

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Цифровые технологии и платформы в электроэнергетике»

Методические указания к практическим занятиям для студентов заочной формы
обучения по дисциплине «Электромеханика»
(задание на выполнение контрольной работы)

Ростов-на-Дону
ДГТУ
2023

УДК 621.31(07)

Трубицина, Н.А.Трубицин М.А.

Методические указания к практическим занятиям для студентов заочной формы обучения по дисциплине «Электромеханика» (задание на выполнение контрольной работы)/ Н.А.Трубицина, М.А. Трубицин; ФГБОУ ВО ДГТУ. – Ростов н/Д, 2023. – 36 с.: 9 ил. – Библиогр.: с. 4.

Приводятся исходные данные необходимые для выполнения контрольной работы и краткие теоретические сведения о маломощных трансформаторах, их конструктивных элементах.

Учебно-методическое пособие предназначено для студентов заочной формы обучения направления 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» направленностей (профилей) «Электроэнергетические системы и сети» и «Автоматизированные электрические распределительные сети»

УДК 621.31(07)

Печатается по решению редакционно-издательского совета Донского государственного технического университета

Научный редактор кандидат техн. наук А.А. Юров

Ответственный за выпуск и.о. зав. кафедрой «Цифровые технологии и платформы в электроэнергетике» кандидат техн. наук А.А. Юров

В печать2023 г.
Формат 60×84/16. Объем____усл. п.л.
Тираж____экз. Заказ № ____

Издательский центр ДГТУ
Адрес университета и полиграфического предприятия:
344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1

© Донской государственный
технический университет, 2023

ВЫБОР ЗАДАНИЯ

Каждый студент выполняет контрольную работу в соответствии с заданием, которое определяется трехзначным шифром, выдаваемым преподавателем.

Исходные данные для расчетов выбираются по табл. 1 в зависимости от индивидуального шифра.

По указанным в таблице данным требуется:

- 1) рассчитать трансформатор малой мощности с воздушным охлаждением;
- 2) выполнить чертеж рассчитанного трансформатора.

На рисунках 1, 2 и 3 представлены различные конструкции магнитопроводов трансформатора, необходимые для выполнения чертежа.

Таблица 1

Исходные данные

Наименование величин	Номера вариантов									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Вариант определяется по третьей цифре шифра										
Напряжение U_2 , В	100	250	300	250	300	250	220	220	300	150
Полная мощность S_2 , ВА	45	50	150	65	140	65	200	100	120	90
Коэффициент мощности $\cos \varphi_2$	0,7	0,65	0,6	0,85	0,8	0,8	0,55	0,75	0,65	0,8
Напряжение U_3 , В	6,3	12	6,3	12	15	36	24	6,3	18	15
Полная мощность S_3 , ВА	50	30	20	80	35	60	60	100	50	100
Коэффициент мощности $\cos \varphi_3$	1,0	1,0	1,0	1,0	0,8	0,7	1,0	1,0	0,9	1,0
Вариант определяется по второй цифре шифра										
Напряжение первичной обмотки U_1 , В	127	220	380	115	380	220	380	220	127	220
Частота тока f , Гц	50	400	50	400	50	400	50	400	400	50
Расчетное условие	М	С	М	М	С	С	М	М	С	М
Вариант определяется по первой цифре шифра										
Температура окружающей среды, °С	35	40	45	30	35	40	45	30	35	40

Примечание. М – минимум массы, С – минимум стоимости.

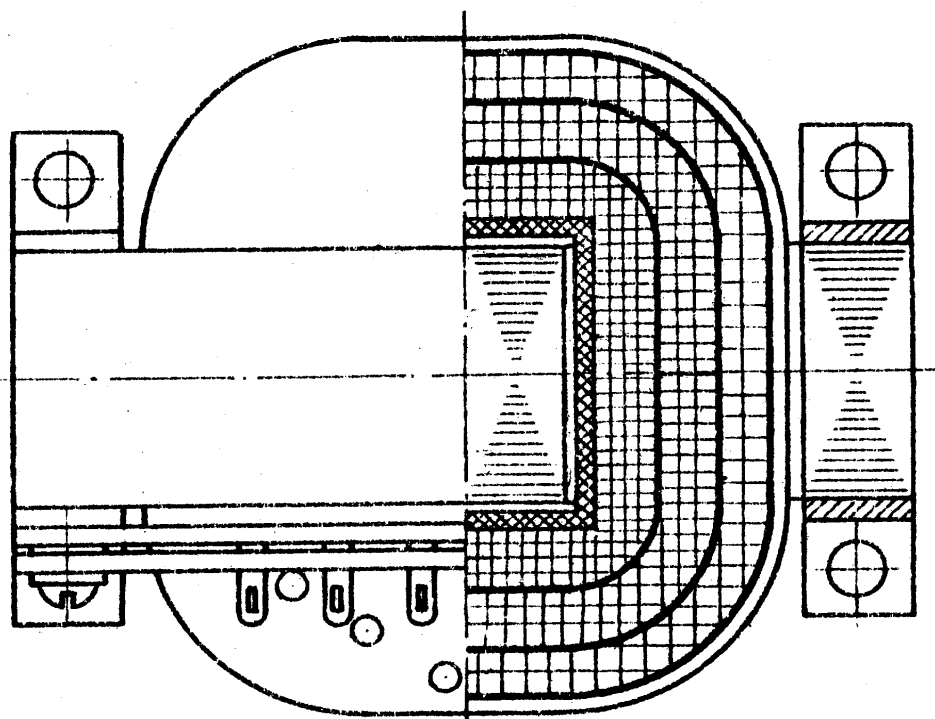
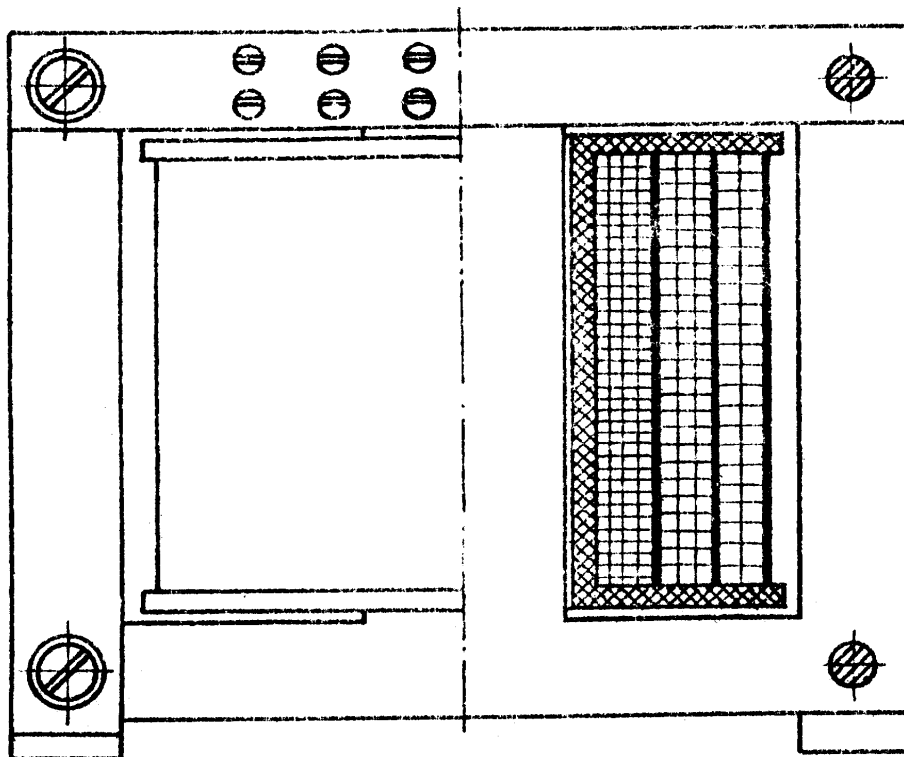


