

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА**  
**Федеральное Государственное Бюджетное Образовательное Учреждение Высшего**  
**Профессионального Образования**  
**«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**  
**ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ»**  
**(МИИТ)**

Кафедра: «Электрификация  
и электроснабжение»

## **ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ**

Задание на курсовую работу с методическими указаниями  
по дисциплине для студентов-специалистов 3 курса  
специальности: «**Системы обеспечения движения поездов**»

специализации: «**Автоматика и телемеханика на железнодорожном транспорте**»

Москва, 2013 г.

## СОДЕРЖАНИЕ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

1. Рассчитать маломощный трансформатор с воздушным охлаждением согласно заданию, приведенному в табл. 1.
2. Выполнить чертеж рассчитанного трансформатора (выполнение его допускается на миллиметровой бумаге формата А3).

Расчетно-пояснительная записка курсового проекта должна содержать подробный ход расчета, обоснование выбранных значений параметров (не следует переписывать текст методических указаний и копировать графики).

Графическая часть проекта должна содержать три проекции, в том числе фасад и вид сверху с разрезами наполовину, на которых должны быть указаны габаритные и установочные размеры трансформатора, размеры обмоток, межобмоточной изоляции и каркаса катушки.

Чертежи должны быть выполнены в соответствии с ГОСТ 2.107.68 (основные требования к рабочим чертежам), ГОСТ 2.109.68 (правила выполнения чертежей деталей, сборочных, общих видов, габаритные и монтажные), ГОСТ 2.413.68 (правила выполнения электротехнических чертежей и радиотехнических изделий), ГОСТ 2.414.68 (правила выполнения чертежей жгутов кабелей, проводов), ГОСТ 2.415.68 (правила выполнения чертежей изделий с электрическими обмотками), ГОСТ 2.416.68 (условные изображения сердечников магнитопроводов).

Результаты расчетов округлить до трех значащих цифр.

Таблица 1

Наименование величины, расчетное условие		Единицы измере- ния	ВАРИАНТ											
			по третьей от конца цифре шифра	по предпо- следней цифре шифра	по последней цифре учебного шифра									
					1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$S_2$	ВА	0 - 9	0 - 9	10	15	30	75	100	200	300	400	500	600	
$S_3$			5	10	15	20	40	90	00	80	100	150		
$U_2$	В		0,1,3,6,9	127	180	220	250	280	315	390	500	630	100	
$U_3$	В		2,4,5,7,0	100	127	180	220	250	280	315	380	500	220	
$\cos\varphi_2$			0 - 9	4,5	5,5	6,3	8	12,8	16	20	24	27	30	
$\cos\varphi_3$				0,9	0,8	0,7	0,6	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,0	
$U_1$			0 - 9	0,7	0,8	0,9	1,0	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,6	
			0,2,4,6,8	127	220	380	115	127	380	220	127	380	115	
Частота сети $f$	Гц		0 - 9	1,3,5,7,9	380	115	127	380	220	115	127	380	220	220
			0,1,5,7,8	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400
Расчетное условие	минимум массы	0 - 9	2,3,4,6,9	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	
	минимум стоимости	1,3,4,7,9	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
Температура окружающей среды	°С	0 - 9	0,1,2,4,5	30	50	30	50	30	50	30	50	30	50	
			3,6,7,8,9	50	30	50	30	50	30	50	30	50	30	

Расчетное ограничение		ВАРИАНТ											
		по третьей от конца цифре шифра	по предпоследней цифре шифра	по последней цифре учебного шифра									
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Максимальная температура		2, 3, 4, 6, 9	0 - 9	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+
		0, 1, 5, 7, 8		-	-	-	-	-	+	+	+	+	+
Падение напряжения (не более)	$\Delta U_{12}$ , %	2, 4, 5, 7, 8		6	5	5	4	3	-	-	-	-	-
	$\Delta U_{13}$ , ‰			7	7	6	6	4	-	-	-	-	-
	$\Delta U_{12}$ , ‰	0, 1, 3, 6, 9		4	6	6	3	5	-	-	-	-	-
	$\Delta U_{13}$ , ‰			5	5	6	4	5	-	-	-	-	-

Примечания: 1. Напряжения  $U_2$  и  $U_3$  при номинальной нагрузке не должны отличаться от заданных более чем на  $\pm 2\%$ .

2. Рабочая температура трансформатора при расчете на максимальную температуру должна лежать в пределах  $95 \leq \theta \leq 105$  °С, а при расчете на падение напряжения —  $\theta \leq 105$  °С.

3. Если номер учебного шифра студента выражен однозначным числом, то для отыскания в таблице требуемых числовых величин необходимо за предпоследние цифры принять нули.

4. Отношение массы стали к массе меди должно лежать в пределах: при расчете на минимум массы 2–3, при расчете на минимум стоимости 4–6. Отношение потерь в меди к потерям в стали при нормальной нагрузке желательно иметь в пределах 1,25–2,5 при частоте 50 Гц и 0,35–1,5 при частоте 400 Гц

Расчетное условие, расчетное ограничение и числовые значения величин, необходимые для проектирования трансформатора, приведены в табл. 1 и выбираются по трём последним цифрам шифра.

Например, студент, имеющий последние цифры учебного шифра 314, выбирает значения  $S_2 = 75$  ВА,  $S_3 = 20$  ВА,  $U_3 = 8$  В,  $\cos \varphi_3 = 1,0$ ,  $\cos \varphi_2 = 0,6$ ;  $U_2 = 250$  В,  $f = 400$  Гц,  $\theta_0 = 50$  °С;  $U_1 = 380$  В, расчетное условие — минимум массы, расчетное ограничение по падению напряжения (не более)  $\Delta U_{12} = 3\%$  и  $\Delta U_{13} = 4\%$ .

В курсовой работе студенты выполняют расчёт только по тому ограничению, которое задано в задании. Если задано ограничение по падению напряжения, то его и выполняют, не рассчитывая температуру обмоток (она не превысит максимального значения), и наоборот, если ограничение по температуре, то не выполняется расчет падения напряжения.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Брускин Д.Э., Зарохович А.Е., Хвостов В.С. Элек-трические машины и микромашины. — М.: Высшая школа, 1987.
2. Белопольский И.И., Каретникова Е.И., Пикалова Л.Г. Расчет трансформаторов и дросселей малой мощности. Гл. 1 (1-1–1-3), II, III, IV. — М.: Энергия, 1973.
3. Седов В.И., Шумейко В.В. Электрические машины. Приложение к заданию на курсовую работу по расчету маломощного трансформатора с воздушным охлаждением для студентов III курса специальности «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте». — М.: РГОТУПС, 2003.
4. Сидоров И.Н. и др. Малогабаритные магнитопроводы и сердечники: Справочник. — М.: Радио и связь, 1989.
5. Руднев В.Н. Электрические машины. Приложение к заданию на курсовую работу по расчету маломощного трансформатора с воздушным охлаждением для студентов IV курса специальности «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте». — М.: РГОТУПС, 1999.

## МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

Настоящие методические указания содержат основные сведения по методике расчета маломощных трансформаторов однофазного тока. В [3] прил. П. 1 и П. 2 даны справочные материалы, необходимые для выполнения курсовой работы.

### КОНСТРУКЦИИ МАЛОМОЩНЫХ ОДНОФАЗОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ С ВОЗДУШНЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ

Основными элементами конструкций трансформаторов являются магнитопровод и катушки с обмотками.

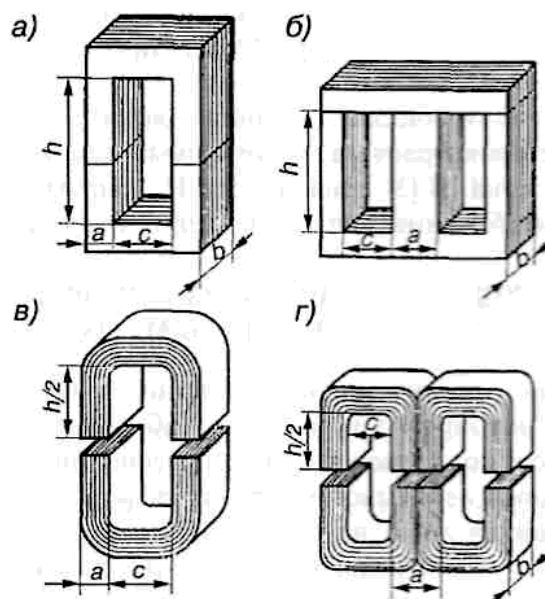
В зависимости от технологии изготовления магнитопроводы трансформаторов небольшой мощности делятся на пластинчатые (при толщине листа не менее 0,15 мм) и ленточные. По конструктивному выполнению пластинчатые и ленточные магнитопроводы делятся на три основных типа: стержневые, броневые и кольцевые. В работе используются первые два типа.

Стержневые пластинчатые магнитопроводы обычно собираются из прямоугольных пластин одинаковой ширины, одинаковых Я-образных пластин (см. рис. 1, *а*) или из Я-образных пластин и прямоугольных перекрышек.

Броневые пластинчатые магнитопроводы собираются из Я7-образных пластин и прямоугольных перекрышек (см. рис. 1, *б*); из одинаковых Я7-образных пластин с разъемом по середине стержня или из сплошных пластин с просечкой среднего стержня.

Стержневые и броневые витые ленточные магнитопроводы собираются встык из отдельных сердечников подковообразной формы с поперечным разрезом согласно рис. 1, *г*, *д*. Для получения возможно меньшего магнитного сопротивления в местах стыка разрезных ленточных сердечников их торцевые поверхности подвергаются шлифовке.

Для уменьшения магнитного сопротивления разрезных ленточных магнитопроводов обе его части при сборке трансформатора склеиваются при помощи специальной ферромагнитной пасты, содержащей карбонильное железо. Иногда склеивают и собираемые встык пластинчатые магнитопроводы. Особенно эффективно использование пасты для магнитопроводов малых размеров, у которых сопротивление воздушного зазора представляет значительную часть их общего сопротивления. Однако, для уменьшения тока холостого хода необходимо, чтобы состав пасты был однородным, а склеивающий слой был возможно тоньше.



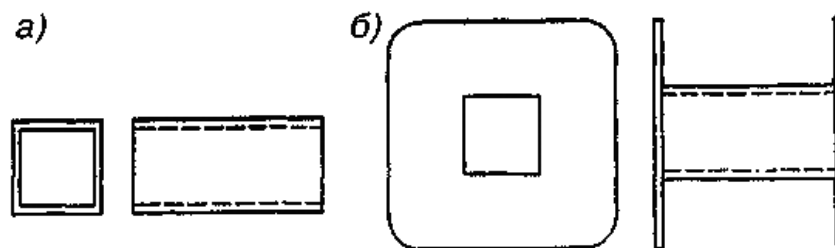
**Рис. 1. Конструкции однофазных магнитопроводов: а — стержневого пластинчатого; б — броневое пластинчатого; в — стержневого ленточного; г — броневое ленточного**

Катушки трансформаторов представляют собой совокупность обмоток и системы изоляции, обеспечивающие нормальную работу в заданных условиях окружающей среды. Обмотки изготавливаются из изолированных проводов; кроме того, предусматривается изоляция катушек от магнитопровода, межслоевая изоляция, междуобмоточная изоляция, внешняя (наружная) изоляция катушек.

Изоляция обмотки от стержневых и броневых магнитопроводов осуществляется при помощи каркасов, изготовляемых из негигроскопичного материала, обладающего требуемой электрической и механической прочностью.

Простейший и наиболее распространенный тип каркаса представляет собой гильзу, изготовляемую из электротехнического картона (электрокартона) (рис. 2, а). Часто применяются склеенные из электрокартона каркасы (см. рис. 2, б). При массовом производстве трансформаторов используются сборные каркасы, изготовляемые из твердых изоляционных материалов (гетинакса или текстолита) или прессованные из пластмассы каркасы.

Кроме магнитопровода и обмоток в конструкцию трансформатора малой мощности входят детали для сборки отдельных частей сердечника, детали крепления собранного трансформатора, клеммы для присоединения концов обмоток.



