,5 \cdot 2,8 = 80 \text{ мм}.$$

Эскиз рассчитываемого стержневого трансформатора с полным заполнением окна показан на рисунке 1.

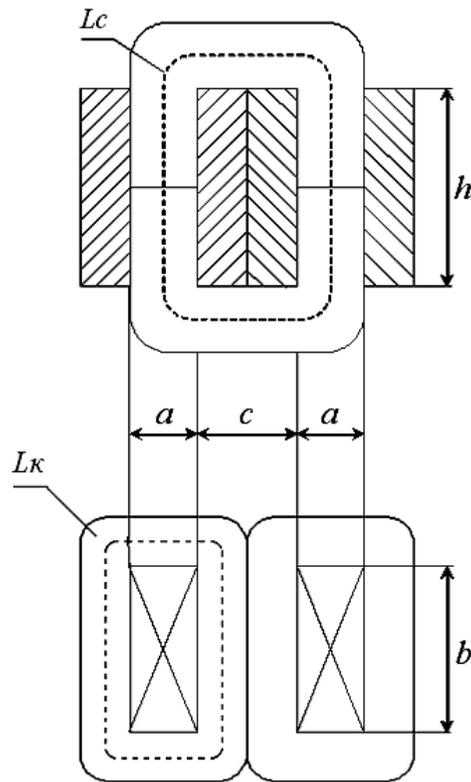


Рис. 1 — Эскиз стержневого трансформатора

6. Число витков обмоток:

Первичной:

$$W_1 = \frac{U_1}{4k_\phi \cdot f_1 \cdot B_p \cdot S_c \cdot k_{zc}} =$$

$$= \frac{220}{4 \cdot 1,11 \cdot 0,4 \cdot 10^3 \cdot 1,6 \cdot 1,63 \cdot 10^{-3} \cdot 0,85} \approx 264 \text{ ВИТКОВ}.$$

Вторичной:

$$W_2 = \frac{U_2 \cdot 1,05}{U_1} \cdot W_1 = \frac{12 \cdot 1,05}{220} \cdot 264 \approx 16 \text{ ВИТКОВ}.$$

В одной катушке:

$$W_{1к} = \frac{W_1}{n_k} = \frac{264}{2} = 132 \text{ витков};$$

$$W_{2к} = \frac{W_2}{n_k} = \frac{16}{2} = 8 \text{ витков},$$

где n_k — число катушек в трансформаторе.

7. Сечения проводников обмоток:

Первичной:

$$S_{n1} = \frac{I_{1н}}{j} = \frac{P_1}{U_1 \cdot j} = \frac{1064}{220 \cdot 2,3} = 2,1 \text{ мм}^2.$$

Вторичной:

$$S_{n2} = \frac{I_{2н}}{j} = \frac{80}{2,3} = 33,33 \text{ мм}^2.$$

$$S_{nf} = 35 \text{ мм}^2 > S_{n1} \text{ и } S_{n2}.$$

Решено мотать Вторичную обмотку проводом прямоугольного сечения (шинка) с шириной $a_{n2} = 2,44$ мм и высотой $b_{n2} = 14,5$ и толщиной изоляции $\Delta_u = 0,5$ мм (таблица П.13). Первичную обмотку нужно мотать одним проводником с сечением $S_{n1} = 2,06 \text{ мм}^2$ и диаметром с изоляцией $d_{1u} = 1,73$ мм стандартным проводом марки ПЭВ-2 (таблица П.14).

8. Конструктивные параметры катушки:

Высота для одного слоя витков обмотки в катушке:

$$h_{сл} = (h_k = h \cdot n_h) - 2\Delta_k,$$

где Δ_k — толщина каркаса катушки; для напряжения до 1кВ $\Delta_k = 2$ мм, $n_h = h_k/h = 1$ для полного заполнения, n_h — относительная величина, показывающая во сколько раз высота катушки меньше высоты окна.

$$h_{сл} = 80 \cdot 1 - 2 \cdot 2 = 76 \text{ мм}.$$

Число витков в слое:

$$W_{сл1} = \frac{h_{сл} \cdot K_{ук}}{d_{1u}}, \quad W_{сл2} = \frac{h_{сл} \cdot K_{ук}}{b_{2u}}$$

где $\kappa_{ук}$ — коэффициент укладки, учитывающий неплотность прилегания витков;

d_{1u} — диаметр провода с изоляцией первичной W_1 обмотки.

$d_{1u} = 1,73$ мм (выбрано в пункте 7).

Ширина шинки для W_2 с изоляцией.

$$a_{2u} = a_{n2} + 2 \cdot \Delta_u = 2,44 + 2 \cdot 0,5 = 3,44 \text{ мм.}$$

Высота шинки для W_2 с изоляцией:

$$b_{2u} = b_{n2} + 2 \cdot \Delta_u = 14,5 + 2 \cdot 0,5 = 15,5 \text{ мм;}$$

$\kappa_{ук} = 0,85$, так как $d_{1u} > 1$ мм (таблица 11,4).

$$W_{сл1} = \frac{76 \cdot 0,85}{1,73} \approx 38 \text{ ВИТКОВ.}$$

$$W_{сл2} = \frac{76 \cdot 0,85}{15,5} \approx 5 \text{ ВИТКОВ}$$

Число слоев:

$$n_{сл} = \frac{W_i}{W_{сли}}$$

$$n_{сл1} = \frac{132}{38} \approx 4 \text{ СЛОЯ.}$$

$$n_{сл2} = \frac{8}{5} \approx 2 \text{ СЛОЯ.}$$

Толщина катушки:

$$c_{к1} = d_{ну1} \cdot n_{сл1} + \Delta_{мо} + \Delta_{сл} \cdot (n_{сл1} - 1);$$

$$c_{к2} = a_{ну2} \cdot n_{сл2} + \Delta_{мо} + \Delta_{сл} \cdot (n_{сл2} - 1),$$

где $\Delta_{сл}$ — толщина межслойной изоляции, в среднем — 0,1 мм;

$\Delta_{мо}$ — изоляция между обмотками и снаружи катушки
 $\Delta_{мо} \approx 0,2$ мм;

$$c_{к1} = 1,73 \cdot 4 + 0,2 + 0,1 \cdot (4 - 1) = 7,4 \text{ мм;}$$

$$c_{к2} = 3,44 \cdot 2 + 0,2 + 0,1 \cdot (2 - 1) = 7,2 \text{ мм;}$$

$$c = c_{к1} + c_{к2} + \Delta_{к} = 7,4 + 7,2 + 2 = 16,6 \text{ мм.}$$

9. Параметры схемы замещения:

Активные сопротивления обмоток

$$R_i = \frac{\rho_{\kappa_i} \cdot W_i \cdot L_{\kappa_i}}{S_{\Pi_i}},$$

где ρ_{κ} — удельное сопротивление материала проводников обмоток;

S_{Π} — сечение провода без изоляции;

L_{κ} — средние длины витков катушек:

$$c_{\kappa} = 0,5 \cdot c;$$

первичная обмотка:

$$L_{\kappa 1} = 2 \cdot \left(a + b + \frac{\pi}{2} \cdot (c_{\kappa 1} + \Delta_{\kappa}) \right);$$

$$L_{\kappa 2} = 2 \cdot \left(28 + 58 + \frac{\pi}{2} \cdot (7,4 + 2) \right) = 201,52 \text{ мм} \approx 201 \text{ мм};$$

вторичная обмотка:

$$L_{\kappa 2} = 2 \cdot \left(a + b + \frac{\pi}{2} \cdot (c_{\kappa 2} + \Delta_{\kappa}) \right);$$

$$L_{\kappa 2} = 2 \cdot \left(28 + 58 + \frac{\pi}{2} \cdot (7,2 + 2) \right) \approx 200 \text{ мм};$$

$$R_1 = \frac{\rho_{\kappa} \cdot W_{1\kappa} \cdot L_{\kappa 1}}{S_{\Pi 1}}, \quad R_2 = \frac{\rho_{\kappa} \cdot W_{2\kappa} \cdot L_{\kappa 2}}{S_{\Pi 2}};$$

$$R_1 = \frac{0,021 \cdot 132 \cdot 0,201}{2,1} = 0,27 \text{ Ом};$$

$$R_2 = \frac{0,021 \cdot 8 \cdot 0,200}{33,33} = 0,017 \text{ Ом}.$$

Реактивные сопротивления обмоток

$$X_S = 2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot L_S;$$

$$X_{S1} = X'_{S2} = 0,5 X_S,$$

где L_S — индуктивность рассеяния обмоток

$$L_S = \mu_0 \cdot \frac{c_K \cdot W_1^2 \cdot L_K}{3h_K \cdot n_K},$$

где $L_K = (L_{K1} + L_{K2}) \cdot 0,5$.

$$L_K = (201 + 200) \cdot 0,5 = 200,5 \text{ мм};$$

$$L_S = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot \frac{0,0074 \cdot 264^2}{3 \cdot 0,080 \cdot 2} \cdot 0,2005 = 2,7 \cdot 10^{-4} \text{ Гн};$$

$$X_{S1} = 2 \cdot \pi \cdot 0,4 \cdot 10^3 \cdot 2,7 \cdot 10^{-4} = 0,678 \text{ Ом};$$

$$X_{S11} = X'_{S2} = 0,5 \cdot 0,678 = 0,339 \text{ Ом}.$$

10. Весовые показатели трансформатора:

Вес магнитопровода:

$$\begin{aligned} G_c &= S_c \cdot L_c \cdot \kappa_{3c} \cdot g_c = a \cdot b \cdot 2 \cdot \left(h + c + \frac{\pi \cdot a}{2} \right) \cdot \kappa_{3c} \cdot g_c = \\ &= 2,8 \cdot 5,8 \cdot 2 \cdot \left(8 + 4 + \frac{3,14 \cdot 2,8}{2} \right) \cdot 0,85 \cdot 7,65 = 3,4 \cdot 10^3 \text{ Г} = 3,4 \text{ кг}. \end{aligned}$$

Вес обмоток:

$$\begin{aligned} G_K &= V_K \cdot \kappa_{3K} \cdot g_K = c_K \cdot h_K \cdot L_K \cdot \kappa_{3K} \cdot g_K \cdot n_K; \\ G_K &= 0,5 \cdot 4 \cdot 8 \cdot 20,05 \cdot 2 \cdot 0,35 \cdot 8,8 = 1976 \text{ Г} \approx 1,98 \text{ кг}. \end{aligned}$$

Общий вес трансформатора:

$$G = G_c + G_K = 3,4 + 1,98 \approx 5,4 \text{ кг}.$$

Удельный вес на единицу мощности:

$$\mathcal{E}_g = \frac{G}{P_1} = 5,4 / 1,06 \text{ кг/кВт} = 5,1 \text{ г/ВА}.$$

Сопротивления контура намагничивания

Силовая линия магнитопровода:

$$L_c = 2 \cdot \left(h + c + \frac{\pi \cdot a}{2} \right) = 2 \cdot \left(80 + 40 + \frac{\pi \cdot 28}{2} \right) = 327,92 \text{ мм} \approx 0,328 \text{ м}$$

Потери мощности в магнитопроводе:

$$\Delta P_c = \rho_{c0} \cdot k_p \cdot G_c \cdot \left(\frac{B}{B_0}\right)^{\gamma_1} \cdot \left(\frac{f_1}{f_{10}}\right)^{\gamma} = 0,8 \cdot 1,5 \cdot 3,4 \cdot \left(\frac{1,6}{0,5}\right)^{1,8} \cdot \left(\frac{0,4}{0,4}\right)^{1,7} = 33 \text{ Вт.}$$

Сопротивление параллельных ветвей:

$$R_0 = \frac{U_1^2}{\Delta P_c} = \frac{220^2}{33} = 1467 \approx 1,5 \text{ кОм};$$

$$L_0 = \frac{S_c \cdot W_1^2 \cdot \mu_a}{L_c + 2 \cdot 10^2 \cdot 5 \cdot 10^{-4}} = \frac{1,63 \cdot 10^{-3} \cdot 264^2 \cdot 5 \cdot 10^{-4}}{0,33 + 2 \cdot 10^2 \cdot 5 \cdot 10^{-4}} = 1,15 \text{ Ом};$$

$$X_0 = 2\pi f_1 \cdot L_0 = 2 \cdot \pi \cdot 0,4 \cdot 10^3 \cdot 1,15 = 2889 \text{ Ом};$$

$$X_\mu = X_0 \cdot \frac{R_0^2}{R_0^2 + X_0^2} = 2889 \cdot \frac{1467^2}{1467^2 + 2889^2} = 592,22 \text{ Ом};$$

$$R_\mu = R_0 \cdot \frac{X_0^2}{R_0^2 + X_0^2} = 1467 \cdot \frac{2889^2}{1467^2 + 2889^2} = 1,2 \text{ кОм.}$$

Потери мощности в активных сопротивлениях обмотки:

$$\Delta P_k = \tau \cdot \sigma \cdot \Pi_{ок} \cdot \frac{B}{1 + \nu};$$

$$\Pi_{окПЗ} = 2 \cdot (c + h) \cdot (L_k - b) =$$

$$= 2 \cdot (0,040 + 0,08) \cdot (0,2005 - 0,058) = 34 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2;$$

$$\Delta P_k = 50 \cdot 10 \cdot 34 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{2,5}{1 + 1} = 20,4 \text{ Вт.}$$

Потери в изоляции катушек:

$$\Delta P_{из} \approx 0,05(\Delta P_k + \Delta P_c) = 0,05 \cdot (20,4 + 33) \approx 2,67 \text{ Вт.}$$

Фактическое соотношение потерь:

$$\nu = \frac{\Delta P_c}{(\Delta P_k + \Delta P_{из})} = \frac{33}{20,4 + 2,67} = 1,4.$$

Коэффициент мощности:

$$\cos \varphi = \frac{\sqrt{U_1^2 - U_x^2}}{U_1},$$

где $U_x = \frac{P_1 \cdot X_S}{U_1} = \frac{1064 \cdot 1,4}{220} = 6,8 \text{ В.}$

$$\cos \varphi = \frac{\sqrt{220^2 - 6,8^2}}{220} = 1.$$

Коэффициент потерь мощности $\Delta\eta$ и КПД:

$$\Delta\eta = \frac{\Delta P_{\kappa} + \Delta P_c + \Delta P_{\text{из}}}{P_1 \cdot \cos \varphi} = \frac{20,4 + 33 + 2,67}{1064 \cdot 1} = 0,053;$$

$$\eta = 1 - \Delta\eta = 1 - 0,053 = 0,947.$$

Фактическое заполнение окна:

$$K_{\text{ок}} = \frac{\sum W_i \cdot S_{\text{п}i}}{S_{\text{ок}}} = \frac{264 \cdot 2,1 + 16 \cdot 33,33}{3200} = 0,34.$$

11. Раскладка проводников:

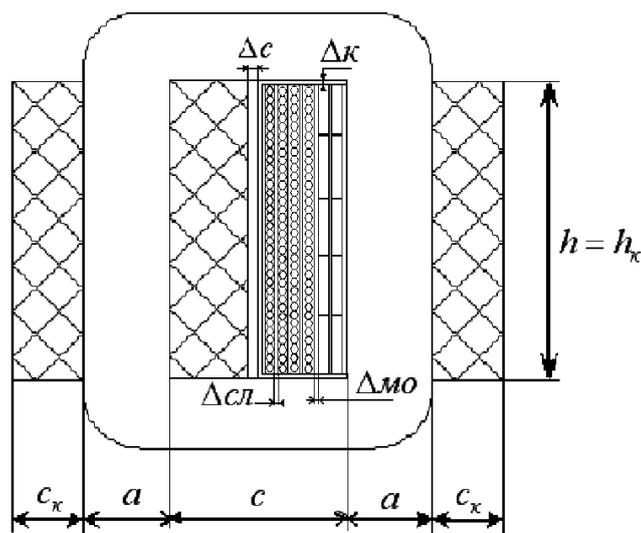


Рис. 2 — Раскладка проводников.