Рис. 1. Броневой пластинчатый трансформатор

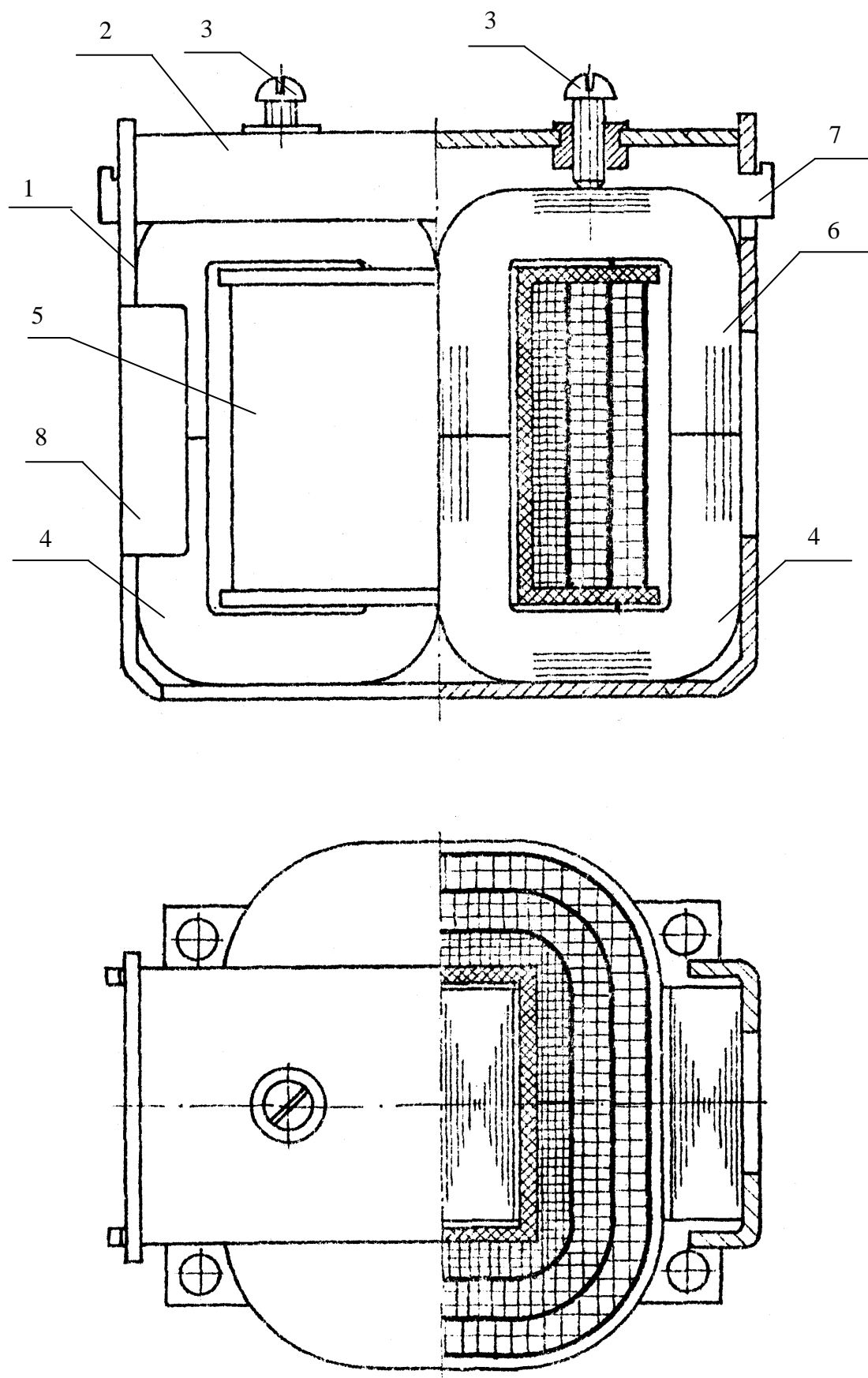


Рис. 2. Броневого ленточный трансформатор

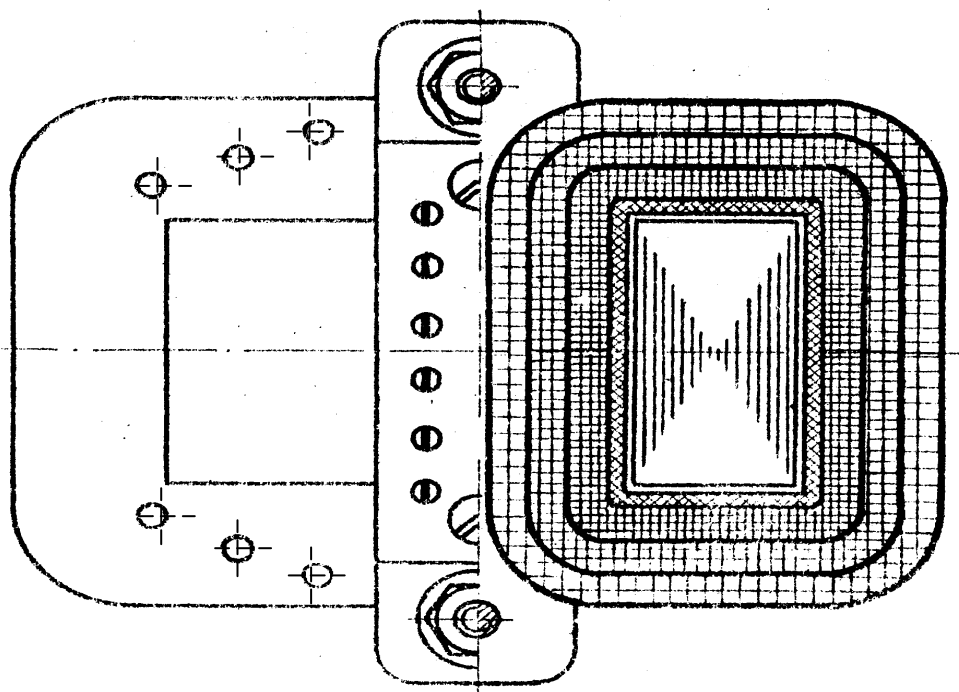
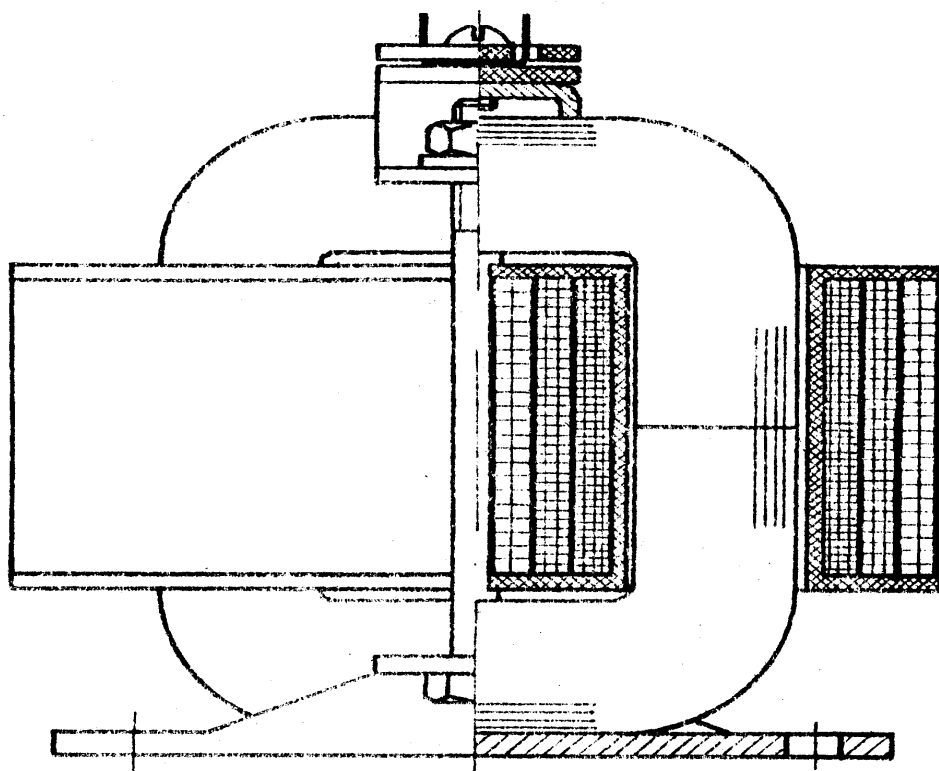


Рис. 3. Стержневой ленточный трансформатор

1 МЕТОДИКА РАСЧЕТА ТРАНСФОРМАТОРА

Методика расчета однофазного трансформатора малой мощности изложена на основе специальной литературы [1, 2].

1.1 Определение расчетной мощности

Для определения расчетной мощности трансформатора можно воспользоваться приближенной формулой

$$S_p \approx S_2 + S_3, \text{ ВА}, \quad (1)$$

где S_2, S_3 – номинальные полные мощности вторичных обмоток, ВА.

При $(S_2 + S_3) \leq 100$ ВА следует уточнить расчетную мощность по формуле

$$S_p \approx 0,5(S_2 + S_3)(1 + 1/\eta), \text{ ВА}, \quad (2)$$

где η – коэффициент полезного действия (КПД) выбирается в соответствии с табл. 2.

Таблица 2

Выбор КПД

Частота, Гц	Величина КПД при расчетной мощности трансформатора, ВА			
	15...50	50...150	150...300	300...1000
50	0,6...0,8	0,8...0,9	0,9...0,93	0,93...0,95
400	0,87	0,87...0,94	0,94...0,96	0,96...0,97

1.2 Выбор конструкции магнитопровода

Выбор конструкции магнитопровода производится в соответствии с величиной расчетной мощности и частотой питающего напряжения.

Для трансформаторов с максимальным напряжением до 1000 В при частотах 50 и 400 Гц можно использовать следующие рекомендации.

При мощностях до 30 ВА рекомендуются пластинчатые броневые трансформаторы, поскольку они технологичнее в изготовлении и проще по конструкции.

При мощностях от 30 до 100 ВА рекомендуется изготавливать также броневые трансформаторы при использовании как пластинчатых, так и ленточных магнитопроводов в зависимости от расчетного условия (С – пластинчатые, М – ленточные).

Для трансформаторов мощностью свыше 100 ВА применяются и броневые и стержневые сердечники. Однако более выгодными являются стержневые трансформаторы с двумя катушками и ленточными разъемными сердечниками, поскольку они имеют большую поверхность охлаждения и меньшую среднюю длину витка по сравнению с броневыми. Окончательное решение о выборе конструкции магнитопровода в данном случае зависит от условия расчета. При минимуме стоимости целесообразен броневой пластинчатый, а при минимуме массы – стержневой ленточный.

1.3 Выбор материала сердечника

Для уменьшения потерь на вихревые токи снижают толщину стали, но ее уменьшение при данной частоте целесообразно только до определенных пределов, после чего рост потерь на гистерезис сводит на нет уменьшение потерь на вихревые токи. Следовательно, для каждой частоты существует своя оптимальная толщина материала.