**Рис. 2. Гильза (а) и каркас (б)**

## ОСОБЕННОСТИ ХАРАКТЕРИСТИК И РАСЧЕТА ТРАНСФОРМАТОРОВ МАЛОЙ МОЩНОСТИ

Основной задачей при расчете трансформаторов малой мощности является уменьшение их габаритных размеров и массы при заданных ограничениях на рабочую температуру, падение напряжения и ток холостого хода. Увеличение магнитной индукции в сердечнике  $B$  и плотности тока  $j$  в обмотках обеспечивает уменьшение габаритов и массы трансформатора. Однако при увеличении  $B$  возрастают потери в сердечнике и ток холостого хода, а с увеличением  $j$  растут потери в обмотках и падение напряжения. Вызванный увеличением потерь рост температуры сердечника и обмоток допустим лишь до некоторого предела, определяемого теплостойкостью и сроком службы электроизоляционных материалов. Значения индукции и плотности тока при расчете трансформатора выбирают исходя из заданных ограничений на рабочую температуру частей трансформатора, падение напряжения и ток холостого хода. При этом во избежание чрезмерного увеличения тока холостого хода, индукция в сердечнике выбирается в пределах колена кривой намагничивания материала сердечника. В большинстве вариантов задания, приведенных в табл. 1, предусматривается расчет трансформатора на нагрев, когда в качестве основного ограничения принимается допустимая для принятого класса изоляции рабочая температура ( $95 \leq \theta \leq 105^\circ\text{C}$ ). Для этого выполняются расчёты по пунктам 1–46 и 52, 53.

В части вариантов задания за основное ограничение принимается заданная величина падения напряжения. При этом рабочая температура частей трансформатора будет ниже максимально допустимой для выбранного вида изоляции провода, т.е. для изоляции класса А  $\theta \leq 105^\circ\text{C}$ . Порядок расчета трансформатора на заданное падение напряжения отличается от расчета на нагрев: после выполнения расчета по п. 1–38 выполняются расчет по п. 46–53.

### РАСЧЁТ ТРАНСФОРМАТОРА

#### Выбор магнитопровода

При проектировании трансформатора рекомендуется следующий порядок расчета:

#### 1. Определяем расчетную мощность трансформатора

При  $(S_2 + S_3) < 100$  ВА расчетную мощность трансформатора рекомендуется определять по формуле:

$$S_p = \frac{1}{2}(S_2 + S_3) \left( 1 + \frac{1}{\eta} \right). \quad (1)$$

Значение КПД выбирается в соответствии с табл. 2. При  $(S_2 + S_3) > 100$  ВА можно принимать

$$S_p \approx (S_2 + S_3). \quad (2)$$

Таблица 2

Час- тога, Гц	Величина КПД при расчетной мощности трансформатора, ВА					
	2-15	15-50	50-150	150-300	300-1000	1000-2500
50	0,5-0,6	0,6-0,8	0,8-0,9	0,9-0,93	0,93-0,95	
400	0,82-0,87	0,87	0,87-0,94	0,94-0,96	0,96-0,97	0,97

## **2. Выбираем конструкцию магнитопровода по величине расчетной мощности, частоте и максимальному напряжению.**

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

При мощностях до 30 ВА и расчетном условии на минимум стоимости рекомендуются пластинчатые броневые трансформаторы: они технологичнее в изготовлении и проще по конструкции, а для трансформаторов минимальной массы выгоднее броневые ленточные магнитопроводы.

При мощностях от 30 до 100 ВА рекомендуется изготавливать также броневые трансформаторы при использовании как пластинчатых, так и ленточных магнитопроводов.

Для силовых трансформаторов мощностью выше 100 ВА более выгодными являются стержневые трансформаторы с двумя катушками и ленточными разъемными сердечниками (рис. 1, 2), поскольку они имеют большую поверхность охлаждения по сравнению с броневыми и меньшую среднюю длину витка.

Сводные данные по стандартным сердечникам и подробные данные по каждому типоразмеру можно найти в [3].

## **3. Выбираем материал 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 превышает уменьшение потерь на вихревые токи. Поэтому для каждой частоты существует своя оптимальная толщина материала.

Холоднокатаные текстурованные стали марок Э300, если направление магнитного потока в сердечнике совпадает с направлением текстуры (проката), имеют меньшие удельные значения намагничивающей мощности и потерь в стали. Они допускают большее значение магнитной индукции. Эти свойства наиболее полно реализуются в ленточной конструкции сердечника. Если же направление магнитного потока в сердечнике не совпадает с направлением текстуры, магнитные свойства резко ухудшаются.

Рекомендуется применять для пластинчатых конструкций горячекатаные стали Э42, Э43 толщиной листа  $D = 0,35$  мм при 50 Гц и Э44 толщиной  $D = 0,2$  мм при 400 Гц. Для ленточных конструкций холоднокатаные стали Э310, Э320 толщиной  $D = 0,35$  мм при 50 Гц и Э340 толщиной  $D = 0,15$  мм для частоты 400 Гц.

4. По найденной величине  $S_p$  для данной конструкции магнитопровода из табл. 3–6 находим ориентировочные значения максимальной индукции  $B_{\max}$ , плотности тока  $j_{\text{ср}}$ , коэффициента заполнения окна  $k_{\text{ок}}$  и коэффициента заполнения магнитопровода  $k_{\text{ст}}$ .

Приведенные в табл. 3 и 4 значения  $B_{\max}$  и  $j_{\text{ср}}$  могут использоваться как рекомендуемые для трансформаторов при величине напряжения на зажимах обмотки, не превышающей 500 В. При большем напряжении необходимо:

- 1) уменьшить индукцию  $B_{\max}$  примерно на 10%;
- 2) уменьшить  $j_{\text{ср}}$  примерно на 5% (для мощностей  $S_p$  до 100 ВА) и на 10% (для больших мощностей).

При частоте 400 Гц следует учитывать примечание к табл. 3.

Таблица 3

Конструкция магнитопровода	Материал сердечника и его толщина, мм	Частота сети, Гц	Магнитная индукция $B_{\max}$ , Т при $S_p$ , В А				
			5-15	15-50	50-150	150-300	300-1000
Бронева (пластинчатая)	Э42 $D=0,35$	50	1,1-1,3	1,3	1,33-1,35	1,35	1,35-1,2
Бронева (ленточная)	Э310 $D=0,35$	50	1,55	1,65	1,65	1,65	1,65
Стержневая (ленточная)	Э310 $D=0,35$	50	1,5-1,6	1,6	1,7	1,7	1,7
Бронева (пластинчатая)	Э44 $D=0,2$	400	1,1	1,2	1,2-1,15	1,15-1,0	1,0-0,8
Бронева (ленточная)	Э340 $D=0,15$	400	1,4	1,4	1,4	1,4	1,3
Стержневая (ленточная)	Э340 $D=0,15$	400	1,6	1,6	1,6-1,5	1,5-1,3	1,3-0,96

Примечание. Для частоты 400 Гц и стали Э44 индукцию  $B_{\max}$  понижать примерно на 15÷20%, а для стали Э340 — соответственно на 25÷30%, чтобы выполнить условие в п. 17.

Таблица 4

Конструкция магнитопровода	Материал сердечника и его толщина, мм	Частота сети, Гц	Плотность тока $j_{cp}$ , А/мм <sup>2</sup> при $S_p$ , ВА				
			5-15	15-50	50-150	150-300	300-1000
Бронева (пластинчатая)	Э42 $D=0,35$	50	3,9-3,0	3,0-2,4	2,4-2	2,0-1,7	1,7-1,4
Бронева (ленточная)	Э310 $D=0,35$	50	3,8-3,5	3,5-2,7	2,7-2,4	2,4-2,3	2,3-1,8
Стержневая (ленточная)	Э310 $D=0,35$	50	7-5,2	5,2-3,8	3,8-3	3,0-2,4	2,4-1,7
Бронева (пластинчатая)	Э44 $D=0,2$	400	6	5,5-5	5,0-4	4,0-2,8	2,8-1,6
Бронева (ленточная)	Э310 $D=0,15$	400	9,4-7,8	7,8-6,5	6,5-4	4,0-2,7	2,7-1,5
Стержневая (ленточная)	Э340 $D=0,15$	400	11-9,6	9,6-5,6	5,6-3,5	3,5-2,8	2,8-1,8

Примечание. При расчетном ограничении по падению напряжения данные в табл. 6 по плотности тока  $j_{cp}$ , А/мм<sup>2</sup> уменьшать для частоты 50 Гц и суммарной мощности обмоток в диапазоне 15÷50 ВА примерно на 15÷20%. Для частоты 400 Гц и мощностей в диапазоне 15÷100 ВА необходимо уменьшить, имея в виду, что для получения падения напряжения порядка 7÷8%,  $j_{cp} = 5-5,5$  А/мм<sup>2</sup>, а для падения  $\Delta U=3-4\%$ ,  $j_{cp} \approx 2,5-3$  А/мм<sup>2</sup>.



Таблица 5

Частота сети, Гц	Конструкция магнитопровода	Рабочее напряжение, В	Коэффициент заполнения окна $k_{ок}$ при $S_p$ , ВА				
			5–15	15–50	50–150	150–300	300–1000
50	Бронева (пластинчатая)	До 100	0,22–0,29	0,29–0,3	0,3–0,32	0,32–0,34	0,34–0,38
		От 100 до 1000	0,19–0,25	0,25–0,26	0,26–0,27	0,27–0,3	0,3–0,33
	Бронева (ленточная)	До 100	0,15–0,27	0,27–0,29	0,29–0,32	0,32–0,34	0,34–0,38
		От 100 до 1000	0,13–0,23	0,23–0,26	0,26–0,27	0,27–0,3	0,3–0,33
	Стержневая (ленточная)	До 100	0,14–0,25	0,25–0,28	0,28–0,29	0,29–0,3	0,3–0,35
		От 100 до 1000	0,12–0,21	0,21–0,24	0,24–0,25	0,25–0,3	0,3
400	Бронева (пластинчатая)	До 100	0,22	0,22–0,27	0,27–0,29	0,29–0,3	0,3–0,34
		От 100 до 1000	0,19	0,19–0,23	0,23–0,25	0,25–0,26	0,26–0,3
	Бронева (ленточная)	До 100	0,17–0,2	0,2–0,22	0,22–0,29	0,29–0,3	0,3–0,34
		От 100 до 1000	0,13–0,17	0,17–0,19	0,19–0,25	0,25–0,26	0,26–0,3
	Стержневая (ленточная)	До 100	0,18	0,18–0,25	0,25–0,28	0,28	0,28–0,3
		От 100 до 1000	0,15	0,15–0,21	0,21–0,24	0,24	0,24–0,3

Таблица 6

Конструкция магнитопровода	Коэффициент заполнения магнитопровода $k_{ст}$ при толщине стали, мм				
	0,08	0,1	0,15	0,2	0,35
Стержневая, бронева (пластинчатая)	-	0,7 (0,75)	-	0,85 (0,89)	0,9 (0,94)
Стержневая, бронева (ленточная)	0,87	-	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 стержневых и броневых сердечников указаны при изготовлении их методом штамповки и гибки ленты.

### 5. Определяем произведение сечения сердечника на площадь окна

$$(Q_{ст} Q_{ок})_p = \frac{S_p \cdot 10^2}{2,22 f B_{выбр} j_{ср} k_{ок} k_{ст}}, \text{ см}^4, \quad (3)$$

где  $S_p$  — расчетная мощность трансформатора, ВА;  
 $f$  — частота, Гц;

$B_{\text{выбр}}$  — индукция, Т (табл. 3);

$j_{\text{ср}}$  — плотность тока, А/мм<sup>2</sup> (табл. 4);

$k_{\text{ок}}$  — коэффициент заполнения окна медью (см. табл. 5 и рис. П5);

$k_{\text{ст}}$  — коэффициент заполнения магнитопровода (табл. 6).

### 6. Определяем отношение

$$k_{\text{Qp}} = \frac{Q_{\text{ст}}}{Q_{\text{ок}}} = 2,22 \frac{k_{\text{ок}}}{k_{\text{ст}}} C_1^2 \alpha; \quad (4)$$

$$C_1 = \sqrt{\frac{1}{2,22} \frac{\gamma_{\text{м}}}{\gamma_{\text{ст}}} \frac{l_{\text{в ср}}}{l_{\text{ст}}}} = 0,717 \sqrt{\frac{l_{\text{в ср}}}{l_{\text{ст}}}}, \quad (5)$$

где  $\alpha$  — отношение массы стали к массе меди (см. прим. к табл. 1);

$\gamma_{\text{м}}, \gamma_{\text{ст}}$  — удельные плотности меди и стали;

$l_{\text{в ср}}$  — средняя длина витка всех обмоток;

$l_{\text{ст}}$  — длина средней магнитной линии.

Значения  $l_{\text{в ср}}$  и  $l_{\text{ст}}$  выражаются через размеры сердечника с помощью формул, приведенных в табл. 7.