На рисунке 2 обозначено:

Δ_{κ} — толщина изоляции каркаса для магнитопровода;

$\Delta_{\text{сл}}$ — толщина изоляции в слое;

$\Delta_{\text{мо}}$ — толщина межобмоточной изоляции;

h, a, c — геометрические параметры.

Раскладка сделана верно, если выполняется условие:

$$c \leq 2 \cdot c_{\kappa} + \Delta c,$$

где Δc — технологический зазор $\Delta c = 2 \text{ мм.}$

Имеем:

$$\Delta c = c - 2 \cdot c_k = 40 - 2 \cdot 16,6 = 6,8 \text{ мм.}$$

Раскладка верна, так как $\Delta c = 6,8 \text{ мм} > 2 \text{ мм}$, что допускается.

2.6 Пример выполнения и оформления ИЗ1 с шифром ЧАЕ9МВ

Рассчитать двухобмоточный трансформатор с алюминиевыми (А) обмотками на чашечном (Ч) магнитопроводе, работающий в условиях естественного воздушного охлаждения. Трансформатор должен удовлетворять критерию минимального веса (МВ) на единицу входной мощности при номинальных данных:

первичное напряжение U_1 , В	220;
вторичное напряжение U_2 , В	24;
вторичный ток I_2 , А	50;
частота питания сети f_1 , Гц	20000;
коэффициент мощности $\cos(\varphi)$ и полезного действия η	– не менее 0,95.

Рассчитать:

1. Габаритную мощность.
2. Рабочую индукцию.
3. Сечение магнитопровода.
4. Плотность тока обмоток.
5. Линейные размеры магнитопровода.
6. Число витков обмоток.
7. Сечение проводников обмоток.
8. Конструктивные параметры катушки.
9. Параметры схемы замещения:
 - активные сопротивления R_1, R_2 .
 - реактивные сопротивления X_{s1}, X_{s2}, X_s .
 - сопротивления контура намагничивания X_μ и R_μ .
10. Технические показатели.
11. Сделать раскладку проводников обмоток в катушке.

Решение

Естественное охлаждение разрешает принять для расчетов значение коэффициента теплоотдачи $\sigma = 10 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{град}$. Температура перегрева элементов трансформатора над окружающей средой не задана, поэтому принимается среднерасчетное $\tau = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ и общая температура нагрева

$$t = t_0 + \tau = 20 + 50 = 70 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Низковольтность обмоток (до 1 кВ) и невысокая температура их нагрева (до $105 \text{ }^\circ\text{C}$) позволяет использовать простые обмоточные провода с изоляцией класса А и применять для межслойной и межобмоточной изоляции недорогую конденсаторную или кабельную бумагу с пропиткой.

Наибольшее сечение проводников обмоток допускается не более

$$S_{nf} = \frac{14}{f_1, \text{кГц}} = \frac{14}{20} = 0,7 \text{ мм}^2.$$

При заданной рабочей частоте $f_1 = 20 \text{ кГц}$ материалом для магнитопровода выбрать феррит.

Выбранные исходные данные для расчетов сведены в табл. 1 и табл. 2.

Таблица 1 — Показатели материала магнитопровода

	Δ_c	$\kappa_{эс}$	g_c	$\rho_{сo}$	κ_ρ	f_{10}	B_0	f_1	γ	γ_1	B_s
	мм	—	кг/м ³	Вт/кг	—	кГц	Тл	кГц	—	—	Тл
Феррит	—	1	$5 \cdot 10^3$	10	1,1	10	0,2	20	1,2	2,4	0,35

Таблица 2 — Показатели материала обмоток и геометрии для минимальной стоимости

Материал обмоток					Геометрия для минимального веса						
$\kappa_{эс}$	g_k	ρ_k	τ	σ	x	y	z	K_s	N_c	N_k	Б
—	кг/м ³	Ом·м	град	Вт/ (м ² ·град)							
0,35	$2,7 \cdot 10^3$	$3,4 \cdot 10^{-8}$	50	10	0,6	2	1,3	1,2	4	4	1

Эскиз рассчитываемого чашечного трансформатора представлен на рис. 1.

3

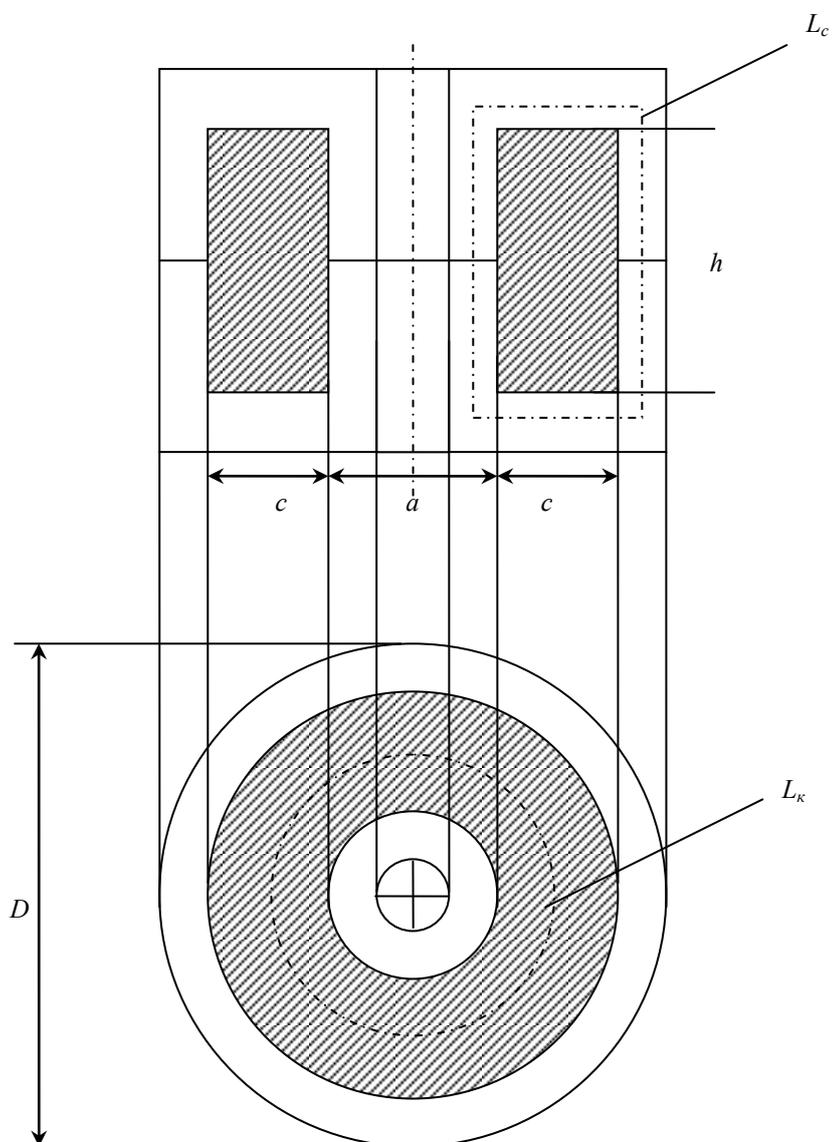


Рис. 1 — Эскиз чашечного трансформатора

Расчет электромагнитных показателей

1. Габаритная мощность

$$P_1 = \frac{U_2 \cdot I_2}{\cos(\varphi) \cdot \eta} = \frac{24 \cdot 50}{0,95 \cdot 0,95} \approx 1330 \text{ ВА.}$$

2. Рабочая индукция

$$B = B_0 \cdot \sqrt[12]{\frac{(M_B \cdot N_c)^7 \cdot M_j \cdot N_k \cdot K_s \cdot M_p^2}{P_1^2 \cdot f_{1*}^{7\gamma-2}}},$$

где

$$f_{1*} = \frac{f_1}{f_{10}} = \frac{20000}{10000} = 2;$$

$$M_B = \frac{\tau \cdot \sigma \cdot B}{\rho_{co} \cdot \kappa_\rho \cdot g_c \cdot \kappa_{zc}} \cdot \frac{\nu}{1+\nu} = \frac{10 \cdot 50 \cdot 1}{10 \cdot 1,1 \cdot 5 \cdot 10^3 \cdot 1} \cdot \frac{1}{1+1} \approx 0,005 \text{ м.}$$

Здесь взято $\nu = 1$, среднерасчетное;

$$M_j = \frac{\tau \cdot \sigma \cdot B}{\rho_k \cdot \kappa_{ок} \cdot (1+\nu)} = \frac{10 \cdot 50 \cdot 1}{3,4 \cdot 10^{-8} \cdot 0,35 \cdot (1+1)} \approx 2 \cdot 10^{10} \frac{\text{А}^2}{\text{м}^3};$$

$$M_p = 4 \cdot \kappa_\phi \cdot n_0 \cdot \kappa_{ок} \cdot \kappa_{zc} \cdot B_0 \cdot f_{10} = 4 \cdot 1,11 \cdot 0,5 \cdot 0,35 \cdot 1 \cdot 0,2 \cdot 10000 = 1554 \frac{\text{В}}{\text{м}};$$

Здесь для синусоидального напряжения $\kappa_\phi = 1,11$ и величина n_0 для трансформатора равна 0,5.

$$B = B_0 \cdot \sqrt[12]{\frac{(5 \cdot 10^{-3} \cdot 4)^7 \cdot 2 \cdot 10^{10} \cdot 4 \cdot 1,2 \cdot 1554^2}{1330^2 \cdot 2^{7 \cdot 1,2-2}}} \approx 0,6 \cdot B_0.$$

Получаем,

$$B = 0,2 \cdot 0,6 = 0,12 \text{ Тл} < (B_s = 0,35 \text{ Тл});$$

$$B_* = \frac{B}{B_0} = \frac{0,12}{0,2} = 0,6.$$

3. Площадь сечения магнитопровода

$$S_c = \sqrt[7]{\frac{P_1^4}{(M_p \cdot B_* \cdot f_{1*})^4 \cdot (K_s \cdot M_j \cdot N_k)^2}} = \sqrt[7]{\frac{1330^4}{(1554 \cdot 0,6 \cdot 2)^4 \cdot (1,2 \cdot 2 \cdot 10^{10} \cdot 4)^2}} \approx 0,0006 \text{ м}^2 \approx 6 \text{ см}^2.$$

4. Плотность тока

$$j = \sqrt{M_j \cdot \frac{N_k}{K_s \cdot S_c^{0,5}}} = \sqrt{2 \cdot 10^{10} \cdot \frac{4}{1,2 \cdot (6 \cdot 10^{-4})^{0,5}}} \approx 1,7 \cdot 10^6 \frac{\text{А}}{\text{м}^2} \approx 1,7 \frac{\text{А}}{\text{мм}^2}.$$

5. Линейные размеры магнитопровода

$$a = \sqrt{\frac{4 \cdot S_c}{\pi}}, \quad c = a \cdot x, \quad h = a \cdot z.$$

$$a = \sqrt{\frac{4 \cdot S_c}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 6 \cdot 10^{-4}}{3,14}} = 0,028 \text{ м} = 28 \text{ мм};$$

$$c = 28 \cdot 0,6 = 17 \text{ мм};$$

$$h = 28 \cdot 1,3 = 36 \text{ мм}.$$

В табл. П.12 гостовских размеров выпускаемых чашечных МЭ нет близких к расчетным. Поэтому полученные значения a , c , h оставляем без изменения.

6. Число витков обмоток

Первичной:

$$W_1 = \frac{U_1}{4 \cdot \kappa_\phi \cdot f_1 \cdot B \cdot S_c \cdot \kappa_{3c}} = \frac{220}{4 \cdot 1,11 \cdot 20000 \cdot 0,12 \cdot 6 \cdot 10^{-4} \cdot 1} \approx 34 \text{ витка}.$$

Вторичной:

$$W_2 = \frac{U_2 \cdot 1,05 \cdot W_1}{U_1} = \frac{24 \cdot 1,05 \cdot 34}{220} \approx 4 \text{ витка.}$$

7. Сечения проводников обмоток

Первичной:

$$S_{\text{п1}} = \frac{I_{1\text{н}}}{j} = \frac{P_1}{U_1 \cdot j} = \frac{1330}{220 \cdot 1,7 \cdot 10^6} \approx 3,6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \approx 3,6 \text{ мм}^2.$$

Вторичной:

$$S_{\text{п2}} = \frac{I_{2\text{н}}}{j} = \frac{50}{1,7 \cdot 10^6} \approx 29,4 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \approx 29,4 \text{ мм}^2.$$

Проводники первичной и вторичной обмоток необходимо сделать многожильными, так как рассчитанные сечения значительно больше $S_{nf} = 0,7 \text{ мм}^2$ при частоте 20 кГц.

8. Раскладка проводников обмоток в окне МЭ

Высота для одного слоя (ряда) витков обмотки в катушке

$$h_{\text{сл}} = (h_k = h) - 2 \cdot \Delta_k = 36 - 2 \cdot 2 = 32 \text{ мм},$$

где Δ_k — толщина каркаса катушки; для напряжения до 1 кВ $\Delta_k = 2 \text{ мм}$.

Поскольку $S_{\text{п1}} > S_{nf}$ в 4 и $S_{\text{п2}} > S_{nf}$ в 22 раза, мотать обмотки нужно многожильными проводами, рассчитывая их диаметры по формуле

$$d_{\text{ни}} = \sqrt{\frac{4}{\pi} \cdot \frac{S_n}{k_{\text{зж}}}} + 2 \cdot \Delta_u,$$

где $k_{\text{зж}} = 0,8$ — коэффициент заполнения провода жилой;

Δ_u — толщина изоляции, при напряжении до 1 кВ,
 $\Delta_u = 0,1$ мм.