При выборе стали для сердечника следует учитывать, что при уменьшении толщины листов возрастает стоимость трансформатора, но наряду с этим уменьшаются удельные потери.

Выбор марки стали и ее толщины производится в соответствии с заданной частотой сети и условием расчета (минимум стоимости или минимум массы) в соответствии с табл. 3.

Таблица 3

Выбор толщины и марки стали

f , Гц	Расчетное условие	Марка стали	Толщина, мм
50	Минимум стоимости	1512	0,35
	Минимум массы	3411	0,35
400	Минимум стоимости	1521	0,2
	Минимум массы	3411	0,2

1.4 Выбор предварительных значений максимальной магнитной индукции $B_{\text{макс}}$, плотности тока $j_{\text{ср}}$, коэффициента заполнения окна $k_{\text{ок}}$ и коэффициента заполнения магнитопровода $k_{\text{ст}}$

Приведенные в табл. 4...7 значения указанных величин могут использоваться как рекомендуемые для трансформаторов при величине напряжения на зажимах обмотки, не превышающей 500 В.

Таблица 4

Выбор магнитной индукции

Конструкция магнитопровода	f , Гц	Магнитная индукция $B_{\text{макс}}$, Тл, при S_p , ВА			
		15...50	50...150	150...300	300...1000
Бронева пластинчатая	50	1,3	1,35	1,35	1,3
Бронева ленточная		1,65	1,65	1,65	1,65
Стержневая ленточная		1,6	1,7	1,7	1,7
Бронева пластинчатая	400	1,2	1,2	1,15	1,0
Бронева ленточная		1,4	1,4	1,4	1,3
Стержневая ленточная		1,6	1,5	1,3	1,0

Таблица 5

Выбор плотности тока

Конструкция магнитопровода	f , Гц	Плотность тока j_{cp} , А/мм ² , при S_p , ВА			
		15...50	50...150	150...300	300...1000
Броневая пластинчатая	50	3,0...2,4	2,4...2,0	2,0...1,7	1,7...1,4
Броневая ленточная		3,5...2,7	2,7...2,4	2,4...2,3	2,3...1,8
Стержневая ленточная		5,2...3,8	3,8...3,0	3,0...2,4	2,4...1,7
Броневая пластинчатая	400	5,5...5,0	5,0...4,0	4,0...2,8	2,8...1,6
Броневая ленточная		7,8...6,5	6,5...4,0	4,0...2,7	2,7...1,5
Стержневая ленточная		9,6...5,6	5,6...3,5	3,5...2,8	2,8...1,8

Таблица 6

Выбор коэффициента заполнения окна

Конструкция магнитопровода	f , Гц	Коэффициент заполнения окна $k_{ок}$, при S_p , ВА			
		15...50	50...150	150...300	300...1000
Броневая пластинчатая	50	0,25...0,26	0,26...0,27	0,27...0,30	0,30...0,33
Броневая ленточная		0,23...0,26	0,26...0,27	0,27...0,30	0,30...0,33
Стержневая ленточная		0,21...0,24	0,24...0,25	0,25...0,30	0,30
Броневая пластинчатая	400	0,19...0,23	0,23...0,25	0,25...0,26	0,26...0,30
Броневая ленточная		0,17...0,19	0,19...0,25	0,25...0,26	0,26...0,30
Стержневая ленточная		0,15...0,21	0,21...0,24	0,24	0,24...0,30

Таблица 7

Выбор коэффициента заполнения магнитопровода

Конструкция магнитопровода	Коэффициент заполнения магнитопровода $k_{ст}$, при толщине стали, мм			
	0,1	0,15	0,2	0,35
Пластинчатая	0,7 (0,75)	—	0,85 (0,89)	0,9 (0,94)
Ленточная	—	0,9	0,91	0,93

Примечания: 1) Коэффициенты заполнения для пластинчатых сердечников указаны при изоляции пластин лаком или фосфатной пленкой (в скобках). 2) Коэффициенты заполнения для ленточных сердечников указаны при изготовлении их методом штамповки и гибки ленты.

1.5 Определение токов в обмотках

Активная и реактивная составляющие тока I_1 первичной обмотки

$$I_{1a} = \frac{S_2 \cdot \cos \varphi_2 + S_3 \cdot \cos \varphi_3}{\eta \cdot U_1}, \text{ А}, \quad (3)$$

$$I_{1p} = \frac{S_2 \cdot \sin \varphi_2 + S_3 \cdot \sin \varphi_3}{\eta \cdot U_1} + I_\mu, \text{ А} . \quad (4)$$

Величина тока намагничивания I_μ для маломощного трансформатора предварительно может быть принята в пределах 35...50 % от активной составляющей I_{1a} (величина I_μ уточняется в последующем расчете).

Ток первичной обмотки находится по формуле

$$I_1 = \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1p}^2}, \text{ А}. \quad (5)$$

Токи вторичных обмоток определяются по формулам

$$I_2 = S_2 / U_2, \text{ А}, \quad (6)$$

$$I_3 = S_3 / U_3, \text{ А}. \quad (7)$$

1.6 Определение сечений и диаметров проводов обмоток

Предварительные значения площадей поперечных сечений проводов обмоток рассчитываются по формулам

$$q'_1 = \frac{I_1}{j_{cp}}, \text{ мм}^2; \quad q'_2 = \frac{I_2}{j_{cp}}, \text{ мм}^2; \quad q'_3 = \frac{I_3}{j_{cp}}, \text{ мм}^2, \quad (8)$$

где I_1, I_2, I_3 – токи соответствующих обмоток, А;

j_{cp} – среднее значение плотности тока в обмотках, А/мм²;

q'_1, q'_2, q'_3 – предварительные значения площадей поперечных сечений проводов обмоток, мм².

По таблице стандартных сечений и диаметров проводов (см. прил. 1) выбираются окончательные сечения проводов обмоток q_1, q_2, q_3 , мм², их

диаметры без изоляции d_1, d_2, d_3 , мм², и диаметры с изоляцией d_{1u}, d_{2u}, d_{3u} , мм².

Выбор марки провода определяется величиной рабочего напряжения обмотки.

При напряжении обмоток до 500 В и токах до нескольких ампер рекомендуется применять провода марок ПЭВ-I (допустимая температура нагрева 105 °С), ПЭВТЛ-I (120 °С), ПЭТВ (130 °С), ПСД (155 °С), ПСДК (180 °С).

При выборе провода следует принять рабочую температуру ($\varrho \leq 105$ °С), для которой рекомендуется провод марки ПЭВ-I до диаметров 1...2 мм и марки ПСД для диаметров более 2 мм.

По выбранным сечениям проводов уточняются плотности тока в обмотках:

$$j_1 = \frac{I_1}{q_1}, \text{ А/мм}^2; \quad j_2 = \frac{I_2}{q_2}, \text{ А/мм}^2; \quad j_3 = \frac{I_3}{q_3}, \text{ А/мм}^2. \quad (9)$$

1.7 Определение поперечного сечения стержня сердечника

Поперечное сечение стержня сердечника трансформатора (по стали) $Q_{\text{ст.расч.}}$ можно определить по формуле

$$Q_{\text{ст.расч.}} = C \cdot \sqrt{\frac{S_1 \cdot \alpha \cdot 10^2}{f \cdot B_{\text{макс}} \cdot j_{\text{ср}}}}, \text{ см}^2, \quad (10)$$

где $S_1 = U_1 I_1$ – полная мощность первичной обмотки трансформатора, ВА;

U_1 – напряжение первичной обмотки, В;

I_1 – ток первичной обмотки, А;

α – отношение массы стали $G_{\text{ст}}$ к массе меди $G_{\text{м}}$

(при расчете на минимум стоимости $\alpha = 4...6$,

при расчете на минимум массы трансформатора $\alpha = 2...3$);

f – частота тока, Гц;

$B_{\text{макс}}$ – предварительное значение магнитной индукции в стержне, Тл;

$j_{\text{ср}}$ – плотность тока в обмотках, А/мм²;

C – постоянный коэффициент, который может быть принят:

– для трансформаторов броневого типа $C = 0,7$;

– для трансформаторов стержневого типа с прямоугольными катушками
 $C = 0,6$.

Полное поперечное сечение стержня $Q_{\text{ст.расч.}}$ (с учетом междулистовой изоляции) запишется следующим образом:

$$Q'_{\text{ст.расч.}} = \frac{Q_{\text{ст.расч.}}}{k_{\text{ст.}}}, \text{ см}^2, \quad (11)$$

где $k_{\text{ст.}}$ – коэффициент заполнения сердечника сталью.

1.8 Определение числа витков обмоток трансформатора

Приближенные значения действующих ЭДС в обмотках трансформатора могут быть определены по формулам:

$$E_1 = U_1(1 - \Delta U_1 \% \cdot 10^{-2}), \text{ В}, \quad (12)$$

$$E_2 = U_2(1 + \Delta U_2 \% \cdot 10^{-2}), \text{ В}, \quad (13)$$

$$E_3 = U_3(1 + \Delta U_3 \% \cdot 10^{-2}), \text{ В}, \quad (14)$$

где $\Delta U_i \%$ – падение напряжения в соответствующей обмотке при нагрузке в процентах от его номинального значения.

Величины падения напряжений $\Delta U \%$ зависят от многих факторов: конфигурации магнитопровода, величины рабочего напряжения, суммарной мощности вторичных обмоток, частоты тока сети. Ориентировочно их значения могут быть приняты в соответствии с рекомендациями, приведенными в табл. 8.