Таблица 7

Наименование параметра	Броневой трансформатор		Стержневой двухкатушечный трансформатор	
	пластинчатый $h_{\text{я}}=0,5a$	ленточный	пластинчатый	ленточный
Длина средней магнитной линии $l_{\text{ст}}$	$2(h+c+a)$	$2(h+c)+0,5\pi a$	$2(h+c+2a)$	$2(h+c)+\pi a$
Средняя длина витков $l_{\text{в ср}}$	$2(a+b+2c)$		$2(a+b+c)$	
Открытая поверхность охлаждения сердечника $Q_{\text{серд}}$	$2(a+b)(a+2c+h)+a(4b+2a)$	$2(a+b)(a+2c+h)+\pi a(b+0,5a)$	$2c(2a+b)+8a(a+b)$	$2c(2a+b)+2\pi a(a+b)$
Открытая поверхность катушки $Q_{\text{обм}}$	$2h(a+4c)+2cl_{\text{в ср}}$		$2h(2a+b+3c)+2cl_{\text{в ср}}$	

В формулах табл. 7 обозначено:  $a$  — ширина стержня,  $b$  — толщина пакета пластинчатого сердечника или ширина ленты ленточного сердечника,  $h$  и  $c$  — высота и ширина окна.

Как показывает опыт, значение  $C_1$  для однотипных сердечников мало зависит от размеров и может быть принято равным для трансформаторов с прямоугольными катушками:

$C_1 = 0,7$  — для броневых трансформаторов,

$C_1 = 0,6$  — для стержневых двухкатушечных трансформаторов.

Приняв значение  $C_1$  и подставив крайние значения  $\alpha$  в формулу (4), найдем пределы изменения величины

$$k_{Qp} = k_{Qp_{\min}} \div k_{Qp_{\max}}.$$

### 7. Выбираем типоразмер магнитопровода

Зная произведение ( $Q_{ст}Q_{ок}$ ) и пределы изменения  $k_{Qp}$ , из табл. прил. П2 [5] выбираем стандартный магнитопровод, у которого значение произведения наиболее близко к требуемому, а значение  $k_Q$  лежит в требуемых пределах:

$$k_{Qp_{\min}} \leq k_{Qp_{пред}} \leq k_{Qp_{\max}}. \quad (8)$$

Для выбранного сердечника выписываем  $Q_{ст}$ ,  $Q_{ок}$ ,  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $h$ ,  $l_{ст}$ ,  $l_{в ст}$ ,  $G_{ст}$ .

Зная размеры сердечника, можем с помощью формул (5) и (4) уточнить значения  $C_1$  и  $k_{Qp}$  и затем проверить условие (8) с последующим уточнением значения  $k_{Qp}$ .

При отсутствии в таблицах сердечника с требуемым соотношением размеров следует попытаться подобрать сердечник, изменяя ширину набора  $a'$  так, чтобы получить такой величины, при которой  $\alpha$  будет находиться в требуемых пределах.

$$Q_{ст} = a'b = Q_{ст p}; ch \geq Q_{ок p} \text{ и } k_Q = \frac{a'b}{ch}$$

Если сердечник со стандартными размерами пластин или стандартный ленточный сердечник подобрать не удастся, то проектирование ведется из расчета на нестандартный сердечник. Для этого

а) задавшись  $k_{Qp} = \frac{1}{2}(k_{Qp_{\min}} + k_{Qp_{\max}})$ , находим площадь поперечного сечения сердечника и окна:

$$Q_{ст p} = \sqrt{(Q_{ст}Q_{ок})_p k_{Qp}},$$

$$Q_{ок p} = Q_{ст p} / k_{Qp}; \quad (8')$$

б) приняв оптимальные отношения  $\frac{b}{a} = 1 \div 2$  и  $\frac{h}{c} = 2 \div 3$ , определяем размеры магнитопровода:

$$b = \sqrt{Q_{ст p} \left(\frac{b}{a}\right)}; \quad h = \sqrt{Q_{ок p} \left(\frac{h}{c}\right)};$$

$$a = \frac{b}{\left(\frac{b}{a}\right)}; \quad c = \frac{h}{\left(\frac{h}{c}\right)}. \quad (9)$$

Размеры магнитопровода округляют до целых чисел миллиметров так, чтобы ширина ленты — размер  $b$  ленточного или размер —  $a$  пластинчатого магнитопроводов были стандартными (см. эти размеры в таблицах приложения [3]). Далее определяем  $Q_{выбр ст} = ab$ ,  $Q_{выбр ок} = ch$  и

$$k_{Q_{выбр}} = \frac{Q_{ст}}{Q_{ок}}.$$

$Q_{выбр ок} = ch$  и

Если  $k_{Q_{выбр}}$  лежит в требуемых пределах

$$k_{Qp \text{ min}} \leq k_{Q \text{ выб}} \leq k_{Qp \text{ max}}, \quad (8'')$$

то дальнейшие расчеты следует вести с этими выбранными размерами сердечника. Если  $k_Q$  нестандартного сердечника не укладывается в пределы по формуле (8), то необходимо, используя значения размеров сердечника, полученные по (9), уточнить по формулам (5) и (4) значения  $c_1$  и  $k_{Qp}$ , а по (8') и (9) снова уточнить размеры сердечника. Такие уточнения следует вести, пока не будет выполнено условие (8). Размеры сердечника, округленные до целых миллиметров, при которых  $k_{Qp}$  находится в требуемых пределах по (8), используются во всех последующих расчетах.

Для трехобмоточных трансформаторов активные и индуктивные сопротивления вторичных обмоток растут по мере их удаления от первичной обмотки. Поэтому при расчете рекомендуется принимать значения  $\Delta U_2$  или  $\Delta U_3$  для обмотки, расположенной непосредственно на стержне или на первичной обмотке на 10–20% меньше, а для наружной обмотки — на 10–20% больше указанных для  $\Delta U_2$  в табл. 8.

**Таблица 8**

Частота, Гц	Конструкция магнитопровода	Величина $\Delta U$	Расчетная мощность $S_p$ , ВА				
			5-15	15-50	50-150	150-300	300-1000
50	Бронева	$\Delta U_1, \%$	20-13	13-6	6-4,5	4,5-3	3-1
	Стержневая	$\Delta U_2, \%$	25-18	18-10	10-8	8-6	6-2
400	Бронева	$\Delta U_1, \%$	18-12	12-5,5	5,5-4	4-3	3-1
		$\Delta U_2, \%$	33-17	17-9	9-6	6-4	4-2
	Стержневая	$\Delta U_1, \%$	10-8	8-4	4-1,5	1,5-1,0	1,0-0,5
		$\Delta U_2, \%$	10-8,5	8,5-5	5-2	2-1,2	1,2-0,5
		$\Delta U_1, \%$	7-5	5-2	2-1	1-1	1-0,5
		$\Delta U_2, \%$	8-6,5	6,5-3	3-1,5	1,5-1	1-0,5

При оптимальном соотношении плотностей тока в обмотках ( $j_1 > j_2$ ), что рекомендуется выполнять при расчете при заданном падении напряжения, значения  $\Delta U_2$ , и  $\Delta U_3$ , можно принимать равными значению  $\Delta U_1$ , по табл. 8.

Поэтому при расчете трансформаторов при заданном падении напряжения следует принимать

$$\Delta U_1 = \Delta U_2 = \frac{\Delta U_{12 \text{ здн}}}{2},$$

$$\Delta U_3 = \Delta U_{13 \text{ здн}} - \Delta U_1$$

$\Delta U_{12 \text{ здн}}$  и  $\Delta U_{13 \text{ здн}}$  — падения напряжения на вторичных обмотках при их номинальной нагрузке; они заданы в табл. 1).

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧИСЛА ВИТКОВ ОБМОТОК

**8. Определение падения напряжения.** Если падения напряжений на обмотках выразить в процентах от номинальных значений напряжений на соответствующих обмотках, то значения ЭДС примут вид:

$$E_1 = U_1 (1 - \Delta U_1 \cdot 10^{-2});$$

$$\begin{aligned} E_2 &= U_2 (1 + \Delta U_2 \cdot 10^{-2}); \\ E_3 &= U_3 (1 + \Delta U_3 \cdot 10^{-2}). \end{aligned} \quad (10)$$

Значения относительных величин падения напряжения в первичной  $\Delta U_1$  и вторичных  $\Delta U_2$  и  $\Delta U_3$  обмотках трансформатора определяются по величине  $S_p$  и  $f$  для выбранной конфигурации магнитопровода с учетом расчетных условий.

При расчете трансформатора на минимум стоимости последовательность намотки зависит от диаметра провода обмоток. Чем меньше диаметр провода обмотки, тем ближе она располагается к стержню, так как 1 кг тонкого провода дороже 1 кг толстого провода.

В остальных случаях первой обычно наматывается сетевая обмотка, а затем вторичные — в порядке возрастания диаметра провода.

Для оценки порядка расположения обмоток при расчёте на минимум стоимости предварительно определяем их токи:

$$I'_1 = \frac{S_p}{U_1}; \quad I_2 = \frac{S_2}{U_2}; \quad I_3 = \frac{S_3}{U_3}.$$

Значение  $S_p$  определено в п. 1;  $U_1$ ,  $U_2$ ,  $U_3$ ,  $S_2$  и  $S_3$  заданы.

При одинаковой средней плотности тока диаметр провода будет пропорционален току в обмотке. В табл. 8 приведены ориентировочные значения падения напряжения для двухобмоточных трансформаторов (с наибольшим напряжением вторичной обмотки до 1000 В), работающих при среднем превышении температуры обмоток  $50^\circ\text{C}$ .

При расчете при заданной максимальной температуре значение  $\Delta U_1$ , выбирается по табл. 8, значения  $\Delta U_2$  и  $\Delta U_3$ , принимаются равными  $\Delta U_2$  % в этой же таблице и уточняются в соответствии с расположением обмоток, их мощностями и напряжениями.

При низких напряжениях (до 10-12 В) и мощностях до 50 В А величину падения напряжения во вторичных обмотках следует увеличивать на 15-20% по сравнению с его величиной, указанной для  $\Delta U_2$  % в табл. 8.

Порядок определения  $\Delta U_1$ ,  $\Delta U_2$  и  $\Delta U_3$  при заданном падении напряжения был приведен в конце п. 7.

### 9. Электродвижущая сила на виток

$$E_e = 4,44 f B_{\text{выбр}} Q_{\text{ст выб}} k_{\text{ст}} 10^{-4}, \text{ В}, \quad (11)$$

$Q_{\text{ст выб}}$  берется в  $\text{см}^2$ .

### 10. Число витков обмоток

$$\omega'_1 = \frac{E_1}{E_e}; \quad \omega'_2 = \frac{E_2}{E_e}; \quad \omega'_3 = \frac{E_3}{E_e}; \quad (12)$$

$E_1$ ,  $E_2$ ,  $E_3$ , определены по формулам (10).

Если число витков обмотки низшего напряжения  $\omega'_3$  получилось дробным, то его следует округлить до целого числа  $\omega_3$ , и затем произвести перерасчет чисел витков других обмоток и магнитной индукции по формулам:

$$\omega_1 = \omega'_1 \frac{\omega_3}{\omega'_3}; \quad \omega_2 = \omega'_2 \frac{\omega_3}{\omega'_3}; \quad B_c = B_{\text{выбр}} \frac{\omega'_3}{\omega_3}.$$

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТЕРЬ В СТАЛИ И НАМАГНИЧИВАЮЩЕГО ТОКА

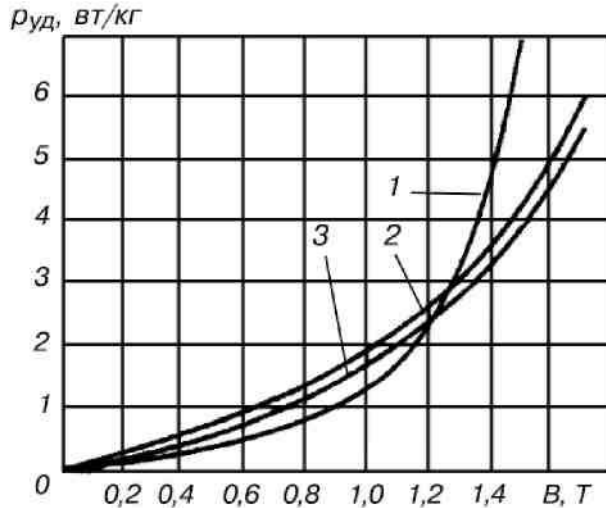
**11. Определяем потери в стали.** Для сердечников из стали Э340, Э42, Э44 и Э310 потери в стали определяются по формуле:

$$P_{ст} = p_{уд} G_{ст}, \text{ Вт}, \quad (13)$$

где  $p_{уд}$  — удельные потери, Вт/кг;

$G_{ст}$  — масса стали, кг.