Диаметр многожильного провода с изоляцией первичной обмотки:

$$d_{1u} = \sqrt{\frac{4 \cdot S_{n1}}{\pi \cdot \kappa_{зж}}} + 2 \cdot \Delta_u = \sqrt{\frac{4 \cdot 3,6}{3,14 \cdot 0,8}} + 2 \cdot 0,1 \approx 2,6 \text{ мм.}$$

Диаметр многожильного провода с изоляцией вторичной обмотки:

$$d_{2u} = \sqrt{\frac{4 \cdot S_{n2}}{\pi \cdot \kappa_{зж}}} + 2 \cdot \Delta_u = \sqrt{\frac{4 \cdot 29,4}{3,14 \cdot 0,8}} + 2 \cdot 0,1 \approx 7 \text{ мм.}$$

Число витков в слое первичной обмотки

$$W_{сл1} = \frac{h_{сл} \cdot \kappa_{ук}}{d_{1u}} = \frac{32 \cdot 0,85}{2,6} \approx 11 \text{ витков.}$$

Число витков в слое вторичной обмотки

$$W_{сл2} = \frac{h_{сл} \cdot \kappa_{ук}}{d_{2u}} = \frac{32 \cdot 0,85}{7} \approx 4 \text{ витка.}$$

Здесь $\kappa_{ук}$ — коэффициент укладки, учитывающий неплотность прилегания витков.

Число слоев:

$$n_{сл1} = \frac{W_1}{W_{сл1}} = \frac{34}{11} \approx 3 \text{ слоя, для первичной обмотки;}$$
$$n_{сл2} = \frac{W_2}{W_{сл2}} = \frac{4}{4} = 1 \text{ слой, для вторичной обмотки.}$$

Толщина катушки:

$$\begin{aligned}
c_{\kappa 1} &= d_{1u} \cdot n_{cl1} + \Delta_c (n_{cl1} - 1) + \Delta_\kappa + \Delta_{mo}; \\
c_{\kappa 1} &= 2,6 \cdot 3 + 0,1(3 - 1) + 2 + 0,2 = 10,2 \text{ мм}; \\
c_{\kappa 2} &= d_{2u} \cdot n_{cl2} + \Delta_c (n_{cl2} - 1) + \Delta_{mo}; \\
c_{\kappa 2} &= 7 \cdot 1 + 0,1(1 - 1) + 0,2 = 7,2 \text{ мм}; \\
c_\kappa &= c_{\kappa 1} + c_{\kappa 2}; \\
c_\kappa &= 10,2 + 7,2 = 17,4 \text{ мм} < (c = 17 \text{ мм}).
\end{aligned}$$

Здесь Δ_c — толщина межслойной изоляции, в среднем — 0,1 мм. Между обмотками выполняется дополнительный слой изоляции (кроме межслойной) с толщиной $\Delta_{mo} \approx 0,2$ мм.

Нужно увеличить ширину окна c на $1 \div 2$ мм, так как нет места для технологического зазора, принимаем $c = 19$ мм.

Раскладка проводников показана на рис. 2.

9. Параметры схемы замещения

Активное сопротивление обмоток

$$R_i = \frac{\rho_\kappa \cdot W_i \cdot L_{\kappa i}}{S_{\pi i}},$$

где ρ_κ — удельное сопротивление Ом·мм²/м при заданном перегреве τ ;

$W_i, L_{\kappa i}$ — число витков и средняя длина витка [м] i -ой обмотки;

$S_{\pi i}$ — сечение провода, мм² (без изоляции, чистое).

Средняя длина витка первичной обмотки

$$L_{\kappa 1} = \pi \cdot \left(a + \frac{c_{\kappa 1}}{2} \right) = 3,14 \cdot (28 + 5,2) = 104 \text{ мм}.$$

Средняя длина витка вторичной обмотки

$$L_{к2} = \pi \cdot (a + c_{к1} + \frac{c_{к2}}{2}) = 3,14 \cdot (28 + 10,2 + \frac{7,2}{2}) = 130 \text{ мм} = 0,13 \text{ м.}$$

Активное сопротивление первичной обмотки

$$R_1 = \frac{\rho_{к} \cdot W_1 \cdot L_{к1}}{S_{п1}} = \frac{0,034 \cdot 10^{-3} \cdot 34 \cdot 104}{3,6} \approx 36,3 \cdot 10^{-3} \text{ Ом.}$$

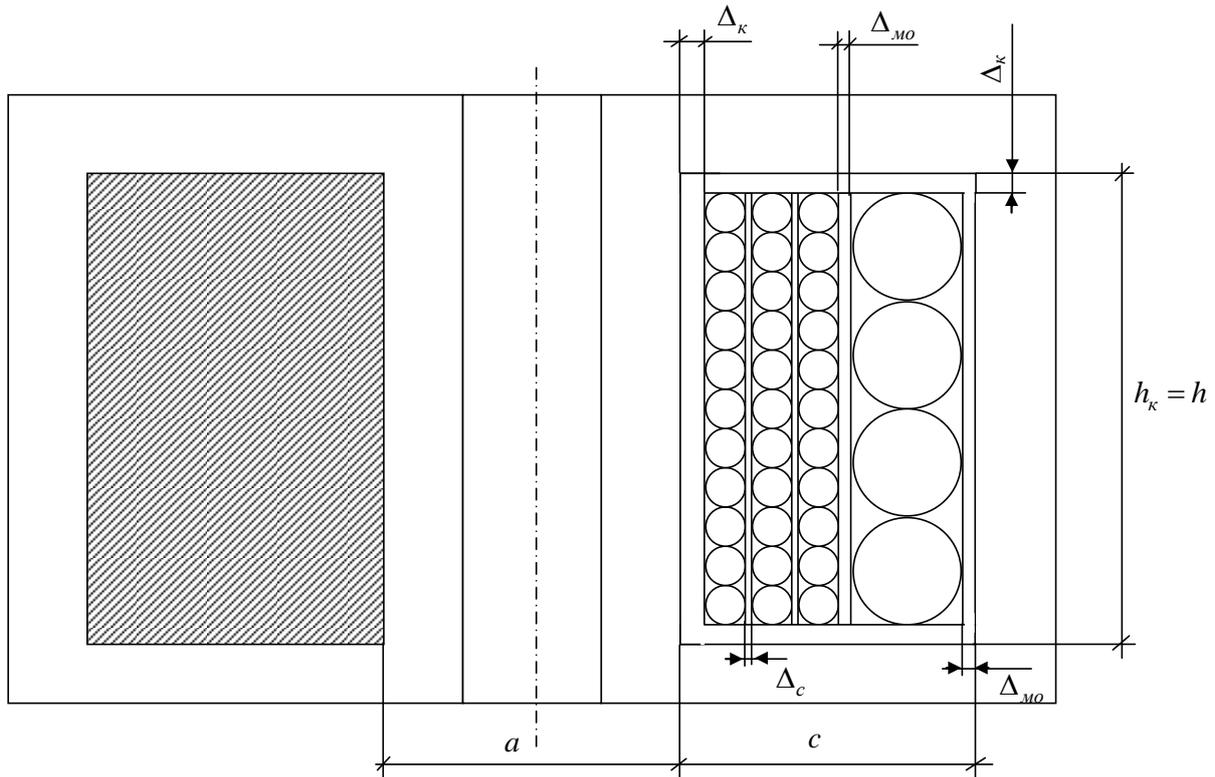


Рис. 2 — Раскладка проводников

Активное сопротивление вторичной обмотки

$$R_2 = \frac{\rho_{к} \cdot W_2 \cdot L_{к2}}{S_{п2}} = \frac{0,034 \cdot 10^{-3} \cdot 4 \cdot 131}{29,4} \approx 0,62 \cdot 10^{-3} \text{ Ом.}$$

Индуктивное сопротивление обмоток.

Поток рассеяния

$$X_s = 2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot L_s,$$

где L_s — индуктивность рассеяния.

$$L_s = \frac{\mu_0 \cdot L_k \cdot c_k \cdot W_1^2}{3 \cdot h_k \cdot n_k},$$

где L_k, n_k — средняя длина катушки по периметру и число катушек на магнитопроводе;

c_k, h_k — толщина и высота катушки;

W_1 — число витков первичной обмотки.

Средняя длина катушки по периметру

$$L_k = \pi \cdot (a + c) = 3,14 \cdot (28 + 17) \approx 141 \text{ мм.}$$

Численное значение индуктивности рассеяния

$$L_s = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 19 \cdot 10^{-3} \cdot 141 \cdot 10^{-3} \cdot 34^2}{3 \cdot 36 \cdot 10^{-3} \cdot 1} \approx 3,6 \cdot 10^{-5} \text{ Гн;}$$

Сопротивление индуктивности рассеяния

$$X_s = 2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot L_s = 2 \cdot 3,14 \cdot 20000 \cdot 3,6 \cdot 10^{-5} \approx 4,53 \text{ Ом;}$$

$$X_{s1} = X'_{s2} = 0,5 \cdot X_s;$$

$$X_{s1} = X'_{s2} = 0,5 \cdot 4,53 \approx 2,27 \text{ Ом.}$$

Сопротивления контура намагничивания

$$X_\mu = X_0 \cdot \frac{R_0^2}{R_0^2 + X_0^2};$$

$$R_\mu = R_0 \cdot \frac{X_0^2}{R_0^2 + X_0^2};$$

$$R_0 = \frac{U_1^2}{\Delta P_c}.$$

Потери мощности в магнитопроводе

$$\Delta P_c = \rho_{co} \cdot \kappa_p \cdot G_c \cdot \left(\frac{B}{B_0}\right)^{\gamma_1} \cdot \left(\frac{f_1}{f_{10}}\right)^\gamma.$$

Длина силовой линии

$$L_c = 2 \cdot (h + c + 0,5 \cdot a) = 2 \cdot (36 + 17 + 0,5 \cdot 28) = 134 \text{ мм.}$$

Вес магнитопровода

$$G_c = S_c \cdot L_c \cdot g_c = 0,0006 \cdot 0,1134 \cdot 5 \cdot 10^3 \approx 0,4 \text{ кг.}$$

Потери мощности в магнитопроводе

$$\Delta P_c = \rho_{co} \cdot \kappa_p \cdot G_c \cdot \left(\frac{B}{B_0}\right)^{\gamma_1} \cdot \left(\frac{f_1}{f_{10}}\right)^\gamma = 10 \cdot 1,1 \cdot 0,4 \cdot \left(\frac{0,12}{0,2}\right)^{2,4} \cdot \left(\frac{20000}{10000}\right)^{1,2} \approx 2,98 \text{ Вт;}$$

$$R_0 = \frac{U_1^2}{\Delta P_c} = \frac{220^2}{2,98} = 16,2 \text{ кОм;}$$

$$X_0 = 2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot L_0;$$

$$L_0 = \frac{S_c \cdot W_1^2 \cdot \mu_a}{L_c + 2 \cdot 10^2 \cdot \mu_a} = \frac{0,6 \cdot 10^{-3} \cdot 34^2 \cdot 5 \cdot 10^{-4}}{0,134 + 2 \cdot 10^2 \cdot 5 \cdot 10^{-4}} = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ Ом;}$$

$$X_0 = 2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot L_0 = 2 \cdot \pi \cdot 2 \cdot 10^3 \cdot 0,0015 = 186,4 \text{ Ом.}$$

Сопротивления контура намагничивания

$$X_\mu = X_0 \cdot \frac{R_0^2}{R_0^2 + X_0^2} = 186,4 \cdot \frac{16200^2}{16200^2 + 186,4^2} = 186,35 \text{ Ом;}$$

$$R_\mu = R_0 \cdot \frac{X_0^2}{R_0^2 + X_0^2} = 16200 \cdot \frac{186,4^2}{16200^2 + 186,4^2} = 2,14 \text{ Ом.}$$

10. Технические показатели

Масса проводников катушки:

$$G_k = \sum S_{\text{ш}} \cdot L_{ki} \cdot W_i \cdot g_k = 3,6 \cdot 10^{-6} \cdot 0,113 \cdot 34 \cdot 2,7 \cdot 10^3 + 29,4 \cdot 10^{-6} \cdot 0,135 \cdot 4 \cdot 2,7 \cdot 10^3 = 0,043 \text{ кг.}$$

Общий вес трансформатора:

$$G = G_c + G_k = 0,4 + 0,043 = 0,443 \text{ кг.}$$

Потери мощности в активных сопротивлениях обмотки

$$\begin{aligned} \Delta P_k &= \sum I_i^2 \cdot R_i = I_1^2 \cdot R_1 + I_2^2 \cdot R_2 = \left(\frac{P_1}{U_1} \right)^2 \cdot R_1 + I_2^2 \cdot R_2 = \\ &= \left(\frac{1330}{220} \right)^2 \cdot 36,3 \cdot 10^{-3} + 50^2 \cdot 0,062 \cdot 10^{-3} \approx 1,5 \text{ Вт.} \end{aligned}$$

Потери мощности в магнитопроводе

$$\Delta P_c = \rho_{co} \cdot \kappa_p \cdot G_c \cdot \left(\frac{B}{B_0} \right)^{\gamma_1} \cdot \left(\frac{f_1}{f_{10}} \right)^{\gamma} = 2,97 \text{ Вт.}$$

Потери в изоляции катушек

$$\Delta P_{\text{из}} \approx 0,05 \cdot (\Delta P_k + \Delta P_c) = 0,05 \cdot (1,5 + 2,97) \approx 0,23 \text{ Вт.}$$

Фактическое соотношение потерь

$$v = \frac{\Delta P_c}{\Delta P_k + \Delta P_{\text{из}}} = \frac{2,97}{1,5 + 0,23} \approx 1,7.$$

Коэффициент мощности

$$\cos \varphi = \frac{\sqrt{U_1^2 - U_x^2}}{U_1},$$

где $U_x = \frac{P_1 \cdot X_s}{U_1}$.

$$U_x = \frac{1330 \cdot 4,53}{220} = 27,39 \text{ В};$$

$$\cos \varphi = \frac{\sqrt{220^2 - 27,39^2}}{220} = 0,992.$$

Коэффициент потерь мощности $\Delta\eta$ и КПД

$$\Delta\eta = \frac{\Delta P_k + \Delta P_c + \Delta P_{из}}{P_1 \cdot \cos \varphi}.$$

$$\Delta\eta = \frac{1,5 + 2,97 + 0,23}{1330 \cdot 0,992} = 0,0035;$$

$$\eta = 1 - \Delta\eta = 1 - 0,0035 = 0,996.$$

3 ИНДИВИДУАЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ № 2 (ИЗ2)

3.1 Содержание ИЗ2

Используя данные, полученные при выполнении ИЗ1: $S_c = a \cdot b \cdot \kappa_{зс}$, W_1 , W_2 , d_{1u} , d_{2u} , определить для МЭ индуктивность L , если этот элемент будет использован в качестве дросселя, то есть индуктивности без подмагничивания.