Таблица 8

Выбор падения напряжения в обмотке при нагрузке

Частота, Гц	Конструкция магнитопровода	Величина ΔU %	Суммарная полная мощность вторичных обмоток, ВА		
			15...50	50...150	150...300
50	Бронева	ΔU_1 % ΔU_2 % = ΔU_3 %	13,0...6,0 18,0...10,0	6,0...4,5 10,0...8,0	4,5...3,0 8,0...6,0
	Стержневая	ΔU_1 % ΔU_2 % = ΔU_3 %	12,0...5,5 17,0...9,0	5,5...4,0 9,0...6,0	4,0...3,0 6,0...4,0
400	Бронева	ΔU_1 % ΔU_2 % = ΔU_3 %	8,0...4,0 8,5...5,0	4,0...1,5 5,0...2,0	1,5...1,0 2,0...1,2
	Стержневая	ΔU_1 % ΔU_2 % = ΔU_3 %	5,0...2,0 6,5...3,0	2,0...1,0 3,0...1,5	1,0 1,5...1,0

Для трехобмоточных трансформаторов активные и индуктивные сопротивления вторичных обмоток растут по мере их удаления от первичной, поэтому при расположении обмоток на стержне в порядке $W_2 - W_1 - W_3$ можно допустить ΔU_2 % = ΔU_3 % . Если же расположение обмоток будет в порядке $W_1 - W_2 - W_3$, то падение напряжения на второй обмотке следует взять равным $0,9 \Delta U_2$ % , а на третьей обмотке – $1,1 \Delta U_3$ % по отношению к значениям, указанным в табл. 8. При выборе порядка расположения обмоток следует учитывать заданное расчетное условие (минимум массы или минимум стоимости), учитывая при этом, что провод меньшего диаметра имеет большую стоимость. В связи с этим при расчете на минимум стоимости целесообразно обмотку, имеющую наименьший диаметр, располагать первой на стержне, а при расчете на минимум массы первой на стержне следует разместить обмотку, имеющую максимальный диаметр. При выборе расположения обмоток не следует принимать в рассмотрение обмотку, имеющую низкое напряжение, а следовательно, малое число витков, так как такая обмотка не влияет на выполнение заданных расчетных условий.

Определим ЭДС одного витка по формуле

$$E'_e = 4,44 f B_{\text{макс}} \cdot Q_{\text{ст.расч.}} \cdot 10^{-4}, \text{ В}, \quad (15)$$

где f – частота сети, Гц;

$B_{\text{макс}}$ – предварительное значение магнитной индукции в стержне, Тл;

$Q_{\text{ст.расч.}}$ – сечение стержня по стали, см^2 .

Определяем предварительно число витков в обмотках трансформатора:

$$W'_1 = \frac{E_1}{E'_e}; \quad (16)$$

$$W'_2 = \frac{E_2}{E'_e}; \quad (17)$$

$$W'_3 = \frac{E_3}{E'_e}. \quad (18)$$

Если число витков обмотки низшего напряжения W'_3 получилось дробным, то его следует округлить до целого числа W_3 и затем произвести перерасчет чисел витков других обмоток и магнитной индукции по формулам:

$$E_e = E'_e \cdot \frac{W'_3}{W_3}, \text{ В}; \quad B_{\text{с.расч.}} = B_{\text{макс}} \cdot \frac{W'_3}{W_3}, \text{ Тл}; \quad (19)$$

$$W_1 = W'_1 \cdot \frac{W_3}{W'_3}; \quad W_2 = W'_2 \cdot \frac{W_3}{W'_3}. \quad (20)$$

Напряжения на вторичных обмотках при холостом ходе

$$U_{20} = E_e W_2, \text{ В}; \quad U_{30} = E_e W_3, \text{ В}. \quad (21)$$

1.9 Определение площади окна сердечника

Площадь окна сердечника F_0 , необходимая для размещения всех обмоток трансформатора, определяется по формуле

$$F_0 = \frac{q_1 W_1 + q_2 W_2 + q_3 W_3}{100 \cdot k_{\text{ок}}}, \text{ см}^2, \quad (22)$$

где q_1, q_2, q_3 – площади поперечного сечения проводов обмоток трансформатора, мм²;

W_1, W_2, W_3 – соответствующие числа витков обмоток;

$k_{ок}$ – коэффициент заполнения окна сердечника обмоткой (см. табл. 6).

1.10 Выбор сердечника трансформатора

Основные размеры сердечников:

h – высота окна;

c – ширина окна;

a – ширина стержня;

b – толщина пакета.

При выборе сердечника следует учитывать, что форма и размеры его окна оказывают значительное влияние на величину намагничивающего тока, расход стали и меди. Излишняя высота окна сердечника повышает намагничивающий ток и увеличивает расход стали и массу трансформатора, а заниженная – повышает нагрев обмотки.

Размеры выбранного сердечника (как для броневого, так и для стержневого трансформатора) должны удовлетворять следующим основным требованиям:

– площадь поперечного сечения стержня сердечника $Q_{с.вибр.}$ должна быть равна или близка к расчетной, т.е.

$$Q_{с.вибр.} = a \cdot b \cong Q'_{с.расч.}, \quad (23)$$

где $Q'_{с.расч.}$ – полное поперечное сечение стержня, см²;

– площадь окна должна быть достаточной для размещения обмоток, т.е.

$$h \cdot c \geq F_0, \quad (24)$$

где h – высота окна, см;

c – ширина окна, см;

F_0 – площадь окна сердечника, см².

Проектирование ведется из расчета на нестандартный сердечник. Для этого, приняв оптимальные отношения $b/a = 1...2$ и $h/c = 2...3$, определяют размеры магнитопровода:

$$b = \sqrt{Q'_{ст.расч.} (b/a)}, \text{ см}; \quad h = \sqrt{F_0 (h/c)}, \text{ см}; \quad (25)$$

$$a = \frac{b}{(b/a)}, \text{ см}; \quad c = \frac{h}{(h/c)}, \text{ см}. \quad (26)$$

Размеры сердечника округляют до целых чисел (мм) и проверяют выполнение соотношений (19) и (20).

В случае выбора сердечника, у которого $Q_{ст. выбр}$ отличается от $Q_{ст. расч.}$, необходимо заново произвести перерасчет магнитной индукции в стержне B_c по формуле

$$B_c = B_{c.расч} \frac{Q'_{с.расч}}{Q_{с.выбр}}, \text{ см}, \quad (27)$$

и дальнейший расчет трансформатора следует вести на основе новых значений величины магнитной индукции.

1.11 Проверка возможности размещения обмоток в окне сердечника

Для проверки пригодности выбранного ранее сердечника определяется радиальная толщина обмоток трансформатора.

Число витков первичной обмотки в одном слое n_1 составит

$$n_1 = \frac{h - 2h_{уз1}}{d_{1u} \cdot k_{y1}}, \quad (28)$$

где h – высота окна выбранного сердечника, мм;

$h_{уз1}$ – расстояние от обмотки до ярма, мм; обычно $h_{уз1} = 2...5$ мм;

d_{1u} – диаметр провода первичной обмотки с изоляцией, мм;

k_{y1} – коэффициент укладки провода в осевом направлении определяется

по кривой, представленной на рис. 4.

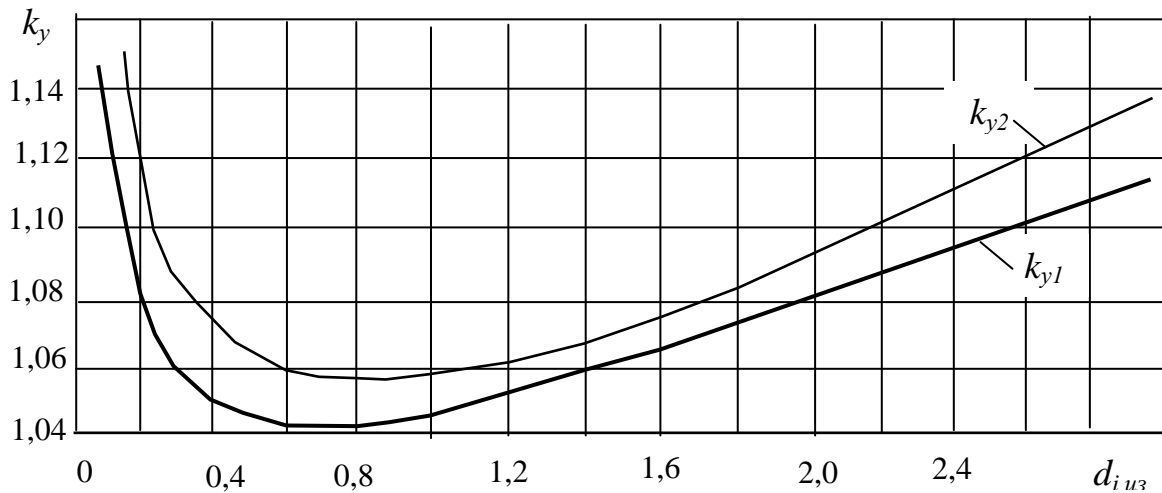


Рис. 4. Зависимость коэффициентов укладки в осевом k_{y1} и радиальном k_{y2} направлениях от диаметра провода d_{iuz}

Число слоев первичной обмотки m_1 трансформатора броневое типа или однокатушечного трансформатора стержневого типа составит

$$m_1 = \frac{W_1}{n_1}, \quad (29)$$

где W_1 – число витков первичной обмотки.