Величина удельных потерь в сердечнике зависит от значения магнитной индукции  $B$ , марки стали, толщины листа, частоты сети и типа сердечника. Она определяется по кривым на рис. 3 или 4.



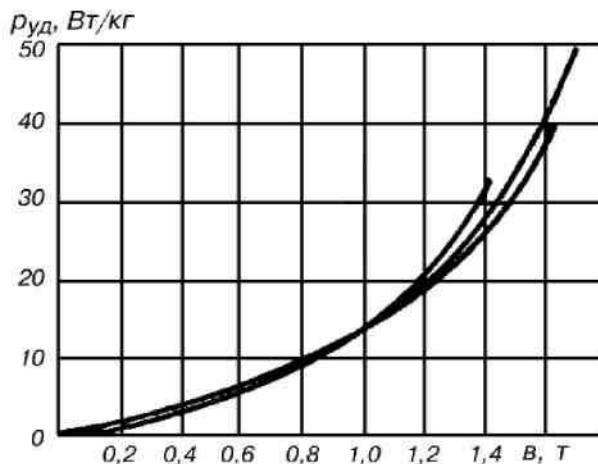
**Рис. 3.** Удельные потери в сердечниках из трансформаторных сталей толщиной 0,35 мм на частоте 50 Гц: 1 — броневые сердечники из стали Э42; 2 — стержневые сердечники из стали Э310; 3 — броневые сердечники из стали Э310.

Для нестандартных трансформаторов масса стали определяется:

$$G_{ст} = \gamma_{ст} V_{ст} = \gamma_{ст} l_{ст} Q_{ст} \text{выбр} k_{ст}, \quad (15)$$

где  $\gamma_{ст} = 7,8 \cdot 10^{-3} \text{ кг/см}^3$ ;

$l_{ст}$  — определяется по табл. в [3] или по формулам, приведенным в табл. 7.



**Рис. 4.** Удельные потери в сердечниках из трансформаторных сталей на частоте 400 Гц: 1 — броневые сердечники из стали Э44 толщиной 0,2 мм; 2 — стержневые сердечники и 3 — броневые сердечники из сталей Э340 толщиной 0,15 мм.

**12. Активная составляющая намагничивающего тока**

$$I_{0a} = \frac{P_{cm}}{E_1}. \quad (16)$$

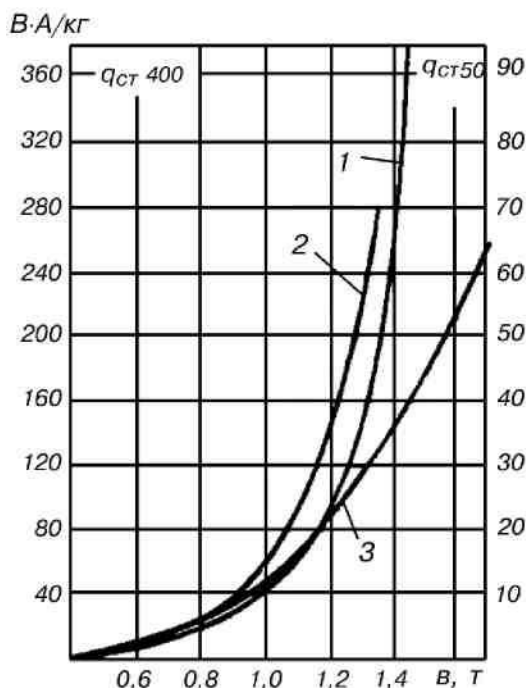
**13. Намагничивающая мощность в стали для броневых сердечников из сталей марок Э42, Э44 и Э340**

$$Q = q_{ст} G_{ст}, \quad (17)$$

где  $q_{ст}$  — удельная намагничивающая мощность, ВА/кг;

$G_{ст}$  — масса стали, кг.

Величина удельной намагничивающей мощности  $q_{ст}$  зависит от значения магнитной индукции в сердечнике  $B_c$  марки стали, толщины листа, конструкции магнитопровода и его геометрических размеров, а также от частоты сети. Она определяется по кривым, приведенным на рис. 5.



**Рис. 5. Удельная намагничивающая мощность для броневых сердечников из сталей:**  
 1 — Э42, толщина 0,35 мм; 50 Гц; 2 — Э44, толщина 0,2 мм, 400 Гц;  
 3 — Э340, толщина 0,15 мм, 400 Гц

**14. Реактивная составляющая намагничивающего тока**

$$I_{op} = \frac{Q}{E_1}, A. \quad (18)$$

Для трансформаторов, изготавливаемых из марок стали, для которых на рис. 5 не приведены зависимости  $a = f(B)$ , и для стержневых трансформаторов значение  $I_{op}$  определяется по формуле

$$I_{op} = \frac{H_c l_{cm} + 0,8 B_c n \delta_s \cdot 10^4}{\omega_1 \sqrt{2}}, \quad (19)$$

где  $H_c$  — напряженность поля в стали (А/см), определяемая для индукции  $B_c$  из кривых намагничивания, приведенных на рис. 6–9;

$n$  — число зазоров (стыков) на пути силовой линии; для стержневых и броневых трансформаторов рекомендуется выбирать конструкцию сердечника с числом стыков  $n = 2$ ;

$\delta_3$  — величина эквивалентного воздушного зазора в стыках сердечника трансформатора; для шихтованных сердечников  $\delta_3 = 0,002 — 0,004$  см и для ленточных разрезных  $\delta_3 = 0,0015–0,003$  см;

$\omega_1$  — число витков первичной обмотки;

$l_{ст}$  — средняя длина силовых линий, см (приведены в [3] прил. П. 2 или определяется по формулам в табл. 7).

Для сердечников типа ШЛМ напряженность  $H$  определяется по кривым, приведенным на рис. 6 и 7.

Если выбран тип сердечника, для которого на рис. 6–9 нет кривых намагничивания, то в этом случае для определения напряженности можно воспользоваться кривыми, приведенными на одном из рисунков для сердечника, у которого размеры стержня наиболее близко подходят к размерам проектируемого трансформатора.

### 15. Ток первичной обмотки при номинальной нагрузке

$$I_1 = \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1p}^2}, \quad (20)$$

$$\text{где } I_{1a} = I_{0a} + I'_{2a} + I'_{3a}; \quad (21)$$

$$I_{1p} = I_{0p} + I'_{2p} + I'_{3p}; \quad (22)$$

$$I'_{2a} = \frac{S_2 \cos \varphi_2}{U_2} \frac{\omega_2}{\omega_1}; \quad (23)$$

$$I'_{3a} = \frac{S_3 \cos \varphi_3}{U_3} \frac{\omega_3}{\omega_1}; \quad (24)$$



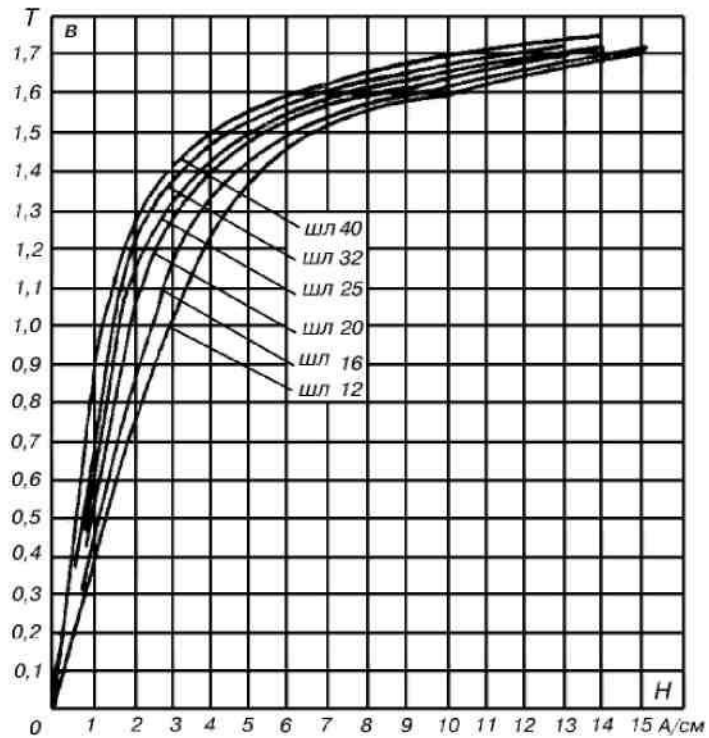


Рис. 6. Зависимость магнитной индукции от напряженности поля в броневых сердечниках из стали Э310 толщиной 0,35 мм (частота 50 Гц)

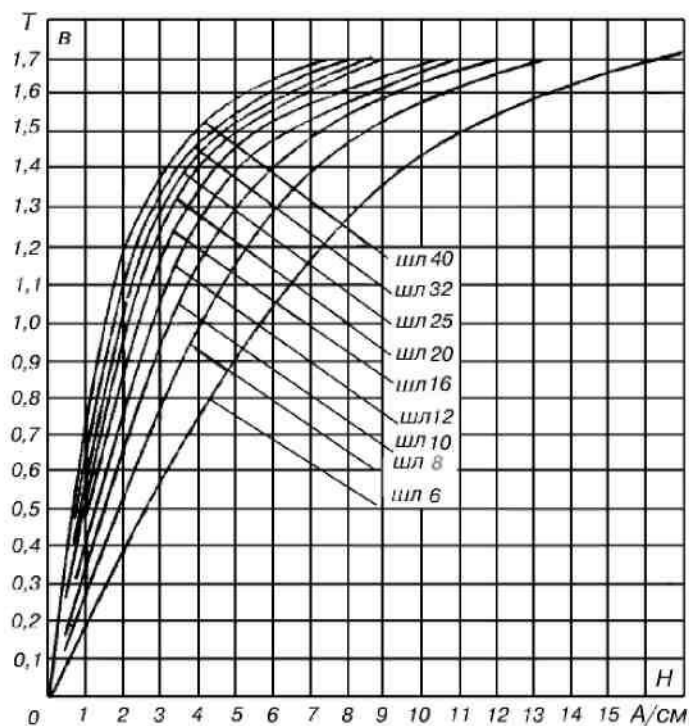
$$I'_{2p} = \frac{S_2 \sin \varphi_2}{U_2} \frac{\omega_2}{\omega_1}; \quad (25)$$

$$I'_{3p} = \frac{S_3 \sin \varphi_3}{U_3} \frac{\omega_3}{\omega_1}; \quad (26)$$

$I'_{2a}$ ,  $\Gamma_{3a}$ ,  $I'_{2p}$  и  $\Gamma_{3p}$  — приведенные значения активной и реактивной составляющих токов вторичных обмоток.

#### 16. Ток холостого хода

$$I_{10} = \sqrt{I_{0a}^2 + I_{0p}^2}. \quad (27)$$



**Рис. 7. Зависимость магнитной индукции от напряженности поля в броневых сердечниках из стали Э340 толщиной 0,15 мм (частота 400 Гц)**

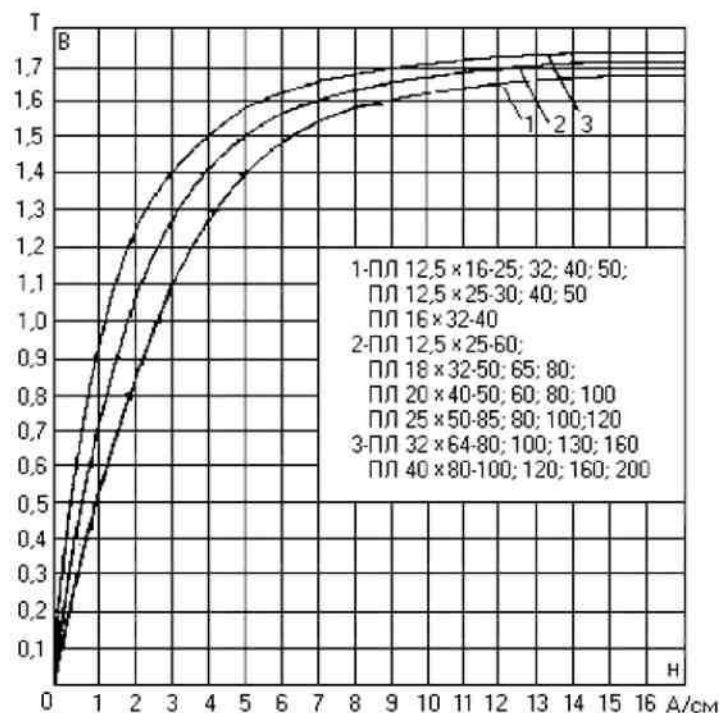
**17. Относительное значение тока холостого хода**

$$\frac{I_{10}}{I_1}, \text{ о. е.}$$

(28)

Оценка результатов выбора магнитной индукции. Если величина относительного тока холостого хода при частоте 50 Гц лежит в пределах 0,3–0,5, а при частоте 400 Гц — в пределах 0,1–0,2, то выбор магнитопровода на этой стадии расчета можно считать окончанным.