Для этого:

1. Записать формулу для индуктивности L_1 , если обмотка МЭ будет выполнена с сечением и диаметром проводников для W_1 в ИЗ1, то есть:

$$W_{L1} = \left(W_{\kappa1} + W_{\kappa2} \cdot \frac{d_{u2}}{d_{u1}} \right) \cdot n_{\kappa}. \quad (5.1)$$

2. Определить значение L_2 , если W_{L2} будет выполнена с числом витков

$$W_{L2} = \left(W_{\kappa2} + W_{\kappa1} \cdot \frac{d_{u2}}{d_{u1}} \right) \cdot n_{\kappa}. \quad (5.2)$$

3. Определить таблично значение L_1 и L_2 при немагнитных зазорах $\delta = 0, 1, 2, 3, 4, 5$ мм.

4. Для пунктов 1 и 2 построить кривые зависимости L от δ $L = f(\delta)$.

5. Проанализировать полученные результаты.

3.2 Рейтинг ИЗ2

1. Формула индуктивности L_1 , когда окно магнитопровода заполнено проводниками с параметрами для W_{L1} — 1 б.
2. Формула индуктивности L_2 , когда окно магнитопровода заполнено проводниками с параметрами для W_{L2} — 1 б.
3. Таблица значений индуктивностей L_1 и L_2 при немагнитных зазорах $\delta \neq 0$ — 2 б.

4. Кривая $L_1 = f(\delta)$ и $L_2 = f(\delta)$, при $\delta \geq 0$ — 3 б.
5. Анализ полученных результатов — 1 б.
6. Защита — 2 б.

Всего — 10 баллов.

3.3 Пример выполнения ИЗ2

Исходные данные: берутся по результатам выполнения ИЗ1. Например, для выполненного ИЗ1 в разделе 4.6 получены данные: $W_1 = 264$, $W_{\kappa 1} = 132$, $d_{1u} = 1,73$ мм, $c_{\kappa 1} = 7,4$ мм, $n_{сл1} = 4$; $W_{сл1} = 38$, $W_2 = 16$, $W_{\kappa 2} = 8$, $a_{2u} = 3,44$ мм (толщина шинки вторичной обмотки с учетом изоляции), $c_{\kappa 2} = 7,2$ мм.

Параметры магнитопровода: $a = 28$ мм, $b = 58$ мм, $c = 40$ мм, $h = 80$ мм, $\mu_a = 0,5 \cdot 10^{-3}$ Гн/м, $\kappa_{3c} = 0,85$. Расшифровки величин см. в примере для ИЗ1.

Требуется определить: значения индуктивностей МЭ, если использовать рассчитанный в ИЗ1 трансформатор в качестве дросселя, имеющего одну обмотку W_{L1} или W_{L2} с параметрами W_1 или W_2 для трансформатора в ИЗ1. Индуктивность рассчитать для дискретных значений немагнитного зазора $\delta = 0, 1, 2, 3, 4, 5$ мм. Построить характеристики $L = f(\delta)$. Сделать выводы по результатам.

Решение

3.3.1 Индуктивности рассчитываются по выражению (6.6) учебного пособия [1]

$$L_1 = \frac{S_c \cdot W_{L1}^2}{L_c / \mu_a + 0,8 \cdot 10^6 \cdot \delta}; \quad (5.3)$$

$$L_2 = \frac{S_c \cdot W_{L2}^2}{L_c / \mu_a + 0,8 \cdot 10^6 \cdot \delta}. \quad (5.4)$$

Здесь:

S_c — сечение магнитопровода с учетом заполнения его ферромагнетиком

$$S_c = a \cdot b \cdot \kappa_{zc} = 28 \cdot 58 \cdot 0,85 = 1380 \text{ мм}^2 = 1,38 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2;$$

L_c — средняя длина магнитопровода

$$L_c = 2 \left(h + c + \frac{\pi \cdot a}{2} \right) = 2 \left(80 + 40 + \frac{\pi \cdot 28}{2} \right) \approx 308 \text{ мм} = 0,308 \text{ м};$$

μ_a — абсолютное значение магнитной проницаемости ферроматериала магнитопровода; значение это взято по И31

$$\mu_a = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ Гн/м};$$

W_{L1} , W_{L2} — числа витков индуктивности, пересчитанные от трансформатора.

Всегда $W_{L1} > W_1$, так как добавляются витки, расположенные в пространстве для W_2 . $W_{L2} > W_2$, добавляются витки в пространстве для W_1 .

3.3.2 Определяется число слоев $n_{сл.1д}$ для W_{L1} , добавляемых за счет толщины вторичной обмотки $c_{к2}$ трансформатора по И31.

$$n_{сл.1д} = \frac{c_{к2}}{d_{1n}} = \frac{7,2}{1,73} = 4,16 = 4 \text{ слоя.}$$

3.3.3 Определяется число витков W_{L1} при параметрах проводников $W_{к1} = 132$, $W_{1сл} = 38$ по И31

$$W_{L1} = (W_{к1} + W_{1сл} \cdot n_{сл.1д}) \cdot n_k = (132 + 38 \cdot 4) \cdot 2 = 568 \text{ витков.}$$

3.3.4 Определяется число слоев для W_{L2} , добавляемых за счет толщины $c_{к1}$ трансформатора по И31.

$$n_{сл.2\delta} = \frac{c_{к1}}{a_{2u}} = \frac{7,4}{3,44} = 2,15 \approx 2 \text{ слоя.}$$

Получаем число витков W_{L2} при параметрах проводников $W_{к2} = 8$, $W_{2сл} = 5$ по И31:

$$W_{L2} = (W_{к2} + W_{2сл} \cdot n_{сл.2\delta}) \cdot n_{к} = (8 + 5 \cdot 2) \cdot 2 = 36 \text{ витков.}$$

3.3.5 Согласно выражениям (5.3) и (5.4) при подстановке численных значений величин получаем:

$$L_1 = \frac{1,38 \cdot 10^{-3} \cdot 568^2}{\frac{0,308}{0,5 \cdot 10^{-3}} + 0,8 \cdot 10^6 \cdot \delta} = \frac{445}{616 + 0,8 \cdot 10^6 \cdot \delta}.$$

Если δ задано в мм, то при $\delta = 1$ мм имеем $\delta = 10^{-3}$ мм.

Получаем:

$$L_1 = \frac{445}{616 + 800 \cdot \delta}. \quad (5.5)$$

Для L_2 с подстановкой численных значений в (5.4) имеем:

$$L_2 = \frac{1,38 \cdot 10^{-3} \cdot 36^2}{\frac{0,308}{0,5 \cdot 10^{-3}} + 800 \cdot \delta} = \frac{1,79}{616 + 800 \cdot \delta}. \quad (5.6)$$

По выражениям (5.5) и (5.6) построим зависимости L_1 , L_2 от δ .

Данные расчетов приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1 Результаты расчета индуктивностей

δ [мм]	0	0,5	1	2	3	4	5
L_1 [мГн]	720	440	310	200	150	120	100
L_2 [мГн]	3	1,8	1,3	0,8	0,6	0,5	0,4

Кривые $L_1(\delta)$, $L_2(\delta)$ показаны на рис. 3.1.

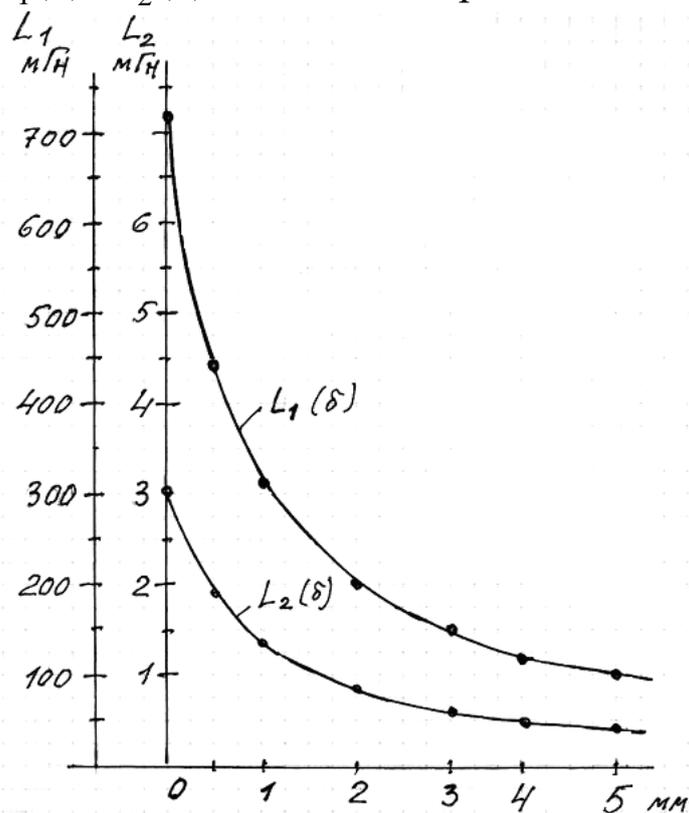


Рис. 3.1 Расчетные зависимости $L_1(\delta)$, $L_2(\delta)$

Выводы по результатам И32

1. Численные значения индуктивностей МЭ существенно зависят от линейных размеров магнитопровода S_c , L_c , его магнитной проницаемости и особенно от числа витков обмотки. При изменении W в 10 раз — индуктивность меняется в 100 раз.

2. Зависимость индуктивности от толщины немагнитного зазора δ нелинейная. С увеличением δ она сначала уменьшается, но при $\delta > 4$ мм почти не меняется.

4 ВАРИАНТЫ И ШИФРЫ ИЗ1, КР1, КР2

Таблица 4.1 Варианты и шифры ИЗ1, КР1, КР2 для определения ИСХОДНЫХ ДАННЫХ

№№ вариантов	Шифры работ		
	ИЗ1	КР1	КР2
1	БАП1МВ	БАП1.4	1
2	САП2МВ	САП2.6	2
3	БАП2МВ	ТАП3.12	3
4	ТАП2МВ	БМП4.2	4
5	БМП4МО	СМП5.3	5
6	СМП4МО	СМП6.3	6
7	ТМП4МО	ТМП9.9	7
8	БАЕ1МВ	БАЕ8.1	8
9	ЧАЕ9МВ	САЕ5.2	9
10	БМЕ7МС	ТАЕ10.10	10
11	СМЕ7МС	БМЕ3.5	11
12	ТМЕ7МС	СМЕ2.4	12
13	ЧМЕ7МС	ТМЕ17.11	13
14	БМЕ12КГ	БМЕ8.2	14
15	СМЕ12КГ	СМЕ1.3	15
16	БМЕ1КГ	СМЕ8.4	16
17	ЧАП19МС	БМЕ7.5	17
18	ЧМП19МС	СМЕ7.5	18
19	ЧАЕ9МВ	ТМЕ7.10	19
20	ЧМЕ9МВ	БМП20.3	20
21	БМЕ7КГ	СМП20.3	21
22	СМЕ7КГ	ТМП20.9	22
23	ТМЕ7КГ	ТАЕ11.3	23
24	ЧМЕ7КГ	БАЕ11.3	24
25	БМЕ7МС	САЕ11.9	25

5 КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА № 1 (КР1)

5.1 Как формируется содержание и выполняется работа

Контрольная работа выполняется студентами в часы занятий по расписанию, отводится на неё 2 академических часа. Тексты вариантов КР1 составляются преподавателем, согласно шифрам в табл. 4.1.

Буквенные составляющие шифров такие же, как для ИЗ1 (см. раздел 2.1). Первая цифра шифра указывает номер варианта в табл. 5.1, по которому выбираются параметры магнитных материалов магнитопровода.

Вторая цифра указывает вариант в табл. 5.2, определяющий тип и линейные размеры магнитопровода. Параметры проводников обмоток (М — медные, А — алюминиевые) выписываются из табл. П.1, табл. П.2 Приложения. Особенности естественного (Е) и принудительного (П) охлаждений и соответствующие им значения коэффициентов теплоотдачи σ , пояснены в разделе 2.1.

Пример одного из вариантов КР1 с шифром БМЕ.11.3 с его исполнением приведен в разделе 5.3.

5.2 Рейтинг КР1

1. Рисунок МЭ с обозначением геометрических параметров — 2 б.
2. Расчет геометрических показателей — 6 б.
3. Допустимые потери мощности — 3 б.
4. Значение допустимой индукции — 3 б.
5. Плотность тока в обмотках — 2 б.
6. Максимальная габаритная мощность — 2 б.
7. Весовые показатели — 2 б.

Всего — 20 баллов.

Примечание: Ошибки, допущенные при расчетах в п. 1–2, не учитываются в других пунктах, хотя расчеты при этом получаются с неверными результатами.

Таблица 5.1 — Параметры магнитных материалов для контрольной работы № 1 (КР1)

№ вар.	Материал	Δ_c	k_{zc}	γ	γ_1	k_p	$\rho_{\bar{n}0}$	f_{10}	f_1	B_0	B_S	g_c
		мм	—	—	—	—	Вт/кг	кГц	кГц	Тл	Тл	г/см ³
1	3412	0,5	0,95	1,5	2	1,4	1,6	0,05	0,05	1	1,25	7,65
2	(Э42)	0,35	0,93	1,5	2	1,4	1,4	0,05	0,05	1	1,25	
3	3414	0,2	0,9	1,5	2	1,5	10,5	0,4	0,4	1	1	
4	(Э44)	0,1	0,85	1,5	2	1,5	9	0,4	0,4	1	1	
5	3423	0,2	0,9	1,7	1,8	1,5	9	0,4	0,5	1	1,65	7,65
6	(Э330)	0,1	0,85	1,6	1,8	1,5	34	1	1	1	1,65	
7		0,08	0,8	1,5	1,8	1,55	28	1	1	1	1,65	
8	3425	0,05	0,75	1,4	2	1,6	26	2,5	5	0,5	1,6	
9	(Э350)	0,02	0,62	1,4	2	1,65	25	2,5	5	0,5	1,5	8,2
10	50Н	0,1	0,85	1,4	1,6	1,7	5	1	1	0,5	1,2	
11		0,05	0,75	1,2	1,5	1,8	12	2,5	5	0,5	1	
12		0,02	0,62	1,2	1,4	1,9	60	10	10	0,5	1	
13	50НП	0,1	0,85	1,4	1,6	1,7	5	1	1	0,5	1,2	
14		0,05	0,75	1,3	1,5	1,8	4,5	1	2	0,5	1	
15		0,02	0,62	1,2	1,4	1,9	2,8	1	5	0,5	1	
16	80НХС,	0,1	0,85	1,65	2	2,5	2	1	1	0,5	1	8,5
17	79НМ	0,05	0,75	1,5	2	2,8	6,3	2,5	5	0,5	1	
18		0,02	0,62	1,4	2	3	30	10	15	0,5	1	
19	2000НМ	—	1	1,2	2,5	1,2	21	20	20	0,2	0,5	5
20	3000НМ	—	1	1,1	2,5	1,2	23	20	25	0,2	0,35	

Примечание. Для шихтованных и ленточных магнитопроводов B_S соответствует $H_S=5$ А/см; для ферритов B_S соответствует $H_S=0,2$ А/см; всегда $\mu_a = B_S/H_S$ [Тл·м/А].