Полученное значение m_1 округляется до ближайшего большего целого числа.

В случае двухкатушечного стержневого трансформатора число витков на стержне будет равно $W_1/2$.

Напряжение между двумя слоями первичной обмотки U_{c1} определяется по формуле

$$U_{c1} = 2n_1 \cdot E_\phi, \text{ В.} \quad (30)$$

Если напряжение U_{c1} между двумя слоями превышает 50 В, то между двумя слоями обмотки следует помещать изоляционные прокладки, толщина которых γ_1 составляет 0,05...0,08 мм.

Толщина первичной обмотки δ_1 составит:

$$\delta_1 = k_{y2} m_1 d_{1u} + k_{mc} (m_1 - 1) \cdot \gamma_1, \text{ мм}, \quad (31)$$

где k_{y2} – коэффициент укладки обмотки в радиальном направлении в зависимости от диаметра провода определяют по рис. 4;

m_1 – число слоев первичной обмотки;

d_{1u} – диаметр провода первичной обмотки с изоляцией, мм;

k_{mc} – коэффициент неплотности междуслойной изоляции, определяется по кривым, приведенным на рис. 5, в зависимости от диаметра провода и толщины изоляции.

Число витков вторичной обмотки в одном слое n_2 составит:

$$n_2 = \frac{h - 2h_{u32}}{d_{2u} \cdot k_{y1}}, \quad (32)$$

где h_{u32} – расстояние от вторичной обмотки до ярма, мм, принимается аналогично h_{u31} ;

d_{2u} – диаметр провода вторичной обмотки с изоляцией, мм;

k_{y1} – коэффициент укладки провода в осевом направлении (см. рис. 4).

Число слоев вторичной обмотки m_2 трансформатора броневых типа или однокатушечного трансформатора стержневого типа составит:

$$m_2 = \frac{W_2}{n_2}, \quad (33)$$

где W_2 – число витков вторичной обмотки.

Полученное значение m_2 также округляется до ближайшего большего целого числа.

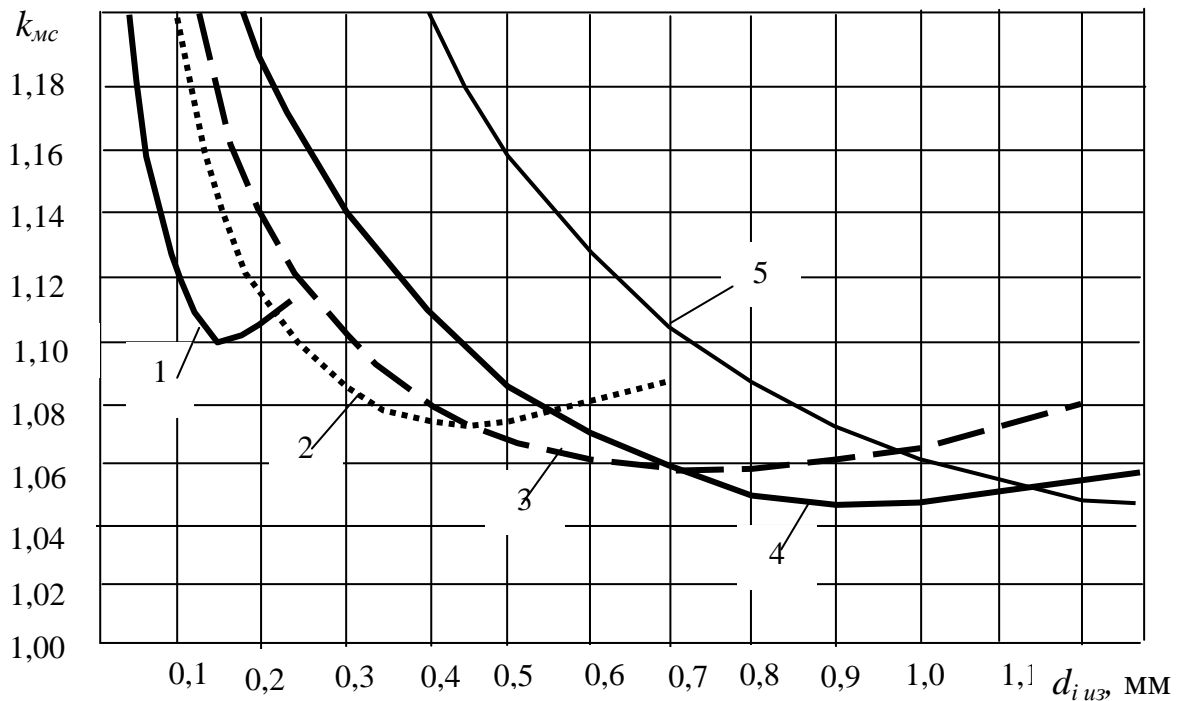


Рис. 5. Зависимость коэффициента неплотности междуслойной изоляции от диаметра провода и толщины изоляции γ_{mc} :
1 – до 0,022 мм; 2 – до 0,05 мм; 3 – до 0,09 мм; 4 – 0,11 мм; 5 – до 0,2 мм

В случае двухкатушечного стержневого трансформатора число витков на стержне будет равно $W_2/2$.

Напряжение между двумя слоями вторичной обмотки U_{C2} определяется по формуле

$$U_{C2} = 2n_2 \cdot E_6, \text{ В}, \quad (34)$$

как и для первичной обмотки, в случае если $U_{C2} > 50$ В, принимаются межслойные изоляционные прокладки $\gamma_2 = 0,05 \dots 0,08$ мм.

Толщина вторичной обмотки δ_2 составит:

$$\delta_2 = k_{y2} m_2 d_{2u} + k_{mc} (m_2 - 1) \cdot \gamma_2, \text{ мм}. \quad (35)$$

Число витков вторичной третьей обмотки в одном слое n_3 составит:

$$n_3 = \frac{h - 2h_{u33}}{d_{3u} \cdot k_{y1}}, \quad (36)$$

где $h_{из3}$ – расстояние от вторичной обмотки до ярма, мм, принимается аналогично $h_{из1}$;

$d_{3и}$ – диаметр провода вторичной обмотки с изоляцией, мм;

k_{y1} – коэффициент укладки провода в осевом направлении (см. рис. 4).

Число слоев вторичной третьей обмотки m_3 трансформатора броневое типа или однокатушечного трансформатора стержневого типа составит:

$$m_3 = \frac{W_3}{n_3}, \quad (37)$$

где W_3 – число витков вторичной обмотки.

В случае двухкатушечного стержневого трансформатора число витков на стержне будет равно $W_3/2$.

Напряжение между двумя слоями вторичной третьей обмотки $U_{с3}$ определяется по формуле

$$U_{с3} = 2n_3 \cdot E_6, \quad (38)$$

как и для первичной обмотки, в случае если $U_{с3} > 50$ В, принимаются межслойные изоляционные прокладки $\gamma_3 = 0,05 \dots 0,08$ мм.

Толщина вторичной третьей обмотки δ_3 составит:

$$\delta_3 = k_{y2} m_3 d_{3и} + k_{mc} (m_3 - 1) \cdot \gamma_3, \text{ мм.} \quad (39)$$

Если трансформатор имеет более трех обмоток, их толщина определяется аналогично.

Полный радиальный размер катушки (рис. 6) определяется из выражения

$$a_{кат} = \Delta_3 + (h_{из.ос} + \delta_1 + k_{mo} h'_{из.мо} + \delta_2 + k_{mo} h''_{из.мо} + \delta_3 + k_{но} h_{из.н}) \cdot k_6, \text{ мм,} \quad (40)$$

где Δ_3 – зазор между гильзой (каркасом) и сердечником, принимается 0,5 мм;

$h_{из.ос}$ – толщина гильзы (каркаса) с учетом дополнительной изоляции поверх каркаса, мм;

δ_i – радиальные размеры обмоток, мм;

$h'_{из.мо}, h''_{из.мо}$ – толщина междуобмоточной изоляции, мм;

k_{mo} — коэффициент неплотности междуобмоточной изоляции, определяется по рис. 7;

$h_{из.н}$ — толщина наружной изоляции, мм;

$k_{но}$ — коэффициент неплотности намотки наружной изоляции, принимается 1,7...2;

k_g — коэффициент выпучивания в радиальном направлении (учитывается только при выполнении обмотки на гильзе), определяется по графикам (рис. 8) в зависимости от диаметра провода с учетом отношения b/a выбранного типоразмера магнитопровода (при выполнении обмотки на каркасе принимается $k_g = 1$).