При частоте 50 Гц и мощности трансформатора больше 500 В·А значение относительного тока холостого хода может снижаться до 0,15.



**Рис. 8. Зависимость магнитной индукции от напряженности поля в стержневых сердечниках из стали Э310 толщиной 0,35 мм (частота 50 Гц)**

Если значение относительного тока холостого хода больше 0,5 (при 50 Гц) или больше 0,2 (при 400 Гц), то следует уменьшить магнитную индукцию. Если значение относительного тока холостого хода меньше 0,3 при частоте 50 Гц или меньше 0,1 при частоте 400 Гц, то индукцию в магнитопроводе можно увеличить, если это допустимо по условиям нагрева.

Расчет следует повторять до тех пор, пока относительный ток холостого хода будет лежать в указанных пределах.

#### **19. Коэффициент мощности**

$$\cos \varphi_1 = \frac{I_{1a}}{I_1}$$

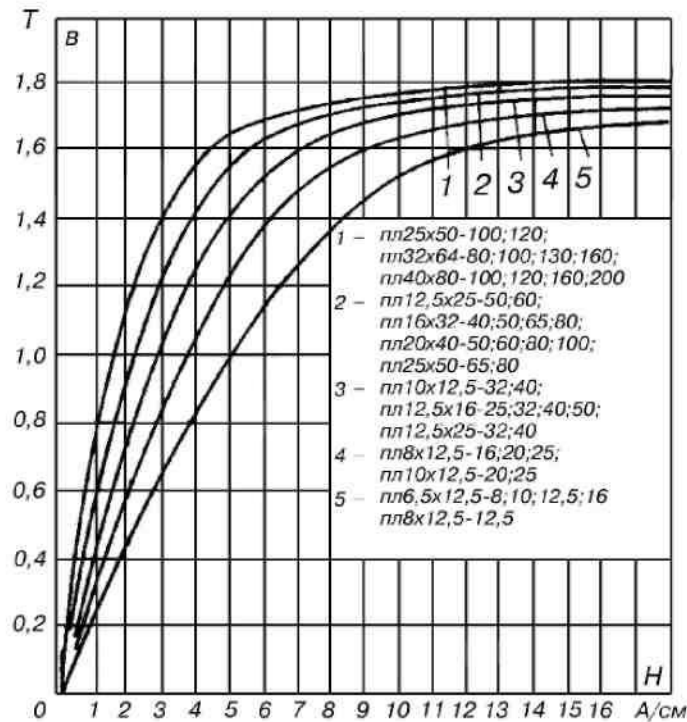


Рис. 9. Зависимость магнитной индукции от напряженности поля в стержневых сердечниках из стали Э340 толщиной 0,15 мм (частота 400 Гц)

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ И КОНСТРУКТИВНЫЙ РАСЧЁТ ОБМОТОК

**20. Выбор плотностей тока в обмотках.** Зная среднее значение плотности тока  $j_{\text{ср}}$  (см. п. 1), найдем плотность тока всех обмоток.

Плотность тока во вторичных обмотках  $j_2$  и  $j_3$ , расположенных над первичной, т. е. при расположении обмоток в порядке 1, 2, 3, берется меньше, чем в первичной, на 30% для трансформаторов с броневыми магнитопроводами и на 15%, для трансформаторов со стержневыми магнитопроводами. В этом случае принимают: для броневого трансформатора,  $j_1 = 1,15 j_{\text{ср}}$ ;  $j_2 = j_3 = 0,85 j_{\text{ср}}$ , а для стержневого трансформатора  $j_1 = 1,08 j_{\text{ср}}$ ;  $j_2 = j_3 = 0,92 j_{\text{ср}}$ .

В случае расположения обмоток в порядке 2, 1, 3 (где обмотка № 2 является выходной обмоткой большего напряжения) следует принять  $j_1 = j_2 = j_{\text{ср}}$ ;  $j_3 = 0,925 j_{\text{ср}}$

Выбранные плотности тока используются лишь для предварительного определения сечений и диаметров проводов. Окончательно эти величины могут быть определены только после выполнения конструктивного и теплового расчета обмоток.

### 21. Ориентировочные значения сечения проводов

$$q_1 = \frac{I_1}{j_1}; \quad q_2 = \frac{I_2}{j_2}; \quad q_3 = \frac{I_3}{j_3};$$

$$\text{где } I_2 = \frac{S_2}{U_2}; \quad I_3 = \frac{S_3}{U_3}.$$

**22. По табл. прил. П 1 [3] выбираем стандартные сечения и диаметры проводов и выписываем необходимые справочные данные  $q_{\text{пр}}$ ,  $d_{\text{пр}}$ ,  $d_{\text{из пр}}$ ,  $g_{\text{пр}}$ .**

Выбор марки провода определяется величиной рабочего напряжения обмотки и предельно допустимой температурой провода.

При напряжении обмоток до 500 В и токах до нескольких ампер рекомендуется применять провода марок ПЭВ-1.

При напряжении обмоток более 500 В рекомендуется применять провод марки ПЭВ-2.

Находим фактические плотности тока в проводах по формуле

$$j_{i \text{ факт}} = \frac{I_i}{q_{пр i}}, \text{ где } i \text{ — номер обмотки.}$$

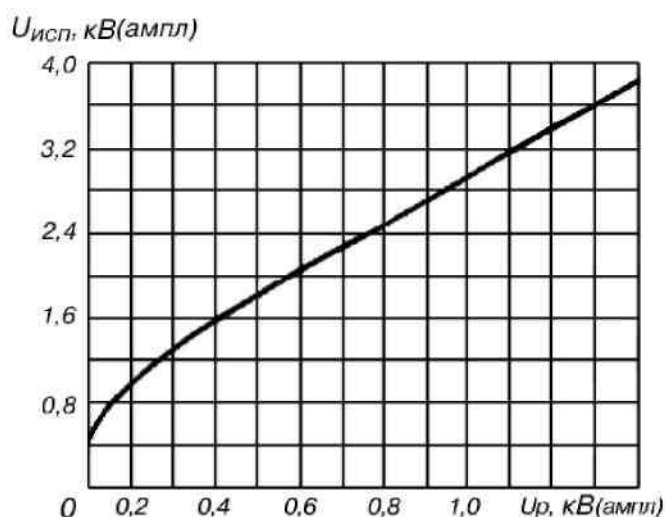
### 23. Вычисляем амплитудные значения рабочих напряжений и определяем испытательные напряжения

$$U_{р \text{ макс}} = \sqrt{2} \cdot U_p, \text{ В.} \quad (30)$$

Определяем по кривой на рис. 10 испытательные напряжения обмоток и записываем их.

**24. Определяем изоляционные расстояния.** Для обеспечения надежной работы обмоток необходимо выбирать изоляционные расстояния так, чтобы во время работы в нормальных условиях и при испытании повышенным напряжением катушка трансформатора не повреждалась. Под изоляционными расстояниями понимаются (рис. 11):

1. расстояния от крайнего витка обмотки до сердечника ( $h_{из 1}, h_{из 2}, h_{из 3}$ );
2. расстояние от первого слоя первичной обмотки до сердечника через сплошную изоляцию гильзы или каркаса ( $h_{из ос}$ );
3. расстояние между соседними слоями двух обмоток через сплошную межобмоточную изоляцию ( $h_{из мо}$ );
4. толщина внешней (наружной) изоляции поверх последней обмотки ( $h_{из н}$ ).



**Рис. 10. Зависимость испытательного напряжения от рабочего напряжения обмотки в амплитудных значениях**

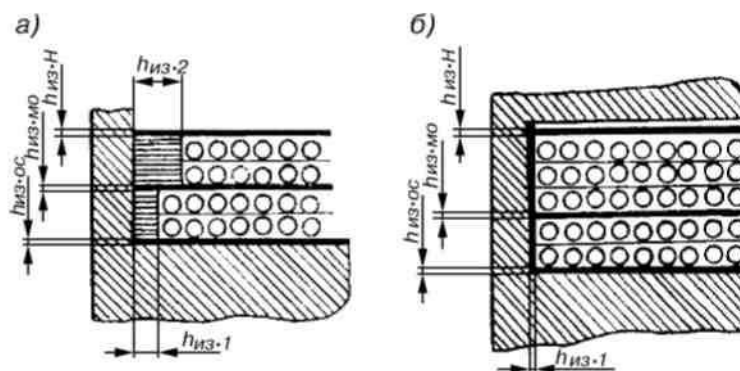


Рис. 11. Изоляционные расстояния при размещении обмоток на гильзе (а) и каркасе (б)

**25. Проверка размещения обмоток в окне.** На рис. 11 приведены эскизы размещения обмоток двухобмоточного трансформатора на гильзе и штампованном каркасе с указанием изоляционных расстояний.

Экспериментальные данные показывают, что при напряжениях обмоток до 500 В допустимые величины  $h_{из\ 1}$ ,  $h_{из\ 2}$  и  $h_{из\ 3}$  для большинства изоляционных материалов, применяемых в трансформаторах малой мощности, должны быть не менее 2 мм (при намотке на гильзу) как по условиям электрической прочности концевой изоляции, так и для того, чтобы избежать западания крайних витков соседних слоев обмотки. При величинах рабочего напряжения от 500 до 1000 В величины  $h_{из\ 1}$ ,  $h_{из\ 3}$  определяются лишь требованиями электрической прочности и лежат в пределах от 2 до 5 мм.

При намотке на каркас величина  $h_{из\ 1}$  при напряжениях до 1000 В определяется лишь требованиями его механической прочности и составляет (в зависимости от диаметра провода) 1,5–3 мм.

С целью закрепления витков обмоток и предотвращения их сползания свободное пространство между крайними витками и краем гильзы (каркаса) заполняют теми же материалами, которые применяются для межобмоточной и межслоевой изоляции.

В пояснительной записке к курсовому проекту необходимо привести эскиз, с указанием всех изоляционных расстояний в мм при размещении обмотки на гильзе или каркасе, а также материал и число слоев для межслоевой, межобмоточной и внешней (наружной) изоляции поверх последней обмотки. На эскизе должны быть указаны все необходимые размеры катушки.

**26. Определяем осевую длину каждой обмотки.** Обычно длину гильзы берут на 1 мм короче высоты окна магнитопровода. Тогда при намотке на гильзе осевая длина каждой обмотки будет

$$h_d = h_1 - 2h_{из\ i}, \quad (31)$$

где  $h_1 = h - 1$  — длина гильзы (каркаса), мм;

$h$  — высота окна, мм;

$h_{из\ i}$  — длина концевой изоляции  $i$ -обмотки, мм.

При намотке на каркасе допустимую осевую длину обмотки находим по формуле

$$h_d = h_1 - 2h_{из\ 1}, \quad (32)$$

где  $h_{из\ 1}$  — толщина щечки каркаса (1,5–3 мм).

**27.** Толщину гильзы принимаем равной 1–2 мм, а толщину 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-3Б (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.

**28.** Толщина межслоевой изоляции ( $h_{из\ мс}$ ) зависит от диаметра провода и величины испытательного напряжения обмотки и выбирается по табл. 9.

**Таблица 9**

Диаметр провода, мм	Межслоевая изоляция		Испытательное напряжение, В
	Материал	Суммарная толщина, мм	
До 0,15	Конденсаторная бумага КОН – 1	0,011 - 0,022	300 - 425
0,15 - 0,5	Телефонная бумага КТН	0,05	500
0,5 - 0,8	Пропиточная бумага ЭИП - 50	0,09	500
0,8 - 1,2	Пропиточная бумага ЭИП-63Б или кабельная бумага К- 12	0,11	1000
		0,12	1000
Более 1,2	Два слоя бумаги ЭИП - 63Б или кабельной бумаги К – 12	2 x 0,11	2000
		2 x 0,12	2000

В обмотках, намотанных проводами диаметром менее 0,5 мм, межслоевая изоляция прокладывается через ряд слоев с суммарным напряжением между крайними слоями  $U_{мс}$  не более 150 В.