Таблица 5.2 — Исполнение и линейные размеры сердечников [мм] для КР1

№№ вариантов	Разъемный ПЛ				№№ вариантов	Тороид			
	a	b	c	h		a	b	$c=d$	D
1	6,5	12,5	8	16	6	4	5	10	18
2	10	12,5	12,5	32	7	6	8	20	32
3	12,5	16	16	32	8	8	10	25	41
4	16	32	25	50	9	12	20	40	64
5	20	40	32	50	10	24	50	80	128

5.3 Пример выполнения КР1 по варианту БМЕ11.3

Определить показатели трансформатора, выполненного на *броневом* магнитопроводе из *двух* ленточных сердечников типа ПЛ с размерами: ширина $a_c = 12,5$ мм, толщина $b_c = 16$ мм, ширина окна $c = 16$ мм, высота окна $h = 32$ мм (взяты из табл. 3 для варианта 3). Заполнение окна — *полное, ввиду естественного охлаждения*.

По варианту 11 из табл 5.2 материал сердечника марки 50Н имеет параметры:

коэффициент заполнения сечения $k_{zc} = 0,75$;

удельный вес $g_c = 8,2$ г/см³;

удельные потери мощности $\rho_c = 12$ Вт/кг;

при индукции $B_0 = 0,5$ Тл и частоте $f_{10} = 2,5$ кГц;

индукция насыщения $B_s = 1$ Тл;

коэффициент потерь мощности на стыке сердечников $k_\rho = 1,8$;

коэффициент влияния частоты на потери в стали $\gamma = 1,2$.

Трансформатор будет выполнен с *медными* обмотками для работы с частотой питающего напряжения $f_1 = 5$ кГц в условиях *естественного* воздушного охлаждения.

Параметры обмоточного материала из *меди* для температуры нагрева 70 °С принимаются (взято $\tau = 50$ °С, так как не задано): удельное сопротивление $\rho_k = 2,1 \cdot 10^{-8}$ Ом·м, удельный вес $g_k = 8,8$ г/см³, среднерасчетный коэффициент заполнения катушки сечениями проводников обмоток $k_{зк} = 0,35$ (данные из табл. П.1).

Требуется определить (после выполнения эскиза рис. 5.1):

1. Геометрические параметры трансформатора: объем магнитопровода V_c , объем катушек V_k , поверхность охлаждения сердечников Π_{oc} и катушек $\Pi_{ок}$.

2. Потери мощности в обмотках и сердечниках ΔP_k , ΔP_c .

3. Среднюю плотность тока обмоток j и рабочую индукцию магнитопровода B_p , допустимые при номинальном нагреве трансформатора.

4. Максимальную габаритную мощность P_1 .

5. Вес трансформатора и его удельное значение \mathcal{E}_g на единицу габаритной мощности.

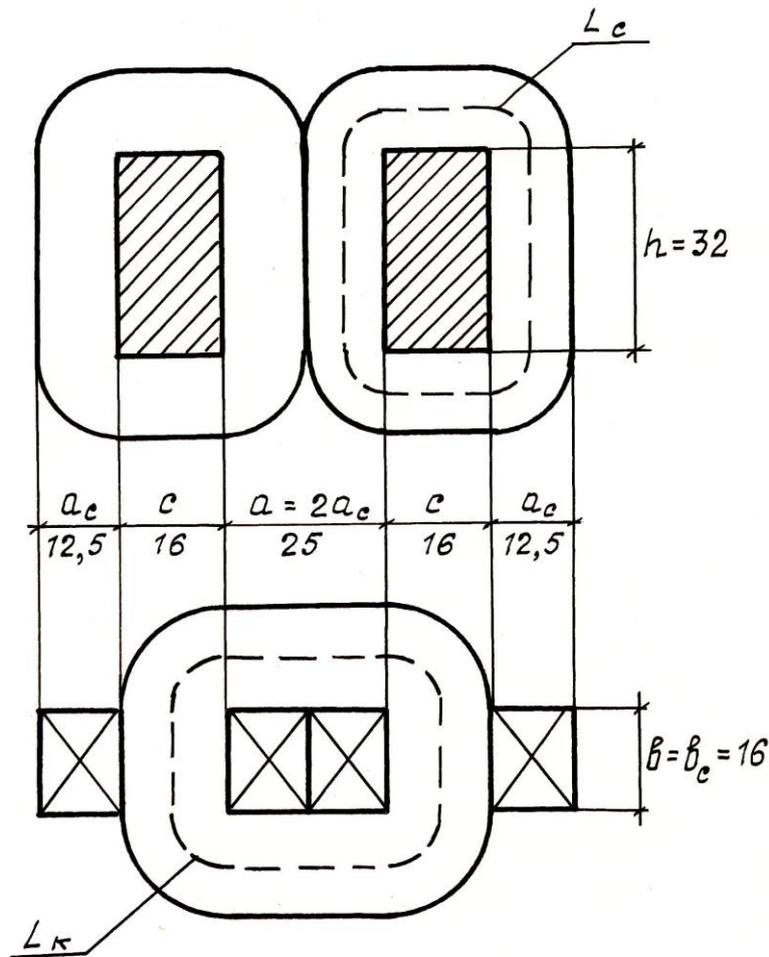


Рис. 5.1 Эскиз трансформатора броневое типа с полным заполнением окна

Решение.

1. Геометрические показатели трансформатора.

Рассчитываются по рис. 2 для броневой конструкции. Здесь выдержаны соотношения размеров, согласно данным задачи: $c/a = x = 1,3$, $b/a = y = 1,3$, $h/a = z = 2,6$. Магнитопровод выпол-

няется из 2-х составляющих частей с размерами по сечению a_c , b_c . Для стандартных обозначений размеров имеем $a = 2a_c$, $b = b_c$.

Средняя длина сердечника магнитопровода (табл. 2.1 методического пособия):

$$L_c = 2 \left(c + h + \frac{\pi a_c}{2} \right) = 2(16 + 32 + \pi \cdot 12,5/2) = 135 \text{ мм} = 0,135 \text{ м}.$$

Сечение магнитопровода:

$$S_c = 2a_c \cdot b = 2 \cdot 12,5 \cdot 16 = 400 \text{ мм}^2 = 0,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2.$$

Сечение окна магнитопровода:

$$S_{ок} = h \cdot c = 32 \cdot 16 = 512 \text{ мм}^2 = 0,512 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2.$$

Объем магнитопровода

$$V_c = S_c \cdot L_c = 0,4 \cdot 10^{-3} \cdot 0,135 = 5,4 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3.$$

Объем катушки:

$$V_k = c_k \cdot h_k \cdot L_k = c \cdot h \cdot L_k = 0,016 \cdot 0,032 \cdot 0,107 = 5,48 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3.$$

Здесь $c_k = c$, $h_k = h$, поскольку заполнение окна — полное.

Поверхность охлаждения магнитопровода (табл. 2.1):

$$\begin{aligned} \Pi_{ос ПЗ} &= (2a_c + b) \cdot (L_c - h) \cdot 2 = \\ &= (2 \cdot 0,0125 + 0,016)(0,135 - 0,032) \cdot 2 = 8,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2. \end{aligned}$$

Поверхность охлаждения катушки (табл. 2.1):

$$\begin{aligned} \Pi_{ок ПЗ} &= (2c_k + h_k)(L_k - 2b) = (2c + h)(L_k - 2b) = \\ &= (2 \cdot 0,0016 + 0,032)(0,107 - 2 \cdot 0,016) = 4,8 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2. \end{aligned}$$

Примечание: при *неполном* заполнении окна, но охлаждении естественном, следует брать эту же формулу. То есть $\Pi_{\text{ок ПЗ}}$, но не $\Pi_{\text{ок НЗ}}$.

2. Расчет допустимых потерь мощности.

Потери мощности в катушках

$$\Delta P_{\kappa} = \tau \cdot \sigma \cdot \Pi_{\text{ок}} \cdot \frac{B}{1 + \nu},$$

где
$$B = 1 + \beta \sqrt{\frac{\nu + 0,6}{1 + 0,2\beta \cdot \nu}}, \quad \beta = \frac{\Pi_{\text{ос}}}{\Pi_{\text{ок}}}, \quad \nu = 1.$$

Получаем,
$$\beta = \frac{8,4 \cdot 10^{-3}}{4,8 \cdot 10^{-3}} = 1,75,$$

$$B = 1 + 1,75 \sqrt{\frac{1 + 0,6}{1 + 0,2 \cdot 1,75 \cdot 1}} = 1 + 1,75 \cdot 1,09 = 2,9$$

$$\Delta P_{\kappa} = 50 \cdot 10 \cdot 4,8 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{2,9}{1 + 1} = 3,48 \text{ Вт.}$$

Потери мощности в магнитопроводе

$$\Delta P_c = \Delta P_{\kappa} \cdot \nu = 3,48 \cdot 1 = 3,48 \text{ Вт.}$$

Принимаем $\Delta P_c = \Delta P_{\kappa} \approx 3,5 \text{ Вт.}$

3. Значение допустимой индукции:

$$B_p = B_0 \sqrt{\frac{\Delta P_c}{G_c \cdot \rho_{\text{св}} \cdot \kappa_p \cdot \left(\frac{f_1}{f_{10}}\right)^{\gamma}}}.$$

Определяем сначала вес магнитопровода:

$$G_c = V_c \cdot \kappa_{\text{зс}} \cdot g_c = 5,4 \cdot 10^{-5} \cdot 0,75 \cdot 8,2 \cdot 10^3 = 0,332 \text{ кг.}$$

Здесь взято $g_c = 8,2 \text{ г/см}^3 = 8,2 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3.$

Теперь находим индукцию:

$$B_p = 0,5 \cdot \sqrt{\frac{3,5}{0,332 \cdot 12 \cdot 1,8 \cdot (5/2,5)^{1,2}}} = 0,5 \cdot \sqrt{0,212} = 0,23 \text{ Тл.}$$

Рабочая индукция меньше индукции насыщения $B_s = 1$ Тл, поэтому дальше она не корректируется.

4. Плотность тока обмоток

$$j = \sqrt{\frac{\Delta P_k}{V_k \cdot \kappa_{3k} \cdot \rho_k}} = \sqrt{\frac{3,5}{5,48 \cdot 10^{-5} \cdot 0,35 \cdot 2,1 \cdot 10^{-8}}} = 2,3 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2 = \\ = 2,95 \text{ А/мм}^2.$$

5. Максимальная габаритная мощность

$$P_1 = 4 \cdot \kappa_\phi \cdot n_0 \cdot \kappa_{ок} \cdot \kappa_{3с} \cdot S_{ок} \cdot S_c \cdot B \cdot f_1 \cdot j = \\ = 4 \cdot 1,11 \cdot 0,5 \cdot 0,35 \cdot 0,75 \cdot 0,512 \cdot 10^{-3} \cdot 0,4 \cdot 10^{-3} \cdot 0,23 \cdot 5000 \cdot 2,95 \cdot 10^6 = \\ = 405 \text{ ВА.}$$

6. Весовые показатели.

Масса обмоток:

$$G_k = V_k \cdot \kappa_{3k} \cdot g_k = 5,48 \cdot 10^{-5} \cdot 0,35 \cdot 8,8 \cdot 10^3 = 0,17 \text{ кг.}$$

Масса магнитопровода найдена ранее в п.3:

$$G_c = 0,332 \text{ кг.}$$

Общий вес трансформатора:

$$G = G_k + G_c = 0,17 + 0,332 \approx 0,5 \text{ кг.}$$

Удельный вес на единицу мощности

$$\mathcal{E}_g = \frac{G}{P_1} = \frac{500 \text{ г}}{405 \text{ ВА}} = 1,23 \text{ г/ВА.}$$

6 КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА № 2 (КР2)

6.1 Как формируется содержание

В отличие от индивидуальных заданий, где студенты многие параметры выбирают сами, КР2, как и КР1, имеет законченный вид и выдается на аудиторных практических занятиях преподавателем. Студенту надлежит лишь выполнить контрольную за 2 академических часа.

Пример содержания и выполнения КР2 дан в разделе 6.3. Для преподавателей, составляющих тексты КР2, необходимые параметры приведены в табл. 6.1. Эти параметры не являются единственными, при необходимости их можно корректировать (преподавателю).

6.2 Рейтинг КР2

1. Исходные данные, схема замещения — 2 б.
 2. Расчет электрических величин — 2 б.
 3. Расчет резонансных частот — 2 б.
 4. Расчет КПД — 1 б.
 5. Расчет коэффициента мощности — 2 б.
 6. Расчет длительностей переходных процессов — 1 б.
- Всего — 10 баллов.