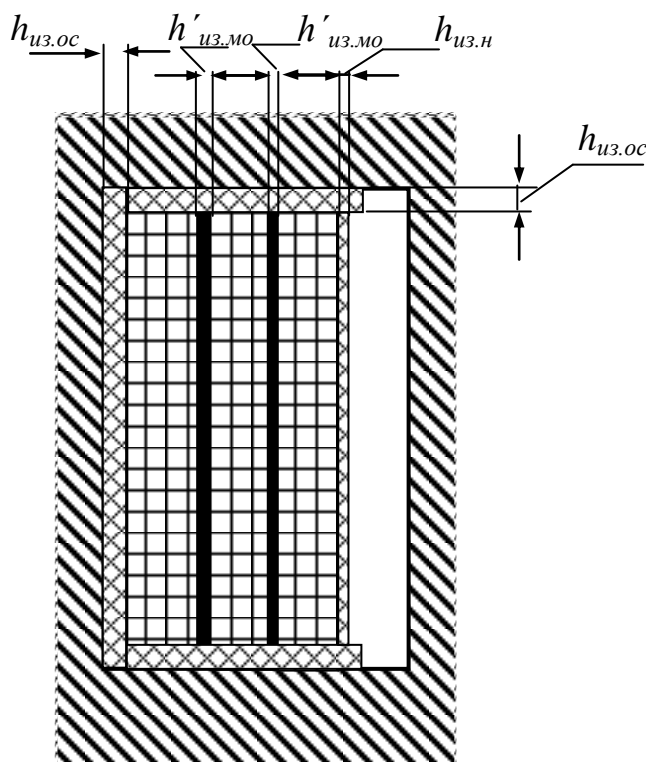


Рис. 6. Изоляционные расстояния при размещении обмоток на каркасе

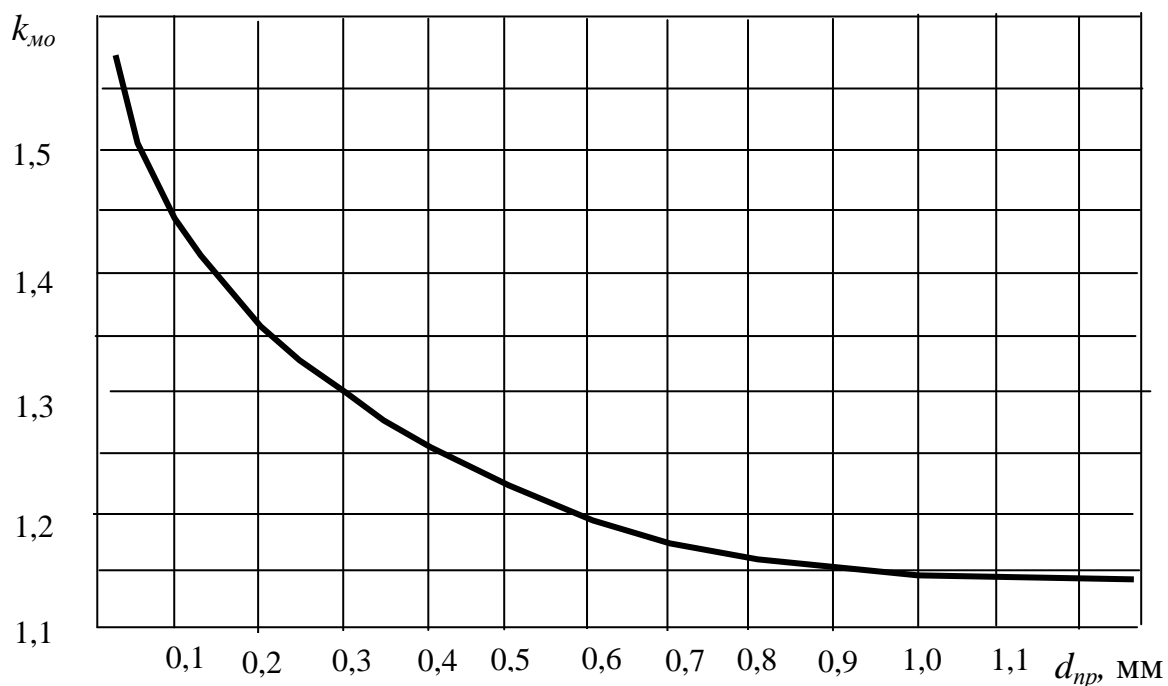


Рис. 7. Зависимость коэффициента неплотности междуобмоточной изоляции от диаметра провода

Толщина гильзы принимается равной 1...2 мм, а толщина каркаса 1,5...3,0 мм (в зависимости от диаметра провода). Поверх гильзы (каркаса) наматывают изоляционную бумагу, обеспечивающую лучшую укладку провода и усиливающую изоляцию. Для этой цели применяют кабельную бумагу К-12 (толщина 0,12 мм) или пропиточную бумагу марки ЭИП-63Б (толщина 0,11 мм) в один слой при величине рабочего напряжения первичной обмотки до 250 В, в два слоя – при напряжении до 500 В и в три слоя – при напряжении до 750 В.

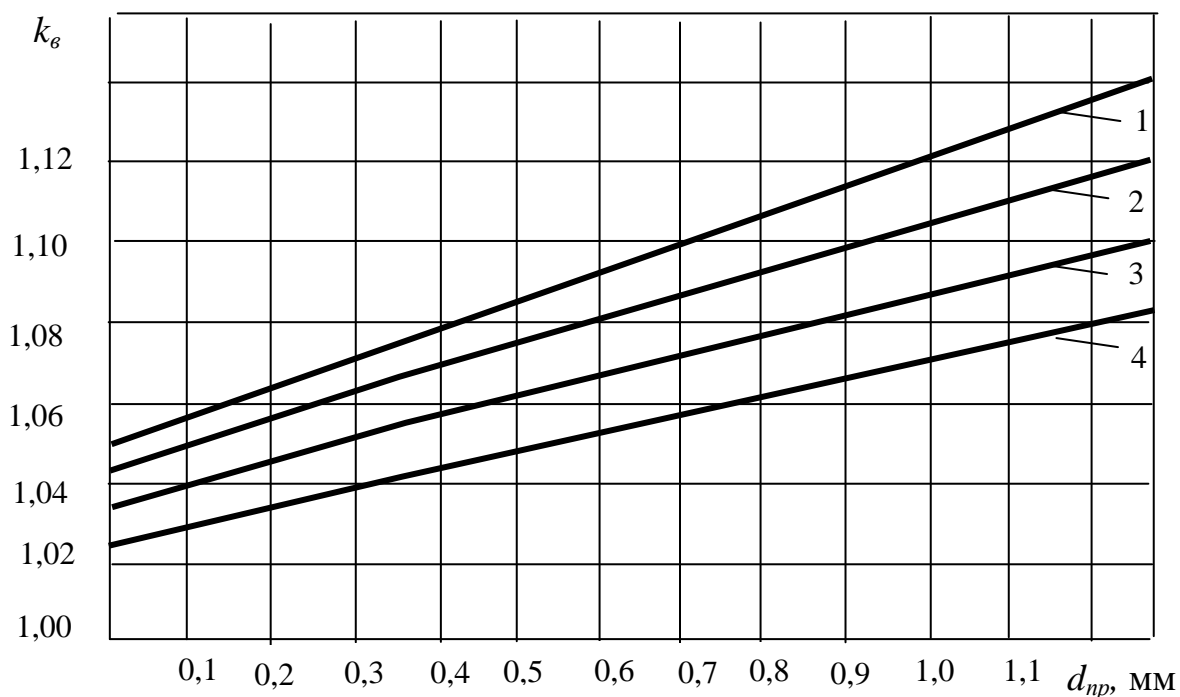


Рис. 8. Зависимость коэффициента выпучивания в радиальном направлении от диаметра провода и конструкции гильзы:
1 – $v/a = 2,0$; 2 – $v/a = 1,6$; 3 – $v/a = 1,25$; 4 – $v/a = 1,0$

Толщина изоляции между обмотками определяется в зависимости от величины испытательного напряжения обмотки с наибольшим напряжением. При $U_{исп}$ до 1000 В рекомендуется применять три слоя бумаги ЭИП-63Б или два слоя бумаги К-12. При $U_{исп}$ до 1600 В – соответственно четыре слоя бумаги ЭИП-63Б или три слоя К-12; при $U_{исп}$ до 2200 В – пять слоев ЭИП-63Б или четыре слоя К-12; при $U_{исп}$ до 2700 В – шесть слоев ЭИП-63Б или пять слоев К-12; при $U_{исп}$ до 3500 В – восемь слоев ЭИП-63Б или шесть слоев К-12.

Величина испытательного напряжения определяется в зависимости от амплитудного значения рабочего напряжения (рис. 9). При этом амплитудное значение рабочих напряжений обмоток может быть определено из выражения

$$U_{p, \max} = \sqrt{2} \cdot U_p, \text{ В}, \quad (41)$$

где U_p – рабочее напряжение обмоток, В.