В обмотках из проводов диаметром более 0,5 мм межслоевую изоляцию прокладывают между всеми слоями.

**29.** Толщина межобмоточной изоляции 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 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.

**30.** Количество слоев наружной изоляции 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.

**31. Число витков в одном слое каждой обмотки** находим по формуле

$$\omega_c = \frac{h_d}{k_{y1} d_{из пр}}, \quad (33)$$

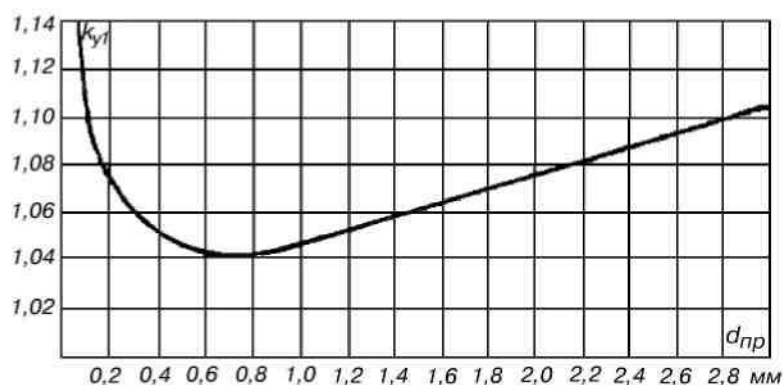
где  $k_{y1}$  — коэффициент укладки провода в осевом направлении, определяется по кривой на рис. 12;

$h_d$  и  $d_{из пр}$  — определены ранее.

Если  $\omega_c$  получается дробным, то его округляют до ближайшего, меньшего целого числа.

**32. Число слоев определяем из выражения**

$$N_{сл} = \frac{\omega}{\omega_c}. \quad (34)$$



**Рис. 12. Зависимость коэффициента укладки в осевом направлении от диаметра провода**

Под величиной  $\omega$  в выражении (34) понимают для броневого и стержневого однокатушечных трансформаторов полное число витков обмотки; для стержневых двухкатушечных трансформаторов—половинное число витков обмотки. Количество  $N_{сл}$  округляют до ближайшего большего целого числа.

**33. Радиальный размер каждой обмотки** при диаметре провода  $d_{пр}$  с изоляцией больше 0,5 мм вычисляем по формуле

$$\alpha_i = k_{y2} N_{сл} d_{из пр} + k_{мс} (N_{сл} - 1) h_{из мс}. \quad (35)$$

При диаметре провода с изоляцией меньше 0,5 мм во втором члене выражения (35)

следует вместо  $(N_{сл} - 1)$  подставлять  $\left(\frac{U_p}{150} - 1\right)$ , округляя полученный коэффициент до большего целого числа. Величину коэффициента укладки в радиальном направлении  $k_{y2}$  в зависимости от диаметра провода определяют по рис. 13.





Рис. 13. Зависимость коэффициента укладки в радиальном направлении от диаметра провода

Толщину межслойной изоляции  $h_{из\ мс}$  определяют на основании приведенных выше рекомендаций; коэффициент неплотности межслойной изоляции  $k_{мс}$  определяется по кривым, приведенным на рис. 14, в зависимости от диаметра провода и толщины изоляции.

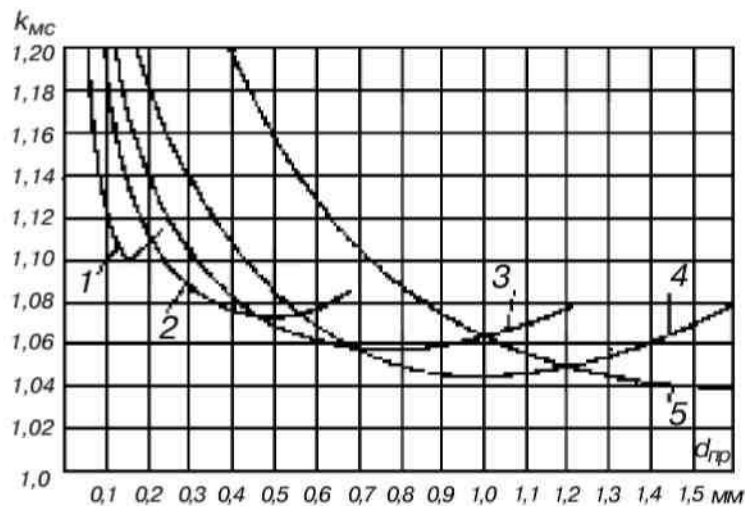


Рис. 14. Зависимость коэффициента неплотности межслойной изоляции от диаметра провода. При ее толщине: 1 — 0,022 мм, 2 — 0,05 мм, 3 — 0,09 мм, 4 — 0,11 мм, 5 — 0,20 мм

**34. Полный радиальный размер катушки** определяется из выражения для чередования обмоток 1, 2, 3

$$\alpha_{кат} = \Delta_3 + (h_{из\ oc} + \alpha_1 + k_{мо} h'_{из\ мо} + \alpha_2 + k_{мо} h''_{из\ мо} + \alpha_3 + k_{но} h_{из\ н}) k_в, \quad (36)$$

где  $\Delta_3$  — зазор между гильзой (каркасом) и сердечником, принимается равным 0,5 мм;

$h_{из\ oc}$  — толщина гильзы (каркаса) с учетом дополнительной изоляции поверх каркаса, мм;

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  — радиальные размеры обмоток, мм;

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

$h'_{из\ mo}, h''_{из\ mo}$  — толщина межобмоточной изоляции, мм;

$k_{mo}$  — коэффициент неплотности межобмоточной изоляции, определяется по рис. 15;

$k_B$  — коэффициент выпучивания (учитывается только при выполнении обмотки на гильзе) в радиальном направлении; определяется по рис. 16, в зависимости от диаметра провода с учетом отношения  $b/a$ , выбранного типоразмера магнитопровода (при выполнении обмотки на каркасе принимается  $k_B=1$ );

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

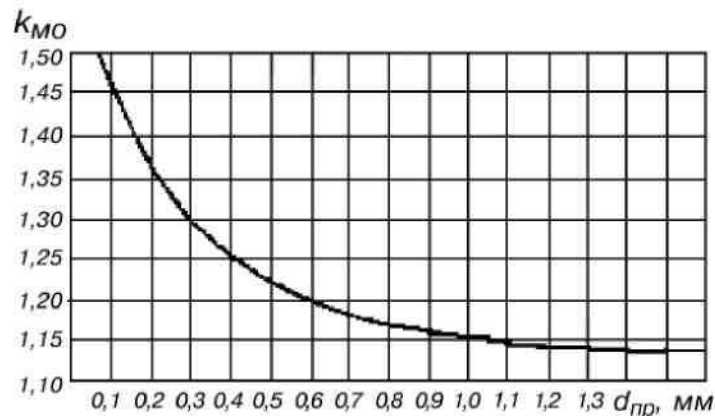


Рис. 15. Зависимость коэффициента неплотности межобмоточной изоляции от диаметра провода

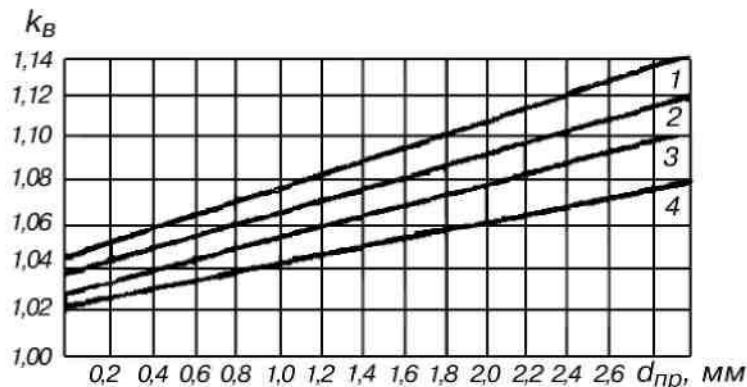


Рис. 16. Зависимость коэффициента выпучивания в радиальном направлении от диаметра провода и конструкции гильзы:

1 —  $b/a = 2,0$ ; 2 —  $b/a = 1,6$ ; 3 —  $b/a = 1,25$ ; 4 —  $b/a = 1$

Для чередования обмоток 2, 1, 3

$$\alpha_{кат} = \Delta_3 + (h_{из\ oc} + \alpha_2 + k_{mo} h''_{из\ mo} + \alpha_1 + k_{mo} h'_{из\ mo} + \alpha_3 + k_{но} h_{из\ и}) k_B, \quad (36')$$

**35. Определяем зазор между катушкой и сердечником** (для броневых трансформаторов) или двумя катушками (для стержневых трансформаторов). Если величина этого зазора, равная  $s - a_{кат}$  для броневых трансформаторов и  $s - 2a_{кат}$  для стержневых трансформаторов, лежит в пределах от 0,5 до 1 мм, то катушка нормально укладывается в окне магнитопровода. Если полученный зазор меньше указанного, то необходимо уточнить значение

$k_{ок}$  и вернуться к п. 4 расчета. В случае применения пластин нестандартных размеров можно увеличить площадь окна в пределах соотношения  $h/c=2\div 3$  и уточнить  $P_{ст}$  по (13),  $G_{ст}$  по (15),  $Q$  по (17) и  $I_{10}$  по (27) и (28).

**36. Находим среднюю длину витка обмоток.** Средняя длина витка может быть определена на основании рис. 17, а — для броневых и рис. 17, б — для стержневых трансформаторов из выражений, м:

$$l_{ср\ в 1} = [2(a_k + b_k) + 2\pi r_1] \cdot 10^{-3}, \quad (37)$$

где  $a_k$  и  $b_k$  — наружные размеры каркаса или гильзы, мм;

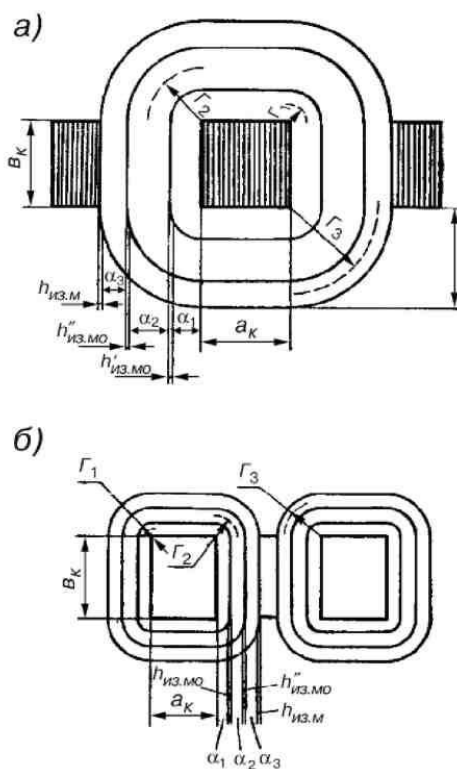
$$a_k = a + 2\Delta_3 + 2h_{из\ о с} k_s; \quad (38)$$

$$b_k = b + 2\Delta_3 + 2h_{из\ о с} k_s; \quad (39)$$

$\Delta_3$  — зазор между гильзой (каркасом) и сердечником, мм, см. формулу (36),

$$l_{ср\ в 2} = [2(a_k + b_k) + 2\pi r_2] \cdot 10^{-3}, \quad (40)$$

$$l_{ср\ в 3} = [2(a_k + b_k) + 2\pi r_3] \cdot 10^{-3}. \quad (41)$$



**Рис. 17. К определению средней длины витка броневых (а) и стержневых (б) трансформаторов**

Когда обмотки наматываются в последовательности 1-я, 2-я, 3-я, значения  $r_1, r_2, r_3$  определяются по формулам:

$$r_1 = \frac{1}{2} \alpha_1 k_s, \text{ мм}; \quad (42)$$

$$r_2 = \left( \alpha_1 + h'_{из.мо} k_{мо} + \frac{1}{2} \alpha_2 \right) k_s, \text{ мм}. \quad (43)$$

$$r_3 = \left( \alpha_1 + h'_{из.мо} k_{мо} + \alpha_2 + h''_{из.мо} k_{мо} + \frac{1}{2} \alpha_3 \right) k_s, \text{ мм}. \quad (44)$$

При намотке обмоток в последовательности 2-я, 1-я, 3-я значения  $r_1, r_2, r_3$  определяются по формулам:

$$r_1 = \left( \alpha_2 + h''_{из.мо} k_{мо} + \frac{1}{2} \alpha_1 \right) k_s, \text{ мм}; \quad (42')$$

$$r_2 = \frac{1}{2} \alpha_2 k_s, \text{ мм}; \quad (43')$$

$$r_3 = \left( \alpha_2 + h''_{из.мо} k_{мо} + \alpha_1 + h'_{из.мо} k_{мо} + \frac{1}{2} \alpha_3 \right) k_s, \text{ мм}. \quad (44')$$

### 37. Массу меди каждой обмотки находим из выражения

$$G_m = l_{ср.в} \omega g_{пр} \cdot 10^{-3}, \text{ кг}. \quad (45)$$

где  $l_{ср.в}$  — средняя длина витка, м;

$\omega$  — общее число витков обмотки;

$g_{пр}$  — масса 1 м провода, г (берется из прил. П. 1, [3]). Общую массу провода катушки находим суммированием масс отдельных обмоток.