Таблица 6.1 — Параметры для вариантов КР2

№№ вар.	X_S	R_1	R_2	X_μ	R_μ	C_Π	K_T	U_1	f_1	I_{2H}	$\cos\varphi_H$
	Ом	Ом	Ом	кОм	кОм	пФ	–	В	кГц	А	–
1	20	5	0,05	1,5	0,5	400	8	220	5	12	0,85
2	15	2	0,4	1,2	0,4	250	5	220	2	8	0,8
3	12	2	0,2	2,5	0,4	160	4	220	1,2	4	0,9
4	6	2	0,25	2	0,6	200	2	220	0,5	2	0,7

Окончание табл. 6.1

№№ вар.	X_S	R_1	R_2	X_μ	R_μ	C_Π	K_T	U_1	f_1	I_{2H}	$\cos\varphi_H$
	Ом	Ом	Ом	кОм	кОм	пФ	–	В	кГц	А	–
5	2,5	0,4	0,1	1,4	0,4	500	2	127	1	20	0,7
6	2,5	0,4	0,03	1,5	0,4	250	4	127	0,5	40	0,8
7	2,5	0,4	0,01	1,8	0,5	250	8	127	0,05	80	0,9
8	4	1	0,25	0,8	0,2	500	2	380	5	10	0,7
9	4	1	0,25	0,8	0,2	500	2	380	2,5	10	0,7
10	8	2	0,25	1,5	0,4	250	4	380	1	10	0,8
11	4	1	0,25	0,9	0,2	250	2	380	0,5	10	0,9
12	1	0,25	0,02	0,2	0,05	350	4	100	10	20	0,7
13	1	0,25	0,06	0,2	0,05	250	2	100	5	10	0,8
14	1	0,25	0,25	0,2	0,05	200	1	100	1	5	0,9
15	0,2	0,05	5	0,025	0,01	800	0,1	25	1	10	0,6
16	0,05	0,02	0,6	0,05	0,02	600	0,2	25	0,5	5	0,7
17	0,2	0,05	1,4	0,05	0,02	400	0,2	25	0,05	2	0,8
18	0,05	0,01	0,25	0,01	0,05	300	0,2	50	10	20	0,7
19	0,05	0,01	1	0,01	0,05	250	0,1	50	5	10	0,8
20	0,05	0,01	4	0,01	0,05	500	0,05	50	1	5	0,9
21	0,5	0,1	0,05	0,02	0,01	400	2	110	0,5	20	0,85
22	0,8	0,1	0,05	0,04	0,01	500	2	110	0,5	20	0,8
23	0,8	0,1	0,05	0,03	0,01	500	2	110	1	20	0,8
24	1	0,1	0,04	0,04	0,01	400	2	110	1	20	0,85
25	1	0,2	0,1	0,04	0,05	500	2	110	1	15	0,8

6.3 Пример выполнения КР2 по варианту 3

Для этого варианта из табл. 6.1 схема замещения трансформатора (рис. 6.1) имеет параметры:

- суммарное индуктивное сопротивление рассеяния $X_S = 12$ [Ом],
- активное сопротивление первичной обмотки $R_1 = 2$ Ом,
- активное сопротивление вторичной обмотки $R_2 = 0,2$ Ом,
- сопротивление току намагничивания $X_\mu = 2500$ [Ом],
- активное сопротивление от потерь в стали $R_\mu = 400$ [Ом],
- проходная емкость $C_\pi = 160$ пФ,
- коэффициент трансформации $k_T = 4$,
- напряжение питающей сети $U_1 = 220$ В,
- частота первичного напряжения $f_1 = 1200$ Гц,
- номинальный ток нагрузки $I_{2н} = 4$ А,
- коэффициент мощности нагрузки $\cos \varphi_n = 0,9$.

Определить:

- токи холостого хода I_{10} и короткого замыкания $I_{1к}$,
- выходное напряжение U_2 при номинальном токе $I_{2н}$,
- резонансные частоты на холостом ходу $f_{рх}$ и под нагрузкой $f_{рн}$,
- коэффициент полезного действия η и коэффициент мощности схемы замещения $\cos \varphi$ при номинальном токе нагрузки,
- длительности переходных процессов при включениях трансформатора на холостом ходу и под нагрузкой.

Решение.

Расчеты ведутся согласно схеме замещения трансформатора на рис. 6.1, по формулам из раздела 10.2 учебного пособия [1].

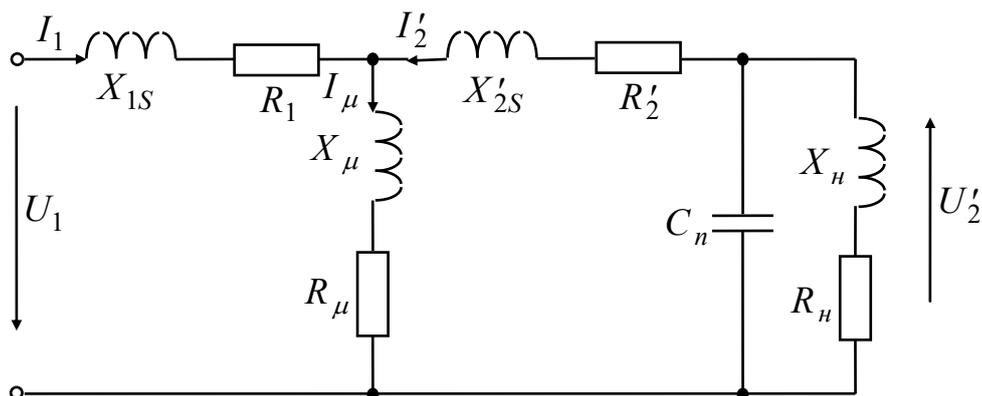


Рис. 6.1 Схема замещения трансформатора

1. Определение токов холостого хода I_{10} и короткого замыкания $I_{1к}$.

$$I_{10} = \frac{U_1}{Z_{xx}} \approx \frac{U_1}{\sqrt{x_\mu^2 + R_\mu^2}} = \frac{220}{\sqrt{2500^2 + 400^2}} = 0,09 \text{ А.}$$

$$I_{1к} = \frac{U_1}{Z_{кз}} \approx \frac{U_1}{\sqrt{x_s^2 + (R_1 + R'_2)^2}} = \frac{U_1}{\sqrt{x_s^2 + (R_1 + R_2 \kappa_T^2)^2}} =$$

$$= \frac{220}{\sqrt{12^2 + (2 + 0,2 \cdot 4^2)^2}} = \frac{220}{13,08} = 16,82 \text{ А.}$$

2. Вторичное напряжение при номинальном токе нагрузки:

$$U_{2н} = \frac{1}{\kappa_T} \left(U_1 - Z_{кз} \frac{I_{2н}}{\kappa_T} \right) = \frac{1}{4} \left(220 - 13,08 \cdot \frac{4}{4} \right) = 54,18 \approx 54 \text{ В.}$$

3. Резонансные частоты трансформатора.

Резонансная частота на холостом ходу:

$$f_{px} = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L_\mu \cdot C_\Pi}},$$

$$\text{где } L_\mu = \frac{X_\mu}{2\pi f_1} = \frac{2500}{2\pi \cdot 1200} = 0,33 \text{ Гн.}$$

Получаем:

$$f_{\text{рх}} = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{0,33 \cdot 160 \cdot 10^{-12}}} = 2,19 \cdot 10^4 \text{ Гц} \approx 22 \text{ кГц.}$$

Здесь $C_{\text{п}} = 160 \text{ пФ} = 160 \cdot 10^{-12} \text{ Ф}$.

Резонансная частота под нагрузкой:

$$f_{\text{рн}} = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_{\text{кз}} \cdot C_{\text{п}}}},$$

$$\text{где } L_{\text{кз}} = \frac{X_S}{2\pi f_1} = \frac{12}{2\pi \cdot 1200} = 1,6 \cdot 10^{-3} \text{ Гн.}$$

Получаем:

$$f_{\text{рн}} = \frac{1}{2\pi \sqrt{1,6 \cdot 10^{-3} \cdot 160 \cdot 10^{-12}}} = 3,15 \cdot 10^5 \text{ Гц.}$$

Резонансные частоты для трансформатора не опасны, так как в десятки раз превышают рабочую частоту $f_1 = 1,2 \text{ кГц}$:

$$f_{\text{рх}}/f_1 = \frac{22}{1,2} = 18,3 ; \quad f_{\text{рн}}/f_1 = \frac{315}{1,2} = 263.$$

4. Коэффициент полезного действия схемы замещения при номинальной нагрузке:

$$\eta = \frac{(I'_{2\text{H}})^2 \cdot R'_{\text{H}}}{(I'_{2\text{H}})^2 R'_{\text{H}} + (I'_{2\text{H}})^2 (R_1 + R_2)} = \frac{R'_{\text{H}}}{R'_{\text{H}} + R_1 + R_2}.$$

Здесь

$$R'_{\text{H}} = R_{\text{H}} \cdot \kappa_{\text{T}}^2, \quad R_{\text{H}} = \frac{U_{2\text{H}}}{I_{2\text{H}}} \cdot \cos \varphi ;$$

$$R'_{\text{H}} = \frac{52}{4} \cdot 0,9 \cdot 4^2 = 187,2 \text{ Ом.}$$

Получаем:

$$\eta = \frac{187,2}{187,2 + 2 + 0,2 \cdot 4^2} \approx 0,973 \approx 97\%.$$

5. Коэффициент мощности схемы замещения при номинальной нагрузке $\cos \varphi$:

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{X_S + X'_H}{R_1 + R'_2 + R'_H},$$

где

$$\begin{aligned} X'_H &= Z'_H \cdot \sin \varphi_H = Z'_H \cdot \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_H} = \frac{U_{2H} \cdot K_T^2}{I_{2H}} \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_H} = \\ &= \frac{52 \cdot 4^2}{4} \cdot \sqrt{1 - 0,9^2} = 208 \cdot 0,436 = 90,7 \text{ Ом.} \end{aligned}$$

Получаем:

$$\begin{aligned} \varphi &= \operatorname{arctg} \frac{12 + 90,7}{2 + 3,2 + 187,2} = 28^\circ, \\ \cos \varphi &= \cos 28^\circ = 0,882. \end{aligned}$$

6. Длительности переходных процессов при включениях трансформатора на холостом ходу и под нагрузкой. Определяется, примерно, четырьмя значениями постоянных времени

$$\begin{aligned} t_{пх} &= 4T_x, \\ t_{пн} &= 4T_H, \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} T_x &= \frac{L_\mu}{R_\mu} = 0,825 \text{ мс}, \\ T_H &= \frac{X_S + X'_H}{R_1 + R'_2 + R'_H} \cdot \frac{1}{2\pi f_1} = \frac{12 + 90,7}{2 + 3,2 + 187,2} \cdot \frac{1}{2\pi \cdot 1200} = 0,07 \text{ мс.} \end{aligned}$$

Время переходного процесса включения без нагрузки:

$$t_{пх} = 4T_x = 4 \cdot 0,825 = 3,3 \text{ мс.}$$

Это составит $t_{\text{нх}} / (T = 1/f_1) = t_{\text{нх}} \cdot f_1 = 3,3 \cdot 10^{-3} \cdot 1,2 \cdot 10^3 \approx 4$, то есть 4 периода рабочей частоты.

Время переходного процесса включения под нагрузкой:

$$t_{\text{нн}} = 4T_{\text{н}} = 4 \cdot 0,07 = 0,28 \text{ мс,}$$

в 3,6 раз меньше времени переходного процесса на холостом ходу.

7 ВОПРОСЫ ДЛЯ ПРОВЕРКИ ЗНАНИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ ПРИ ИЗУЧЕНИИ ДИСЦИПЛИНЫ МЭЭУ

1. Назвать 4 основных типоразмеров МЭ ЭУ, их отличительные свойства.
2. Нарисовать по памяти одну из типовых конструкций МЭ ЭУ.
3. Показать (нарисовать) сечение магнитопровода МЭ, выполненного на 2-х типовых сердечниках (броневое, стержневое или тороидальное исполнений).
4. Почему есть МЭ с неполным заполнением окна, когда применение их является целесообразным?
5. Почему при естественном охлаждении формула для поверхности охлаждения катушек берется для случая полного заполнения окна, хотя оно неполное?
6. Как определить объем магнитопровода и катушек?
7. Составить и записать выражения для L_c и L_δ у одной из типовых конструкций МЭ, указанных преподавателем.
8. От каких величин и параметров зависит входная мощность МЭ? (3.1).
9. Какие величины определяют потери мощности в сердечниках магнитопровода? (3.4).
10. Какими величинами определяется плотность тока в обмотках? (3.5).
11. Формула закона электромагнитной индукции, пояснить её составляющие. (4.1).
12. Формула закона полного тока, пояснить её составляющие. (4.2).
13. Кривая намагничивания. Нарисовать и пояснить её свойства (рис. 6.1, б).
14. Разновидность МЭ по их функциональному назначению (назвать основные).
15. Чем отличается дроссель от дросселя насыщения?
16. Чем отличается магнитный усилитель от дросселя насыщения?

17. Схема замещения трансформатора и состав её параметров (рис. 10.3).

18. Чем отличается трансформатор напряжения от трансформатора тока?

19. Как найти коэффициент трансформации трансформатора напряжения?

20. Как определить КПД и коэффициент мощности трансформатора напряжения? (11.39), (11.40).

21. Как проверить правильность заполнения окна магнитопровода обмотками?

22. Какие параметры определяют допустимые потери мощности в обмотках МЭ? (3.2).

23. Какие параметры определяют допустимые потери мощности в магнитопроводе? (3.4).

24. Принцип действия трансформатора напряжения.

25. Охарактеризовать 4 типа ферроматериалов для магнитопроводов МЭ, их показатели для B_s , f_1 , Δ_c и др.

26. Какие параметры определяют рабочую индукцию МЭ? (3.6).

27. Какие параметры определяют плотность тока в обмотках? (3.5).

28. Как определить ток намагничивания трансформатора напряжения?

29. Как определить ток короткого замыкания трансформатора напряжения?

30. Отличительные свойства ферритов, когда они применяются?

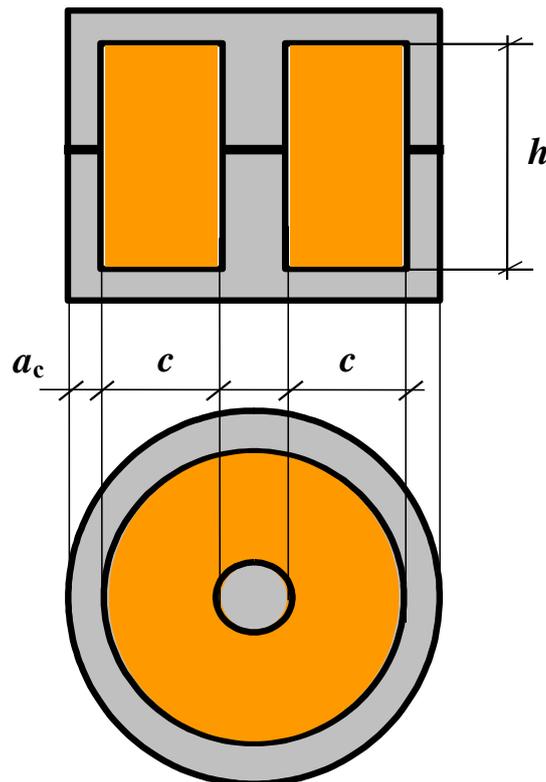
31. От чего зависит индуктивность обмоток? От потоков рассеяния? Как её уменьшить?

32. Что является центральным для установления номинальных значений токов и напряжений обмоток МЭ?

Примечание: в скобках после вопросов стоят номера формул и рисунков учебного пособия [1], которые можно использовать для ответов.

8 ПРИМЕРЫ ТЕСТОВЫХ ВОПРОСОВ ДЛЯ ПРОВЕРКИ ЗНАНИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ ПРИ ИЗУЧЕНИИ ДИСЦИПЛИНЫ МЭЭУ

1 Конструкция магнитного элемента какого типа изображена на рисунке?