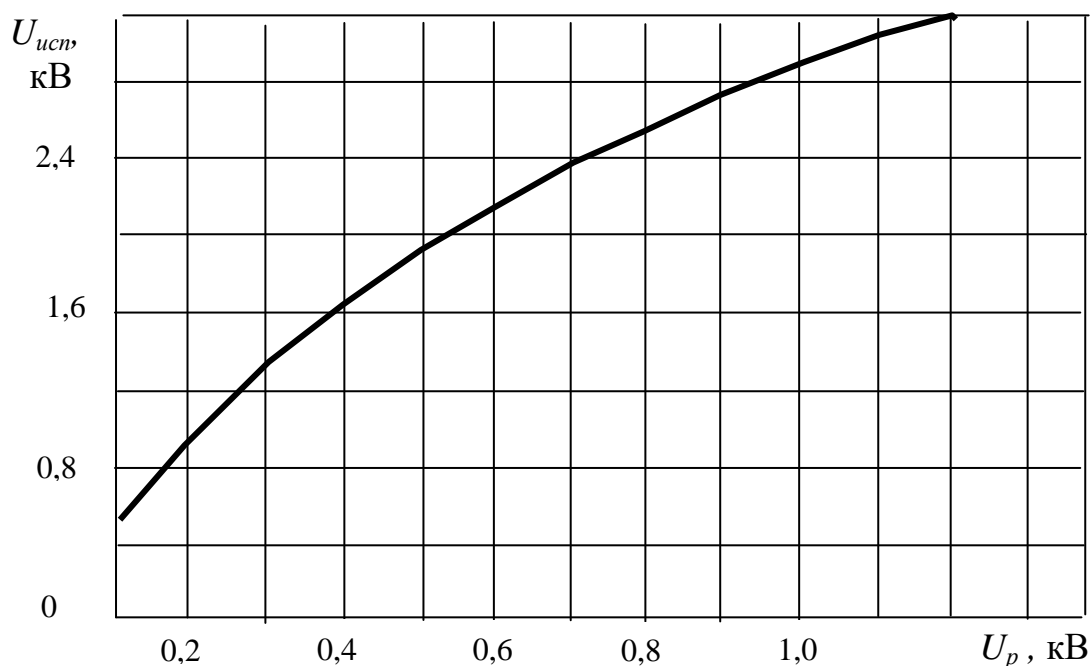


Рис. 9. Зависимость испытательного напряжения от рабочего напряжения обмотки в амплитудных значениях

Толщина наружной изоляции $h_{из.н}$ выбирается в соответствии с рабочим напряжением последней обмотки. При $U_p < 500$ В наружную изоляцию выполняют из двух слоев бумаги ЭИП-63Б или К-12 и одного слоя батистовой ленты толщиной 0,16 мм. При $U_p > 500$ В наружную изоляцию увеличивают на один слой бумаги на каждые 250 В.

Величина зазора между катушкой и сердечником ε для броневых и стержневых трансформаторов с одной прямоугольной катушкой

$$\varepsilon = c - a_{кат}, \text{ мм}, \quad (42)$$

где c – ширина окна сердечника, мм;

$a_{кат}$ – размер катушки в радиальном направлении, мм.

Для стержневых трансформаторов с одной круглой катушкой

$$\varepsilon = c - \varepsilon_0 - a_{кат}, \text{ мм}, \quad (43)$$

где $\varepsilon_0 = (D_0 - a) / 2$ – внутренний зазор от стержня до катушки, мм;

D_0 – диаметр каркаса, мм;

a – ширина стержня, мм.

Величина зазора между катушками для двухкатушечного стержневого трансформатора

$$\varepsilon = c - 2a_{кат}, \text{ мм.} \quad (44)$$

Для нормальной укладки катушки в окне магнитопровода необходимо, чтобы величина зазора ε лежала в пределах от 0,5 до 1,0 мм. Если полученный зазор меньше указанного, то необходимо уточнить значение $k_{ок}$, увеличить площадь окна магнитопровода и пересчитать размеры катушки.

1.12 Определение средней длины витка обмоток

Средняя длина витка обмоток для случая, когда они намотаны на катушке в порядке: первая – вторая – третья, определяется следующим образом (рис. 10):

– для прямоугольных катушек:

$$l_{ср.в_1} = [2(a_{\kappa} + b_{\kappa}) + 2\pi r_1] \cdot 10^{-3}, \text{ м,} \quad (45)$$

где a_{κ} и b_{κ} – наружные размеры каркаса или гильзы, мм;

$$a_{\kappa} = a + 2\Delta_3 + 2h_{из.ос} \cdot k_{\varepsilon}, \text{ мм,} \quad (46)$$

$$b_{\kappa} = b + 2\Delta_3 + 2h_{из.ос} \cdot k_{\varepsilon}, \text{ мм,} \quad (47)$$

$$r_1 = 0,5\delta_1 \cdot k_{\varepsilon}, \text{ мм.} \quad (48)$$

$$l_{ср.в_2} = [2(a_{\kappa} + b_{\kappa}) + 2\pi r_2] \cdot 10^{-3}, \text{ м,} \quad (49)$$

где $r_2 = (\delta_1 + h'_{из.мо} \cdot k_{мо} + 0,5\delta_2) \cdot k_{\varepsilon}, \text{ мм.} \quad (50)$

$$l_{ср.в_3} = [2(a_{\kappa} + b_{\kappa}) + 2\pi r_3] \cdot 10^{-3}, \text{ м,} \quad (51)$$

где $r_3 = (\delta_1 + h'_{из.мо} \cdot k_{мо} + \delta_2 + h''_{из.мо} \cdot k_{мо} + 0,5\delta_3) \cdot k_{\varepsilon}, \text{ мм.} \quad (52)$

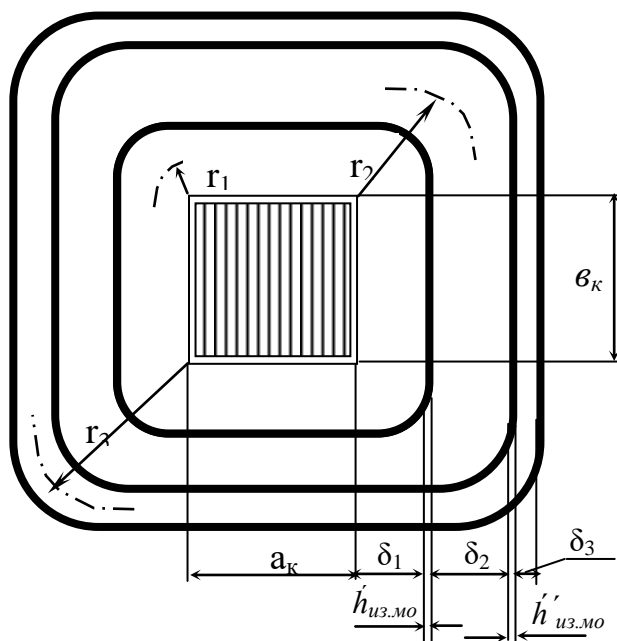


Рис. 10. К определению средней длины витка обмоток трансформаторов

При расположении обмоток в последовательности 2-я, 1-я, 3-я значения r_1 и r_2 определяются по формулам:

$$r_1 = (\delta_2 + h'_{uz.mo} \cdot k_{mo} + 0,5\delta_1) \cdot k_\theta, \text{ мм}, \quad (53)$$

$$r_2 = 0,5\delta_2 \cdot k_\theta, \text{ мм}; \quad (54)$$

— для круглых катушек при расположении обмоток в последовательности 1-я, 2-я, 3-я:

$$l_{cp.\theta_1} = \pi(a\sqrt{2} + 2\Delta_3 + 2h_{uz.oc} + \delta_1) \cdot 10^{-3}, \text{ м}, \quad (55)$$

$$l_{cp.\theta_2} = \pi(a\sqrt{2} + 2\Delta_3 + 2h_{uz.oc} + 2\delta_1 + 2h'_{uz.mo} \cdot k_{mo} + \delta_2) \cdot 10^{-3}, \text{ м}, \quad (56)$$

$$l_{cp.\theta_3} = \pi[a\sqrt{2} + 2(\Delta_3 + h_{uz.oc} + \delta_1 + h'_{uz.mo} k_{mo} + \delta_2 + h''_{uz.mo} k_{mo}) + \delta_3] \cdot 10^{-3}, \text{ м}. \quad (57)$$

1.13 Расчет массы меди обмоток

Масса меди обмоток определяется по формуле

$$G_{mi} = 8,9 \cdot W_i \cdot q_i \cdot l_{cp.\theta_i} \cdot 10^{-3}, \text{ кг}, \quad (58)$$

где W_i — число витков соответствующей обмотки ($i = 1, 2, 3$);

q_i – поперечное сечение проводников соответствующей обмотки, мм²;

$l_{cp.и}$ – средняя длина витка обмотки, м;

i – номер соответствующей обмотки.

Суммарная масса обмоток трансформатора

$$G_m = G_{m1} + G_{m2} + G_{m3} \quad (59)$$

где G_{m1} , G_{m2} , G_{m3} – массы меди отдельных обмоток, кг.

4.14 Определение массы стали

Масса стали трансформатора определяется по формуле

$$G_{ст} = \gamma_{ст} \cdot V_{ст} = \gamma_{ст} \cdot l_{ст} \cdot Q_{ст.выбр.}, \text{ кг}, \quad (60)$$

где $\gamma_{ст} = 7,8 \cdot 10^{-3}$ – удельный вес стали, кг/см³;

$l_{ст}$ – средняя длина силовых линий магнитного потока в сердечнике, см
(определяется по формулам, приведенным в табл. 9);

$Q_{ст.выбр.}$ – поперечное сечение магнитопровода, см².

После определения массы меди обмоток и стали сердечника по отношению $\alpha = G_{ст} / G_m$ проверяется выполнение заданного условия расчета трансформатора (на минимум стоимости или минимум массы).

Если заданное условие расчета не выполнено, необходимо сначала внимательно проверить правильность расчетов.

При отсутствии ошибок в расчете и значениях α меньше допустимых, а также плотностях тока в обмотках, лежащих в пределах рекомендуемых величин, размеры сердечника и обмоток можно не изменять. В том же случае, когда величина получается больше рекомендуемых значений, можно изменить размеры сердечника в меньшую сторону и проверить возможность размещения обмоток в окне нового сердечника, выбрав минимально допустимые размеры изоляционных прокладок между обмотками и отдельными слоями обмоток.

Если окажется, что обмотки не размещаются в окне сердечника, следует вернуться к первоначальному сердечнику, но уменьшить толщину пакета b до значения, при котором магнитная индукция не будет превышать максимально допустимую. В этом случае будет необходимо уточнить вес меди обмоток и стали.