Проверяем значение  $\alpha$ :

$$\alpha = \frac{G_{см}}{G_m}.$$

Если полученное значение  $\alpha$  не лежит в рекомендованных пределах, то необходимо уточнить расчет с учетом рекомендаций в п. 46.

### 38. Находим потери в каждой обмотке по формуле

$$P_{mi} = 2,65 j^2_{i \text{ факт}} G_{mi}, \quad (46)$$

Потери в катушках равны сумме потерь в отдельных обмотках:

$$P_m = P_{m_1} + P_{m_2} + P_{m_3}. \quad (47)$$

Проверяем значение  $\beta$ :

$$\beta = \frac{P_m}{P_{см}}.$$

Если полученное значение  $\beta$  не лежит в рекомендованных пределах, то необходимо изменить плотность тока в обмотках  $j$  и индукцию  $B$  в сердечнике, как рекомендовано в п. 46.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НАГРЕВА ТРАНСФОРМАТОРА

**39 Тепловой расчет трансформатора** производится по методу электротепловых аналогий, изложенному в [2]. В этом методе используется формальная аналогия между процессами переноса тепла и электричества. При этом распределенные тепловые параметры трансформатора моделируются сосредоточенными электрическими параметрами, распределенные источники тепла — сосредоточенными источниками электрических потерь и распределенные тепловые сопротивления — сосредоточенными активными сопротивлениями. Затем составляется электрическая схема, моделирующая процессы теплопередачи в трансформаторе.

Для такой схемы на основании законов Кирхгофа можно составить систему алгебраических уравнений, при решении которой устанавливается связь между потенциалами (температурами нагрева), токами (тепловыми потоками) и сопротивлениями (тепловыми сопротивлениями) для узловых точек схемы (катушки и сердечника).

Для определения максимального превышения температуры катушки и максимального значения среднеобъемной температуры обмотки можно использовать тепловые схемы, изображенные на рис. 18.

На этом рисунке приняты следующие обозначения:

$P_M$  — тепловой поток, мощность которого равна электрическим потерям в обмотке (потерям в меди);

$P_{ст}$  — тепловой поток, мощность которого равна магнитным потерям в стали сердечника;

$P'_M, P''_M, P'_{ст}$  — тепловые потоки в ветвях схемы замещения;

$R_M$  — тепловое сопротивление катушки собственному потоку потерь;

$x$  — тепловое сопротивление катушки для потока, идущего от максимально нагретой области до гильзы, величина которого зависит от проходящего через него потока;

$R_r$  — тепловое сопротивление гильзы;

$R^{\circ}_M, R^{\circ}_c$  — тепловые сопротивления граничных слоев: поверхность катушки — среда и поверхность сердечника — среда соответственно.

Так как на практике тепловые сопротивления сердечника собственному и проходящему тепловым потокам значительно меньше  $R^{\circ}_c$ , то они в расчете не учитываются.

Когда максимально нагретая область трансформатора находится внутри катушки — наиболее часто встречающийся случай (рис. 18, *a*) — тепловой поток ( $P_M$ ), создаваемый катушкой, распадается на две составляющие и проходит в окружающую среду по двум путям: одна составляющая ( $P_M - P'_M$ ) идет только через часть катушки, преодолевая сопротивления  $R_M - x$  и  $R^{\circ}$ , другая составляющая ( $P'_M$ ) проходит через другую часть катушки, гильзу, далее через сердечник и преодолевает при этом сопротивления  $x, R_r$  и  $R^{\circ}_c$ .

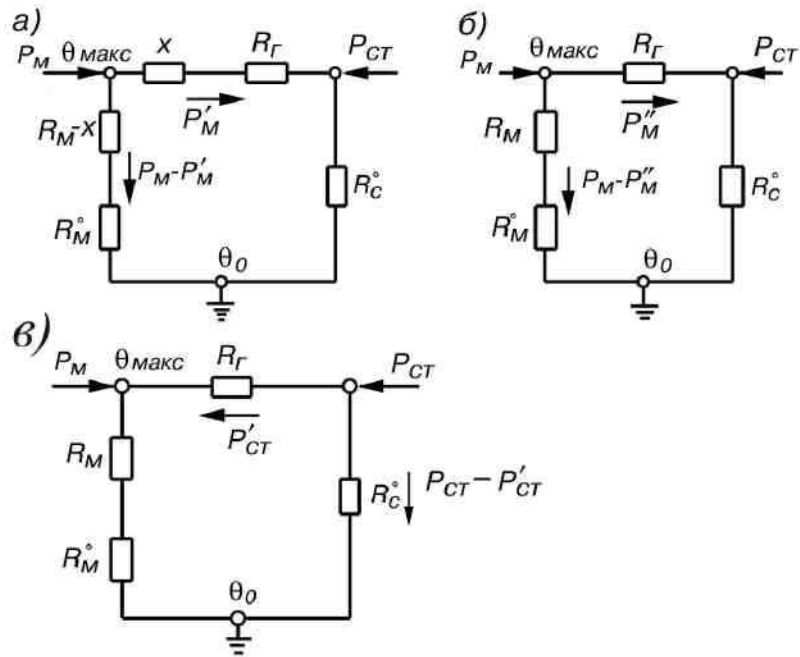


Рис. 18. Расчетные тепловые схемы замещения трансформатора при расположении максимально нагретой области: *a* — внутри катушки (тепловой поток направлен от катушки к сердечнику); *б* — на гильзе (тепловой поток направлен от сердечника к катушке); *в* — в сердечнике (тепловой поток направлен от сердечника к катушке)

40. Определяем по табл. 10 и 11 для выбранного магнито-провода тепловые сопротивления элементов схемы замещения  $R_r$ ,  $R_m$ ,  $R_m^\circ$  и  $R_c^\circ$ .

41. Определяем величину теплового потока между катушкой и сердечником

$$P'_m = \frac{(R_m + R_m^\circ + R_c^\circ + R_r)P_m - R_c^\circ P_{ct}}{2(R_m + R_m^\circ + R_c^\circ + R_r)}, \text{ Вт}, \quad (48)$$

где  $P_m$  — потери в меди, Вт;

$P_{ct}$  — потери в стали, Вт.

Таблица 10

Типоразмер магнитопровода	R <sub>r</sub>	R <sub>M</sub>	R <sup>o</sup> <sub>M</sub>	R <sup>o</sup> <sub>C</sub>
	°C/Вт			
ШЛ 6x6,5	11,1	4,8	57,5	45,8
ШЛ 6x8	9,9	4,5		40,6
ШЛ 6x10	8,7	4,1		32,4
ШЛ 6x12,5	7,5	3,8		28,9
ШЛ 8x8	6,5	3,7	33,7	30,1
ШЛ 8x10	5,8	3,4		25,8
ШЛ 8x12,5	5,1	3,1		22,2
ШЛ 8x16	4,3	2,8		17,3
ШЛ 10x10	8,3	2,9	18,1	20,3
ШЛ 10x12,5	7,4	2,7		17,8
ШЛ 10x16	6,4	2,5		15,3
ШЛ 10x20	5,5	2,3		13,1
ШЛ 12x12,5	5,7	2,4	15,8	14,3
ШЛ 12 x16	4,9	2,2		12,5
ШЛ 12x20	4,3	2,0		10,9
ШЛ 12x25	3,7	1,9		9,3
ШЛ 16x16	3,3	1,8	9,1	8,9
ШЛ 16x20	2,9	1,7		7,9
ШЛ 16x25	2,5	1,6		6,9
ШЛ 16x32	2,1	1,4		6,0
ШЛ 20x20	2,1	1,5	6,0	5,6
ШЛ 20x25	1,8	1,4		5,0
ШЛ 20x32	1,6	1,3		4,2
ШЛ 20x40	1,4	1,1		3,7
ШЛ 25x25	2,0	1,2	4	3,5
ШЛ 25x32	1,7	1,1		3,1
ШЛ 25x40	1,5	1,0		2,7
ШЛ 25x50	1,3	0,9		2,3
ШЛ 32x32	1,2	0,9	2,5	2,3
ШЛ 32x40	1,1	0,8		2,1
ШЛ 32x50	0,9	0,7		1,8
ШЛ 32x64	0,8	0,7		1,5
ШЛ 40x40	1,0	0,7	1,6	1,5
ШЛ 40x50	0,9	0,7		1,4
ШЛ 40x64	0,8	0,6		1,2
ШЛ 40x80	0,7	0,6		1

Таблица 11

Типоразмер магнитопровода	$R_r$	$R_M$	$R^{\circ}_M$	$R^{\circ}_c$
	°C/Вт			
ПЛ 16x40x32	1,08	1,8	3,8	7,6
ПЛ 16x50	0,87	1,4	3,2	
ПЛ 16x65	0,66	1,1	2,9	
ПЛ 16x80	0,55	0,9	2,6	
ПЛ 20x50x40	0,69	1,6	2,6	4,7
ПЛ 20x60	0,56	1,4	2,4	
ПЛ 20x80	0,43	1,0	2,0	
ПЛ 20x100	0,36	0,8	1,7	
ПЛ 25x65x50	0,6	1,2	1,6	3,3
ПЛ 25x80	0,52	0,9	1,5	
ПЛ 25x100	0,42	0,7	1,3	
ПЛ 25x120	0,35	0,7	1,2	

42. Определяем тепловое сопротивление катушки от максимально нагретой области до гильзы (каркаса) по формуле:

$$x = \frac{-P'_M(R_M + R^{\circ}_M + R_r + R^{\circ}_c) - P_{cm}R^{\circ}_c + P_M(R_M + R^{\circ}_M)}{P_M}, \text{ }^{\circ}\text{C/Вт.} \quad (49)$$

43. Определяем максимальное превышение температуры катушки и среднее превышение температуры обмотки.

А. Если  $0 < x < R_M$  (максимально нагретая область находится внутри катушки), то максимальное превышение температуры катушки следует определять по формуле:

$$\Delta\theta_{\text{макс}} = \frac{\left[ (R^{\circ}_M + R_M + R_r + R^{\circ}_c)P_M + R^{\circ}_c P_{cm} \right]^2}{4P_M(R_M + R^{\circ}_M + R^{\circ}_c + R_r)}, \text{ }^{\circ}\text{C}, \quad (50)$$

а среднее объемное превышение температуры обмотки по формуле

$$\Delta\theta_{\text{ср}} = \Delta\theta_{\text{макс}} - \Delta\theta_1, \quad (51)$$

$$\text{где } \Delta\theta_1 = 0,5\Delta\theta_k = 0,25(P_M - P'_M)R_M. \quad (52)$$

В формулах (51) и (52)  $\Delta\theta_1$  — перепад температуры в обмотке, первой намотанной на каркас,  $\Delta\theta_k$  — общий перепад температуры в катушке;  $P'_M$  определяется из формулы (48).

Б. Если полученное значение  $x$  окажется меньше или разным нулю, т. е. тепловой поток направлен от сердечника к катушке и максимально нагретая область находится на гильзе (каркасе), то в этом случае необходимо определить тепловой поток катушка — сердечник по формуле

$$P''_M = \frac{P_M(R_M + R^{\circ}_M) - P_{cm}R^{\circ}_c}{R_M + R^{\circ}_M + R^{\circ}_c + R_r}, \text{ Вт.} \quad (53)$$

Если получится  $P''_M > 0$ , то максимальное превышение температуры катушки определяют по формуле



$$\Delta\theta_{\text{макс}} = (P_{\text{м}} - P_{\text{м}}'')(R_{\text{м}} + R_{\text{м}}^{\circ}), \quad (54)$$

а среднее превышение температуры катушки по формуле

$$\Delta\theta_{\text{ср}} = \Delta\theta_{\text{макс}} - 0,5\Delta\theta_{\text{к}}, \quad (55)$$

$$\text{где } \Delta\theta_{\text{к}} = (P_{\text{м}} - P_{\text{м}}'')R_{\text{м}}. \quad (56)$$

В формулах (55) и (56)  $\Delta\theta_{\text{к}}$  — перепад температуры в катушке.