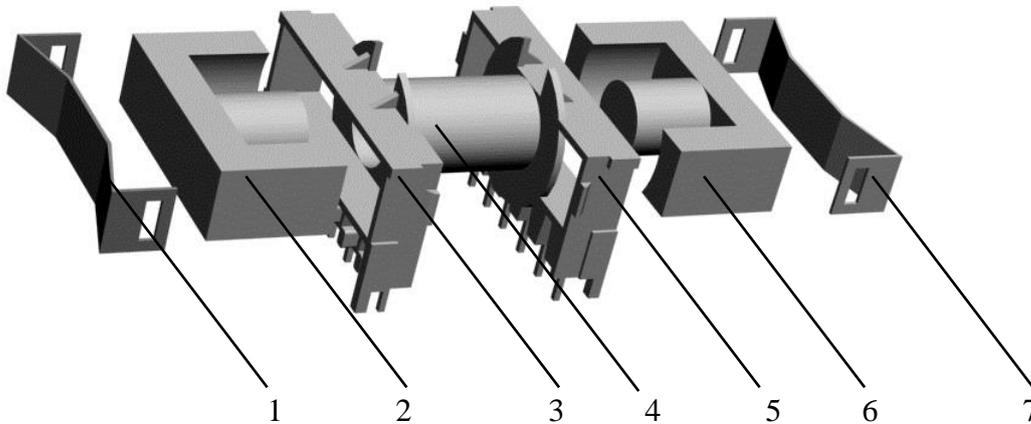


- броневая
- стержневая
- тороидальная
- чашечная

2 Имеется 2 сердечника О-образного типа. Магнитный элемент какого конструктивного исполнения может быть реализован на данных сердечниках?

- броневой;
- стержневой;
- броневой и стержневой;
- тороидальный;

3 Как (какими цифрами) обозначен сердечник магнитного элемента на рисунке?



- 1 и 7;
- 2 и 6;
- 3 и 5;
- 4;

4 Дан однофазный двухобмоточный трансформатор. Напряжение первичной обмотки трансформатора 220 В, напряжение вторичной обмотки 22 В, число витков первичной обмотки 2200. Какое число витков имеет вторичная обмотка трансформатора?

- 22000
- 2200
- 220
- 22

5 Индуктивность дросселя равна 1 мГн, частота рабочего напряжения равна 1000 Гц. Чему равно индуктивное сопротивление дросселя?

- 0,628 Ом
- 1 Ом
- 3,14 Ом
- 6,28 Ом

6 Схема замещения трансформатора имеет параметры:

активные сопротивления:

первичной обмотки – 1 Ом,

вторичной обмотки – 0,04 Ом,

реактивное сопротивление намагничивания - 250 Ом,

активное сопротивление от потерь в стали - 50 Ом,

сопротивление короткого замыкания – 4 Ом,

коэффициент трансформации - 5,

напряжение питающей сети - 220 В,

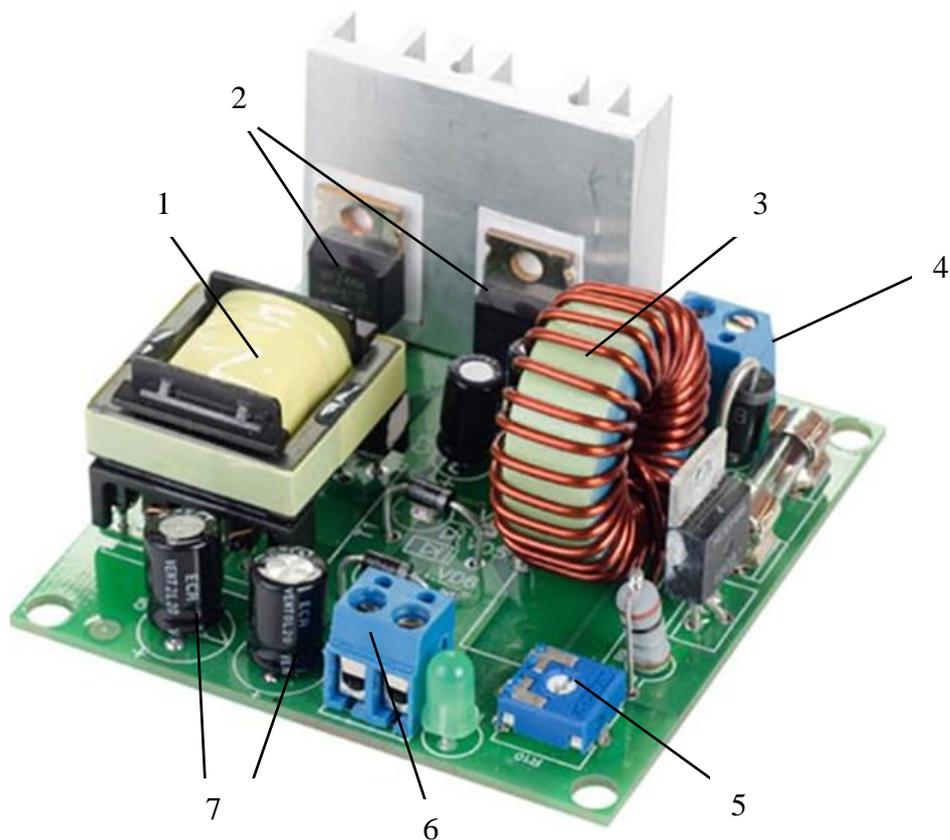
частота - 50 Гц.

Чему равен ток короткого замыкания?

- 220 А
- 110 А
- 55 А
- 4,4

7 Какие из имеющихся на плате элементов являются магнитными элементами?

- 1 и 2;
- 1 и 3
- 7;
- 4, 5, 6;

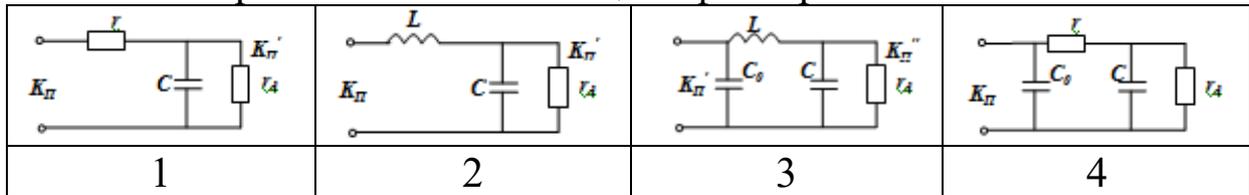


18 На каком рисунке изображено условное графическое обозначение на схеме электрической принципиальной трехфазного трансформатора «звезда – звезда» с выведенной нулевой точкой обмотки низшего напряжения?

Рис. 1	Рис. 2	Рис. 3	Рис. 4

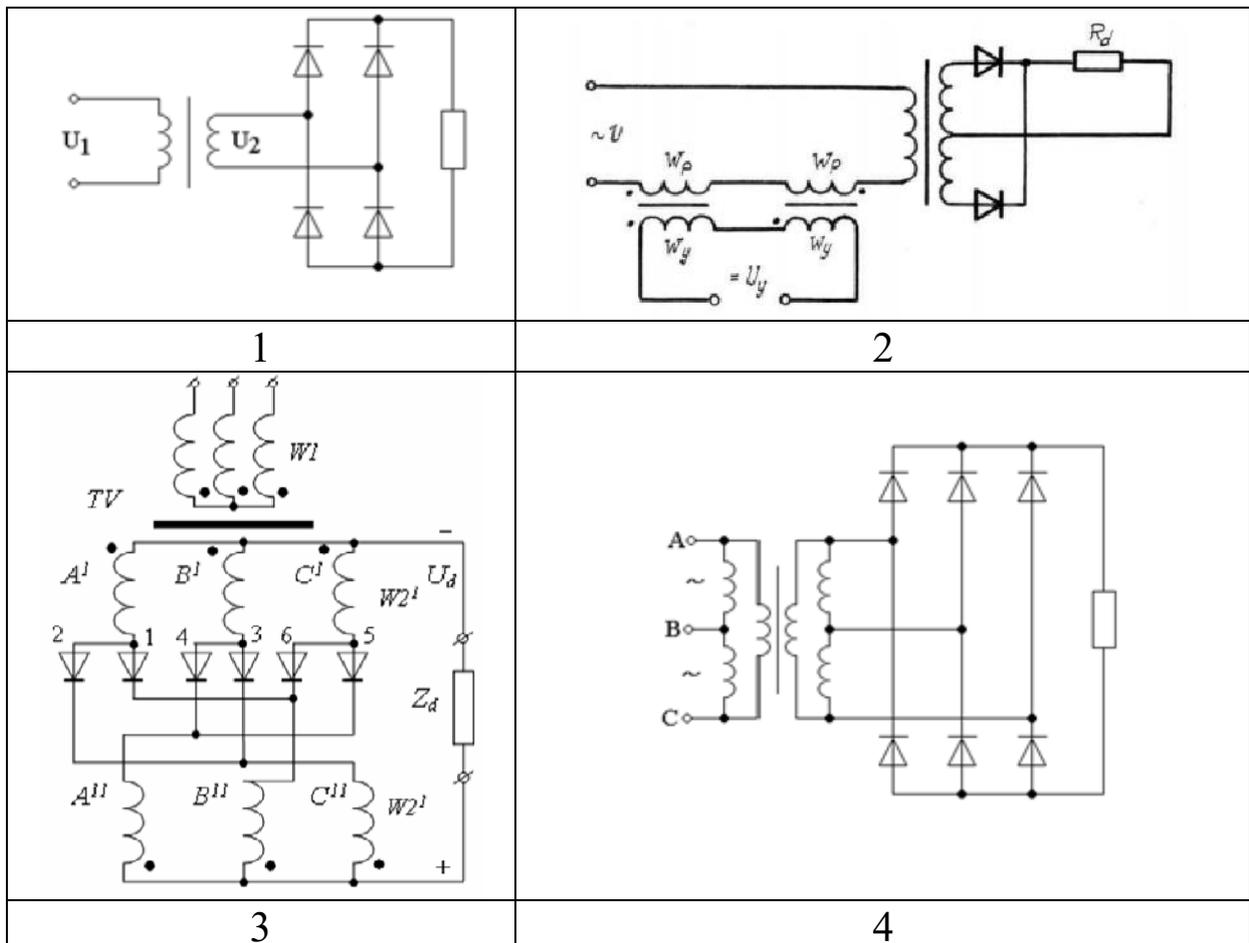
- 1
- 2
- 3
- 4

9 На каком рисунке изображена схема электрическая принципиальная Г-образного сглаживающего фильтра?



- 1
- 2
- 3
- 4

10 На каком рисунке в составе схемы имеется дроссель насыщения?



- 1
- 2
- 3
- 4

11 В чем преимущество источника вторичного электропитания тока со звеном повышенной частоты по сравнению с источником вторичного электропитания без звена повышенной частоты?

- Меньший объем
- Меньшая мощность
- меньшие объем и масса
- Большое количество входящих в их состав перспективных устройств силовой электроники

12 Что такое «Гаммамет»?

- Название предприятия, являющегося производителем современных магнитных материалов, магнитопроводов, трансформаторов, реакторов и электротехнических изделий из этих материалов
- Торговая марка магнитомягких сплавов и ленты с аморфной и нанокристаллической структурой, изготавливаемых предприятием Гаммамет
- Торговая марка магнитопроводов, изготавливаемых предприятием Гаммамет
- все ответы правильные

13 Какой измерительный прибор позволяет эффективно исследовать форму сигналов, выполняет автоматическое определение их параметров, позволяет сохранять данные измерений и переносить их на компьютер?

- Ваттметр
- Генератор сигналов
- Осциллограф цифровой
- Осциллограф аналоговый

14 Вы проводите экспериментальное исследование. В ходе эксперимента вы выполняете измерение физических величин – тока, напряжения и т.д. Методика эксперимента предполагает выполнение дополнительных расчетов – мощности, коэффициента мощности, коэффициента полезного действия. Также требуется построить графики характеристик. Какой программой вы воспользуетесь для обработки экспериментальных данных и построения графиков?

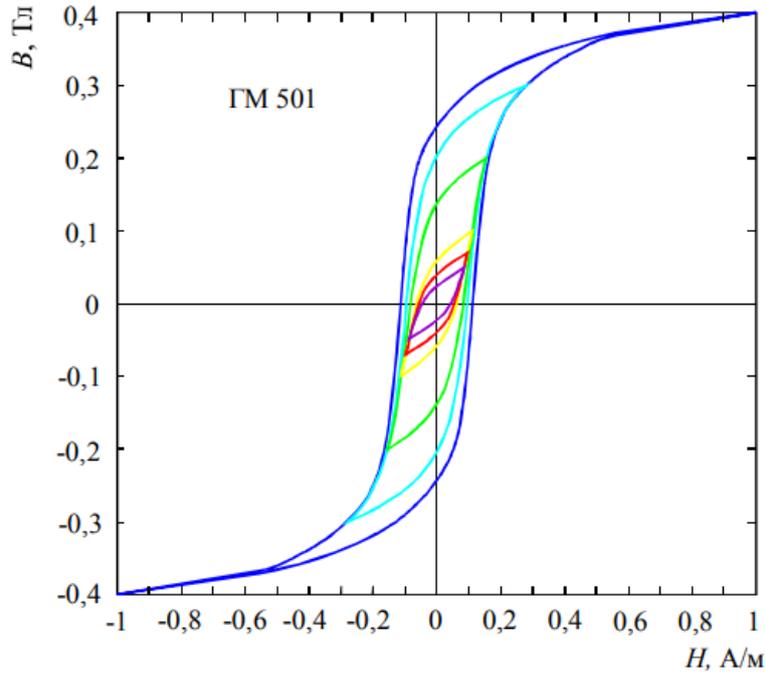
- Mathcad
- Microsoft Word
- LtSpice
- ASIMEC

15 Что из нижеперечисленного относится к недостаткам ферромагнитного материала?

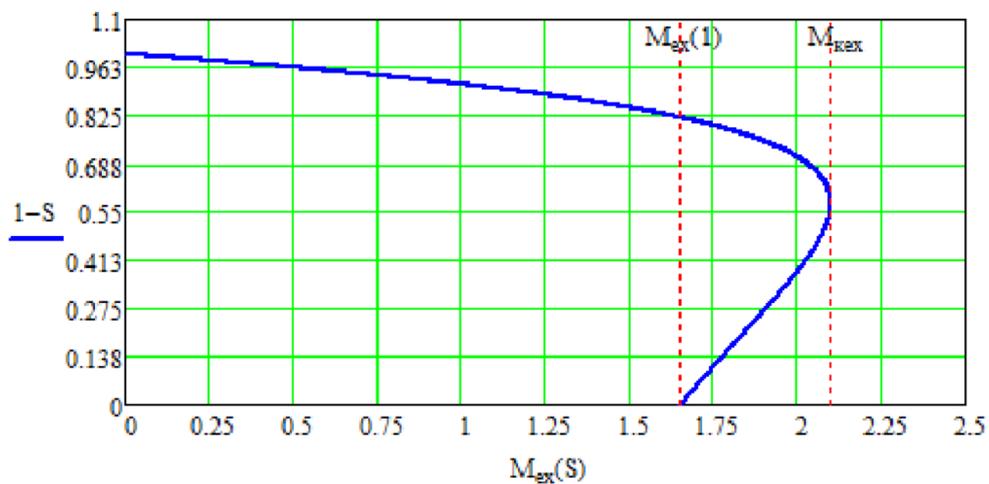
- Большая индукция насыщения
- Большие потери мощности
- Малые потери мощности
- Малая плотность

16 Какие характеристики приведены на рисунке?