Для стержневого трансформатора при расчете на минимум массы, если α получится больше трех, следует уменьшить высоту и увеличить ширину окна сердечника, взяв отношение высоты к ширине меньше трех, но не меньше двух.

Таблица 9

Выбор основных расчетных формул для определения некоторых величин

Наименование параметра	Броневого трансформатор		Стержневой двухкатушечный трансформатор	
	пластинчатый	ленточный	пластинчатый	ленточный
Длина средней магнитной линии $l_{ст}$	$2(h + c + a)$	$2(h + c + \pi a/4)$	$2(h + c + 2a)$	$2(h + c + \pi a/2)$
Средняя длина витков $l_{в\ ср}$	$2(a + b + 2c)$		$2(a + b + c)$	
Открытая поверхность охлаждения сердечника $Q_{серд}$	$2(a+b)(a+2c+h) + 4a(b+a/2)$	$2(a+b)(a+2c+h) + \pi a(b+a/2)$	$2c(2a+b) + 8a(a+b)$	$2c(2a+b) + 2\pi a(a+b)$
Открытая поверхность охлаждения катушки $Q_{обм.}$	$2h(a + 4c) + 2c l_{в\ ср}$		$2h(2a + b + 3c) + 2c l_{в\ ср}$	

**2 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ
ДЛЯ ПОДГОТОВКИ К ЗАЩИТЕ РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКОЙ
РАБОТЫ
«РАСЧЕТ ТРАНСФОРМАТОРА МАЛОЙ МОЩНОСТИ»**

- 1 Принцип работы трансформатора.
- 2 Области применения ТММ.
- 3 Материалы, применяемые для изготовления трансформаторов.
- 4 Какие параметры трансформатора влияют на его размеры?
- 5 Что такое «магнитная индукция»?
- 6 Физический смысл коэффициента заполнения окна.
- 7 Физический смысл коэффициента заполнения стали.
- 8 Назовите типы сердечников ТММ.
- 9 Что такое коэффициент трансформации, как выполнить его определение опытным путем?
- 10 Объясните выбор межслоевой и междуобмоточной изоляции.
- 11 Как осуществляется сборка трансформатора?
- 12 Как выбирается плотность тока в обмотках трансформатора?
- 13 Как производится выбор сечения проводников обмоток?
- 14 Какие параметры трансформатора влияют на величину сечения стержня сердечника?
- 15 Какие параметры влияют на величину ЭДС одного витка?
- 16 Как определяется число витков отдельных обмоток?
- 17 Почему напряжения на зажимах вторичных обмоток при нагрузке отличаются от напряжений при холостом ходе?
- 18 От чего зависит выбор последовательности размещения обмоток на стержне?
- 19 Какие потери имеют место при работе трансформатора?
- 20 От чего зависят потери в меди?
- 21 Какие параметры влияют на величину потерь в стали?
- 22 От чего зависит величина тока холостого хода?

- 23 Что такое напряжение короткого замыкания?
- 24 Какие потери в трансформаторе называют постоянными, почему?
- 25 Какие потери в трансформаторе называют переменными, почему?
- 26 На чем отразится увеличение величины воздушного зазора в стыках сердечника при некачественной сборке трансформатора?
- 27 Почему трансформатор не может работать от сети постоянного тока?
- 28 От чего зависят активная и реактивная составляющие тока холостого хода?
- 29 Изменяется ли величина основного потока в сердечнике ТММ при увеличении тока нагрузки?
- 30 От чего зависит величина сопротивления обмоток?
- 31 Как температура влияет на величину сопротивления обмоток?
- 32 Какие параметры влияют на величину индуктивного сопротивления обмоток?
- 33 Что такое коэффициент полезного действия, какие параметры влияют на его величину?
- 34 Что влияет на величину превышения температуры трансформатора над температурой окружающей среды?
- 35 Нарисуйте схему замещения трехобмоточного трансформатора.
- 36 Что такое приведенные параметры вторичных обмоток?
- 37 Покажите на чертеже основные элементы конструкции трансформатора.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1 **Брускин, Д.Э.** Электрические машины и микромашины / Д.Э. Брускин, А.Е. Зарохович, В.С. Хвостов. – М. : Высш. шк., 1971.

2 **Белопольский, И.И.** Расчет трансформаторов и дросселей малой мощности / И.И. Белопольский, Е.И. Каретникова, Л.Г. Пикалова. – М. : Энергия, 1973.

3 **Ермолин, Н.П.** Расчет трансформаторов малой мощности / Н.П. Ермолин. – М. : Энергия, 1969.

4 **Бальян, Р.Х.** Трансформаторы для радиоэлектроники / Р.Х. Бальян. – М. : Сов. радио, 1997.

Содержание

ВЫБОР ЗАДАНИЯ	3
1 МЕТОДИКА РАСЧЕТА ТРАНСФОРМАТОРА	8
1.1 Определение расчетной мощности	8
1.2 Выбор конструкции магнитопровода	8
1.3 Выбор материала сердечника	9
1.4 Выбор предварительных значений максимальной магнитной индукции $B_{\text{макс}}$, плотности тока $j_{\text{ср}}$, коэффициента заполнения окна $k_{\text{ок}}$ и коэффициента заполнения магнитопровода $k_{\text{ст}}$	10
1.5 Определение токов в обмотках	12
1.6 Определение сечений и диаметров проводов обмоток	12
1.7 Определение поперечного сечения стержня сердечника.....	13
1.8 Определение числа витков обмоток трансформатора	14
1.9 Определение площади окна сердечника	16
1.10 Выбор сердечника трансформатора	17
1.11 Проверка возможности размещения обмоток в окне сердечника ...	18
1.12 Определение средней длины витка обмоток	27
1.13 Расчет массы меди обмоток	28
1.14 Определение массы стали	29
2 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ К ЗАЩИТЕ РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКОЙ РАБОТЫ «РАСЧЕТ ТРАНСФОРМАТОРА МАЛОЙ МОЩНОСТИ»	31
СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	33
ПРИЛОЖЕНИЕ	34

ПРИЛОЖЕНИЕ

Приложение 1

Обмоточные провода

Государственные стандарты регламентируют марки и размеры обмоточных проводов.

В таблицу включены сведения о проводах марок ПЭВ-1 и ПБД.

ПЭВ-1 – провод изолирован высокопрочной эмалью в один слой,

ПБД – провод, изолированный двумя слоями хлопчатобумажной пряжи.

Диаметр голого провода, мм	Сечение голого провода, мм ²	Диаметр провода с изоляцией, мм	
		ПЭВ-1	ПБД
1	2	3	4
0,03	0,000706	0,045	-
0,04	0,00126	0,055	-
0,05	0,00196	0,070	-
0,06	0,00283	0,085	-
0,07	0,00385	0,95	-
0,08	0,00503	0,105	-
0,09	0,00636	0,115	-
0,10	0,00785	0,125	-
0,11	0,00950	0,135	-
0,12	0,01131	0,145	-
0,13	0,01327	0,155	-
0,14	0,01539	0,165	-
0,15	0,01767	0,18	-
0,16	0,02011	0,19	-
0,17	0,02270	0,20	-
0,18	0,02545	0,21	-
0,19	0,02835	0,22	-
0,20	0,03142	0,23	0,39
0,21	0,03464	0,24	0,40
0,23	0,04155	0,27	0,42
0,25	0,04909	0,29	0,44
0,27	0,05726	0,31	0,49
0,29	0,06605	0,33	0,51
0,31	0,07548	0,35	0,53
0,33	0,08553	0,37	0,55
0,35	0,09621	0,39	0,57
0,38	0,1134	0,42	0,60
0,41	0,1320	0,45	0,63
0,44	0,1521	0,48	0,66
0,47	0,1735	0,51	0,69
0,49	0,1886	0,53	0,71

1	2	3	4
0,51	0,2043	0,56	0,73
0,53	0,2206	0,58	0,75
0,55	0,2376	0,60	0,77
0,57	0,2552	0,62	0,79
0,59	0,2734	0,64	0,81
0,62	0,3019	0,67	0,84
0,64	0,3217	0,69	0,86
0,67	0,3526	0,72	0,89
0,69	0,3739	0,74	0,91
0,72	0,4072	0,77	0,94
0,74	0,4301	0,80	0,96
0,77	0,4657	0,83	0,99
0,80	0,5027	0,86	1,02
0,83	0,5411	0,89	1,05
0,86	0,5809	0,92	1,08
0,90	0,6362	0,96	1,12
0,93	0,6793	0,99	1,15
0,96	0,7238	1,02	1,18
1,00	0,7854	1,08	1,27
1,04	0,8495	1,12	1,31
1,08	0,9161	1,16	1,35
1,12	0,9852	1,20	1,39
1,16	1,0568	1,24	1,43
1,20	1,1310	1,28	1,47
1,25	1,2272	1,33	1,52
1,30	1,3270	1,38	1,57
1,35	1,4314	1,43	1,62
1,40	1,5394	1,48	1,67
1,45	1,6513	1,53	1,72
1,50	1,7672	1,58	1,77
1,56	1,9113	1,64	1,83
1,62	2,0612	1,70	1,89
1,68	2,217	1,76	1,95
1,74	2,378	1,82	2,01
1,81	2,573	1,90	2,08
1,88	2,776	1,97	2,15
1,95	2,987	2,04	2,22
2,02	3,205	2,11	2,29
2,10	3,464	2,20	2,37
2,26	4,012	2,36	2,53
2,44	4,676	2,54	2,71