- Семейство вольт-амперных характеристик диода
- Семейство входных характеристик транзистора
- Семейство выходных характеристик транзистора
- семейство статических петель гистерезиса ферромагнитного материала



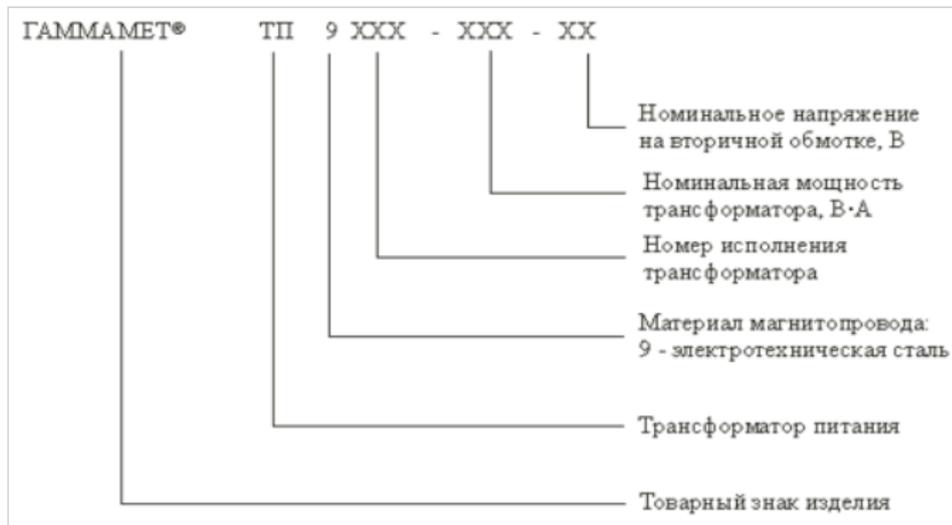
17 Результаты экспериментальных исследований вы представляете в графическом виде и используете для этого программу Mathcad. Какой основной недостаток в представлении результатов расчетов следует устранить?



- Неудачная цена деления по оси ординат
- Синий цвет графика
- Зеленый цвет сетки
- Разная цена деления по осям

18 Вы нашли информацию о трансформаторах, приведенную ниже. Сколько обмоток имеет трансформатор ТП9177?

Условное обозначение трансформаторов ТП 9



Трансформатор	Мощность, кВт	Первичная обмотка, В	Вторичная обмотка, В	Ток во вторичной обмотке*, А	Размеры, мм
ТП9177	0,004	220	7/7/7/2x16/2x16	0,5/0,1/0,1/0,02/0,02/0,02/0,02	50x25
ТП9114	0,01	220	18/18/35+25	0,4/0,03/0,03/0,03	60x35
ТП9131	0,01	220	36	0,3	50x30
ТП9167	0,01	220	27	0,15	50x30
ТП9117	0,012	220	17	0,7	60x45

- 5
- 6
- 7
- 8

19 Какой из магнитных элементов обычно используется для уменьшения величины переменного напряжения при проектировании выпрямителя?

- дроссель;
- Электрический реактор;
- трансформатор;
- делитель частоты;

20 . Какой магнитный элемент имеет модель вида

$$u_L = L di_L/dt?$$

- индуктивность
- трансформатор
- дроссель насыщения
- магнитный усилитель

21 Вам необходимо выполнить исследование электромагнитных процессов в силовом преобразователе в различных режимах. Какое программное средство позволит выполнить широкий спектр исследований и не потребует построения математической модели устройства?

- Mathcad
- Microsoft Word
- LtSpice
- Excel

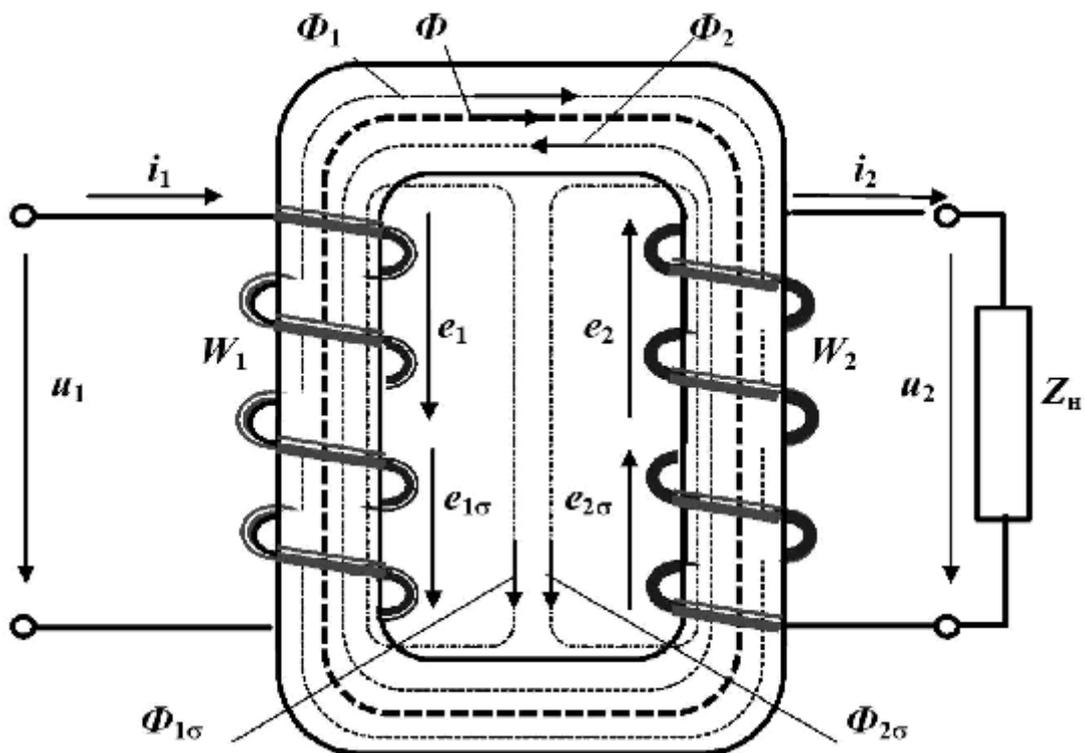
22 Вы выполняете экспериментальное исследование трансформатора, в процессе которого измеряете ток I и напряжение U на нагрузке, в качестве которой используется активное сопротивление. Какую формулу вы будете использовать для расчета активной мощности?

- $P = UI \cos\varphi$, где $\varphi=0$
- $P = UI \sin\varphi$, где $\varphi=0$
- $P = UI \cos\varphi$, где $\varphi=\pi/2$
- $P = UI \cos\varphi$, где $\varphi=-\pi/2$

23 Какие законы электротехники используются при построении моделей магнитных элементов?

- Закон электромагнитной индукции;
- Закон Ома;
- Законы Кирхгофа
- Все ответы правильные

24 В каком из уравнений математической модели трансформатора присутствует ошибка?



Здесь: W_1 , W_2 – число витков; e_1 – ЭДС самоиндукции; e_2 – ЭДС взаимной индукции; R_1 , R_2 – активные сопротивления обмоток.

- $u_1 = e_1 + e_{1\sigma} + i_1 R_1$;
- $u_2 = e_2 + e_{2\sigma} - i_2 R_2$
- $e_1 = -W_1 \frac{d\Phi}{dt}$;
- $e_2 = -W_2 \frac{d\Phi}{dt}$;

25 Какой закон электротехники используется при построении уравнения вторичной обмотки трансформатора

$$u_2 = e_2 + e_{2\sigma} - i_2 R_2?$$

- Закон полного тока;
- 1-й закон Кирхгофа
- 2-й закон Кирхгофа
- Закон Ампера

26 Вы выполнили экспериментальное исследование однофазного двухобмоточного трансформатора при активной нагрузке, измерили ток нагрузки и напряжение на нагрузке. Полученные данные записали в таблицу и рассчитали мощность. Проанализируйте правильность выполнения расчетов. В какой строке таблицы допущена ошибка?

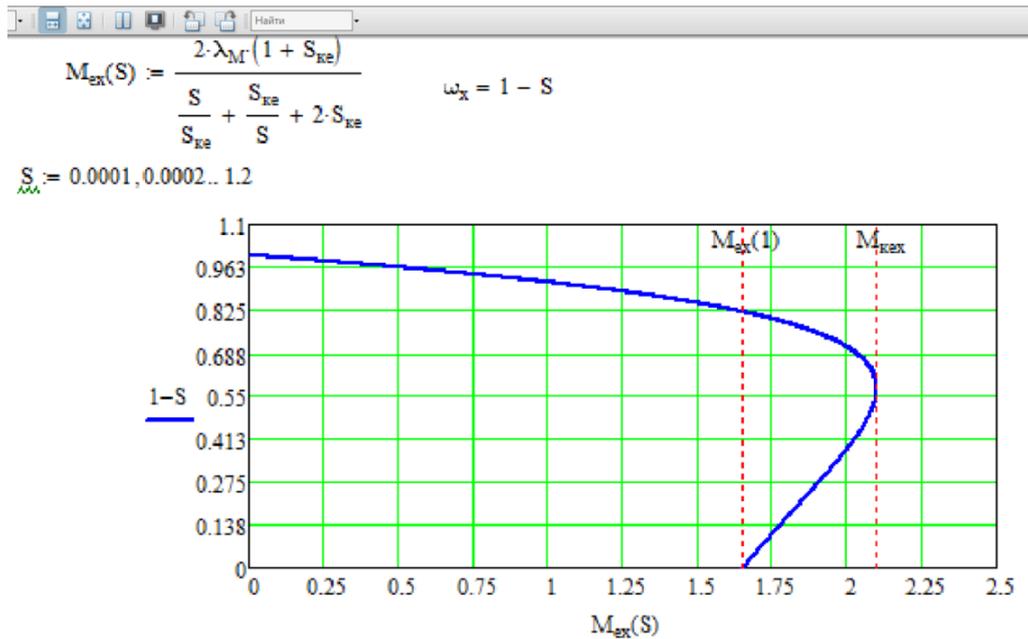
№ п/п	U , В	I , мА	P , Вт
1	30	200	6
2	20	400	8
3	10	600	6
4	1	800	8

- 1
- 2
- 3
- 4

27 Какой закон электротехники используется при получении формулы для коэффициента трансформации трансформатора вида $K_{\tau} = \frac{W_1}{W_2}$? Здесь: W_1 , W_2 – число витков.

- Закон электромагнитной индукции;
- 1-й закон Кирхгофа
- 2-й закон Кирхгофа
- Закон Ампера

28 Результаты расчетов в системе Mathcad вы представляете в виде графика. Какие действия необходимо выполнить, чтобы цена деления по оси ординат стала равна 0,2?



- В строке $S := 0.0001, 0.0002..1.2$ задать шаг изменения параметра S равным $0,2$, т.е. записать: $S := 0.0001, 0.2..1.2$
- Изменить верхний предел на оси ординат на $1,2$ и задать количество линий сетки по оси ординат равным 6
- задать количество линий сетки по оси ординат равным 6
- задать количество линий сетки по оси ординат равным 5

8 УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

Основная литература

1. Обрусник В.П. Магнитные элементы электронных устройств: Учебное методическое пособие. — Томск: ТУСУР, 2006. — 58 с.

2. Легостаев Н.С. Магнитные элементы электронных устройств: учебное пособие / Н. С. Легостаев; Министерство образования и науки Российской Федерации, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) (Томск). - Томск : Эль Контент, 2014. – 186 с.

3. Магнитные элементы электронных устройств [Электронный ресурс] : учебное пособие / Н.С. Легостаев; Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники (Томск).– Томск, 2014.– 186 с.

<https://edu.tusur.ru/training/publications/4272> (Дата обращения 1.11.2023).

Дополнительная литература

4. Легостаев, Н. С. Магнитные элементы электронных устройств: Учебно-методическое пособие [Электронный ресурс] / Н. С. Легостаев. — Томск: ТУСУР, 2019. — 146 с. <https://edu.tusur.ru/publications/9187> (Дата обращения 1.11.2023).

5. Мелешин В.И. Транзисторная преобразовательная техника : монография / В. И. Мелешин. - М. : Техносфера, 2005. - 627 с.

6. Китаев В.Е., Бокуняев А.А., Колканов М.Ф. Расчет источников электропитания устройств связи: Учеб. пособие для вузов. — М: Радио и связь, 1993. — 229 с.

7. Бальян Р.Х., Обрусник В.П. Оптимальное проектирование силовых высокочастотных ферромагнитных устройств. — Томск: Изд-во Томский Госуниверситет. 1987. — 168 с.

8. Горский А.Н. и др. Расчет электромагнитных элементов источников вторичного электропитания. — М.: Радио и связь, 1988. — 178 с.

9. Миловзоров В.П. Электромагнитные устройства автоматики. — М.: Высшая школа. — 408 с.
10. Михайлова М.М., Филиппов В.В., Муслаков В.П. Магнитомягкие ферриты для радиоэлектронной аппаратуры: Справочник. — М.: Радио и связь. — 198 с.
11. Найвельт Г.С. Источники электропитания радиоэлектронной аппаратуры: Справочник. — М.: Радио и связь, 1985. — 575 с.
12. Сидоров И.Н. и др. Малогабаритные трансформаторы и дроссели: Справочник. — М.: Радио и связь, 1985. — 416 с.
13. Сидоров И.Н. и др. Малогабаритные магнитопроводы и сердечники: Справочник. — М.: Радио и связь, 1985. — 416 с.
14. Бамдас А.М., Блинов И.В., Захаров И.В., Шапиро С.В. Ферромагнитные умножители частоты. — М.: Энергия, 1968. — 268 с.
15. Русин Ю.С. Трансформаторы звуковой и ультразвуковой частоты. — М.: Энергия, 1973. — 152 с.
16. Обрусник В.П. Дискретно-управляемые ферромагнитные элементы для преобразования параметров электроэнергии. — М.: Наука, 1978. — 320 с.
17. Моин В.С. Стабилизированные транзисторные преобразователи. — М.: Энергоиздат, 1986. — 376 с.
18. Белопольский И.И., Каретникова Е.И., Пикалова Л.Г. Расчет трансформаторов и дросселей малой мощности. — М.: Энергия, 1973. — 400 с.