Если найденное из уравнения (53) значение  $P_{\text{м}}''$  будет меньше нуля, то доля теплового потока, возникающего в сердечнике, которая будет излучаться в окружающую среду через катушку (рис. 18, в), может быть определена по формуле

$$P_{\text{ст}}' = \frac{P_{\text{ст}}R_{\text{с}}^{\circ} - P_{\text{м}}(R_{\text{м}} + R_{\text{м}}^{\circ})}{R_{\text{м}} + R_{\text{м}}^{\circ} + R_{\text{с}}^{\circ} + R_{\text{к}}}, \text{ Вт.} \quad (57)$$

Максимальное превышение температуры катушки в этом случае определяется по формуле

$$\Delta\theta_{\text{макс}} = (P_{\text{ст}} - P_{\text{ст}}')R_{\text{с}}^{\circ}, \text{ }^{\circ}\text{C}, \quad (58)$$

а среднее — по формулам (55) и (56).

Для частот 50 и 400 Гц можно с достаточной точностью указать положение максимально нагретой области катушки и соответственно рекомендовать использование расчетных формул для вычисления максимального превышения температуры.

Для выполнения теплового расчета трансформаторов с любыми соотношениями геометрических размеров сердечника по описанному выше методу необходимо определить тепловые сопротивления  $R_{\text{м}}$ ,  $R_{\text{м}}^{\circ}$ ,  $R_{\text{с}}^{\circ}$ ,  $R_{\text{к}}$  схемы замещения по формулам, приведенным в табл. 12.

Таблица 12

Наименование	Расчетная формула	Дополнительные формулы и данные
Тепловое сопротивление катушки $R_{\text{м}}$ , $^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$	$R_{\text{м}} = \frac{0,01(a_{\text{к}} + a_{\text{к}} + 2\pi a_{\text{к}})^2}{4V_{\text{к}}\lambda_{\text{эк}}}$ , (БТ и СТ)	$\lambda_{\text{эк}} \approx 1,56 \cdot 10^{-3}$ , Вт/(см $^2$ · $^{\circ}\text{C}$ ) $V_{\text{к}} = 2ch(a + b + \frac{\pi c}{2})$ , см $^3$ (БТ и СТ)
Тепловое сопротивление $R_{\text{м}}^{\circ}$ , границы катушка – среда, $^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$	$R_{\text{м}}^{\circ} = \frac{1}{\alpha_{\text{к}}S_{\text{охл.к}}}$ , (БТ и СТ)	$\alpha_{\text{к}} \approx 1,4 \cdot 10^{-3}$ , Вт/(см $^2$ · $^{\circ}\text{C}$ ) $S_{\text{охл.к}} = 2[c(2a + \pi c) + h(a + \pi c)]$ , см $^2$ , (БТ). $S_{\text{охл.к}} = 2(2a + b)(c + h) + \pi c(2h + c)$ , см $^2$ , (СТ).
Тепловое сопротивление $R_{\text{с}}^{\circ}$ , границы сердечник – среда, $^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$	$R_{\text{с}}^{\circ} = \frac{R_{\text{ст}}R_{\text{сб}}}{R_{\text{ст}} + R_{\text{сб}}}$ , где $R_{\text{ст}} = \frac{1}{\alpha_{\text{ст}}S_{\text{охл.ст}}}$ , $R_{\text{сб}} = \frac{1}{\alpha_{\text{сб}}S_{\text{охл.б}}}$ .	$\alpha_{\text{ст}} \approx 1,5 \cdot 10^{-3}$ , Вт/(см $^2$ · $^{\circ}\text{C}$ ) $\alpha_{\text{сб}} \approx 1,7 \cdot 10^{-3}$ , Вт/(см $^2$ · $^{\circ}\text{C}$ ) $S_{\text{охл.ст}} = a(4c + 2h + \pi a)$ , см $^2$ , (БТ) $S_{\text{охл.ст}} = 4a(c + 0,5\pi a)$ , см $^2$ , (СТ) $S_{\text{охл.б}} = 2b(2c + h + \pi a)$ , см $^2$ , (БТ) $S_{\text{охл.б}} = 2b(c + \pi a)$ , см $^2$ , (СТ)
Тепловое сопротивление $R_{\text{г}}$ , гильзы, $^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$	$R_{\text{г}} = \frac{\delta_{\text{г}}}{\lambda_{\text{г}}S_{\text{г}}}$	$\lambda_{\text{г}} = 1 \cdot 10^{-3}$ , Вт/(см· $^{\circ}\text{C}$ ) $S_{\text{г}} = 2h(a + b)$ , см $^2$ , (БТ) $S_{\text{г}} = 4h(a + b)$ , см $^2$ , (СТ)
Тепловое сопротивление $R_{\text{к}}$ , каркаса, $^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$	$R_{\text{к}} = \frac{\delta_{\text{к}}}{\lambda_{\text{к}}S_{\text{к}}}$	$\lambda_{\text{к}} = 1,56 \cdot 10^{-3}$ , Вт/(см· $^{\circ}\text{C}$ ) $S_{\text{к}} = 2h(a + b)$ , см $^2$ , (БТ) $S_{\text{к}} = 4h(a + b)$ , см $^2$ , (СТ)

Расчётные формулы для определения объёма катушки  $V_k$ ; открытой поверхности охлаждения катушки, непосредственно участвующей теплообмене с окружающей средой  $S_{\text{охл.к}}$ ; открытой торцевой поверхности сердечника  $S_{\text{охл.ст}}$  и поверхности  $S_{\text{охл.б}}$ ; поверхности гильзы  $S_g$  для трансформаторов броневой (БТ) и стержневой конструкции (СТ) — приведены в этой же таблице. В ней также приведены средние значения эквивалентной теплопроводности пропитанной катушки  $\lambda_{\text{эк}}$  и гильзы  $\lambda_g$  и коэффициентов теплоотдачи; с поверхности катушки  $\alpha_k$  с торца сердечника  $\alpha_{\text{ст}}$  с боковой поверхности сердечника  $\alpha_{\text{сб}}$ .

В таблице обозначены  $R_{\text{ст}}$ ,  $R_{\text{сб}}$  — тепловые сопротивления торцевой и боковой поверхности сердечника;  $\delta_g$  — толщина гильзы;  $\lambda_g$  — теплопроводность гильзы.

Дальнейший тепловой расчет ведут в соответствии с пп. 41-43.

**44. Оценка результатов расчета перегрева.** Во избежание грубых ошибок при расчете максимальной температуры перегрева  $\theta_{\text{макс}}$  ее приближенное значение определяют по упрощенной формуле

$$\Delta\theta_{\text{макс}} = \frac{P_m + P_{\text{см}}}{\alpha(S_{\text{обм}} + S_{\text{серд}})} + \Delta\theta, \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (59)$$

где  $P_m$  — суммарные потери в меди обмоток, Вт;

$P_{\text{си}}$  — суммарные потери в стали сердечника, Вт;

$\Delta\theta$  — перепад температуры от внутренних слоев обмоток к наружным, который для пропитанных лаком катушек приближенно может быть принят равным 5-10 $^\circ\text{C}$ ;

$S_{\text{серд}}$  — открытая поверхность сердечника трансформатора, см $^2$ ;

$S_{\text{серд}} = S_{\text{охл.ст}} + S_{\text{охл.б}}$ ;

$S_{\text{обм}}$  — открытая поверхность обмоток трансформатора, см $^2$ ;

$S_{\text{обм}} = S_{\text{охл.к}}$ ;

$\alpha = 13 \cdot 10^{-4}$  Вт/(см $^2 \cdot$  град) — удельный коэффициент теплоотдачи.

Если максимальные температуры перегрева, полученные по формулам (50) или (54, 58) и по приближенной формуле (59), отличаются не более чем на 15 $^\circ\text{C}$ , то при выполнении теплового расчета трансформатора не допущено грубых ошибок, а если эта разница составляет более 15 $^\circ\text{C}$ , необходимо проверить расчеты.

**45. Максимальная температура обмотки равна:**

$$\theta_{\text{макс}} = \Delta\theta_{\text{макс}} + \theta_0, \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (60)$$

где  $\Delta\theta_{\text{макс}}$  — температура рассчитанная в п. 43;

$\theta_0$  — температура окружающей среды (приведена в задании).

При расчете с заданным ограничением по превышению температуры в соответствии с заданием  $\theta_{\text{макс}}$  должна лежать в пределах

$$95 < \theta_{\text{макс}} < 105, \text{ } ^\circ\text{C}.$$

При расчете на заданное падение напряжения  $\theta_{\text{макс}} < 105$   $^\circ\text{C}$ . Если  $\theta_{\text{макс}}$  не укладывается в указанные пределы, то следует произвести перерасчет трансформатора.

**46. Проверка результатов расчета и их корректировка.**

Если значения  $\theta_{\text{макс}}$  и  $\beta$  укладываются в пределы, указанные в примечании к табл. 1, то расчет трансформатора выполнен правильно, а если нет, то сначала следует внимательно

проверить правильность выполненных расчетов. При отсутствии ошибок необходимо произвести корректировку параметров, влияющих на коэффициенты  $\alpha$  и  $\beta$  и величину  $\theta_{\text{макс}}$ :

а) если максимальная температура  $\theta_{\text{макс}}$  оказалась меньше  $95^\circ\text{C}$  при  $\beta$ , лежащем в рекомендованных пределах, необходимо увеличить в одинаковом отношении плотность тока в обмотках и индукцию в сердечнике  $B$ . Если  $\theta_{\text{макс}}$  оказалась больше  $105^\circ\text{C}$  при нормальном для данной частоты  $\beta$ , необходимо одновременно уменьшить и  $j$  и  $B$ . В обоих случаях потребуется подобрать новый сердечник;

б) при нормальном нагреве обмоток трансформатора ( $95^\circ < \theta_{\text{макс}} < 105^\circ\text{C}$ ), но при  $\beta$ , не укладываемом в рекомендованные пределы, следует, не меняя размеров сердечника и произведение  $jB$ , увеличить плотность тока в обмотках и уменьшить индукцию (если  $\beta$  ниже нормы) или, наоборот, уменьшить плотность тока и увеличить индукцию (если  $\beta$  выше нормы);

в) при нормальном нагреве и  $\beta$ , но при  $\alpha$ , не укладываемом в рекомендованные пределы, необходимо, не меняя  $j$  и  $B$ , взять сердечник с другим значением  $k_Q$ . Если  $\alpha$ , меньше нормы, то необходимо взять сердечник с большим  $k_Q$ , и наоборот.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАДЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ В ТРАНСФОРМАТОРЕ

### 47. Активные сопротивления обмоток:

а) при температуре  $105^\circ\text{C}$

$$r_{105} = \frac{\rho l_{\text{ср в}} \omega}{q_{\text{пр}}}, \text{ Ом} \quad (61)$$

где  $\rho$  — удельное сопротивление медного провода (при  $\theta_{\text{пр}} = 105^\circ\text{C}$ ,

$\rho = 2,35 \cdot 10^{-2}$  Ом-мм<sup>2</sup>/м);

$q_{\text{пр}}$  — сечение медных проводов каждой обмотки;

$\omega$ ,  $l_{\text{ср в}}$  — были определены в п. 10, 36.

б) сопротивления вторичных обмоток, приведенные к первичной,

$$r'_2 = r_2 \left( \frac{\omega_1}{\omega_2} \right)^2; \quad r'_3 = r_3 \left( \frac{\omega_1}{\omega_3} \right)^2, \quad (62)$$

где  $r_2$  и  $r_3$  — активные сопротивления обмоток при температуре  $105^\circ\text{C}$ .

### 48. Индуктивные сопротивления рассеяния обмоток (в относительных единицах)

$$x^*_i = \frac{7,9 f \omega_1 I_1 \cdot 10^{-6}}{E_s} \cdot \frac{S_{p i}}{h_d}, \quad (63)$$

где  $f$  — частота, Гц;

$\omega_1$  — число витков первичной обмотки;

$I_1$  — номинальный ток первичной обмотки;

$E_s$  — ЭДС витка;

$h_d$  — высота катушки, м;

$S_{p i}$  — площадь канала рассеяния  $i$ -й обмотки ( $i = 1, 2, 3$ ), м<sup>2</sup>.

При размещении обмоток в порядке 1, 2, 3 (рис. 19, а):

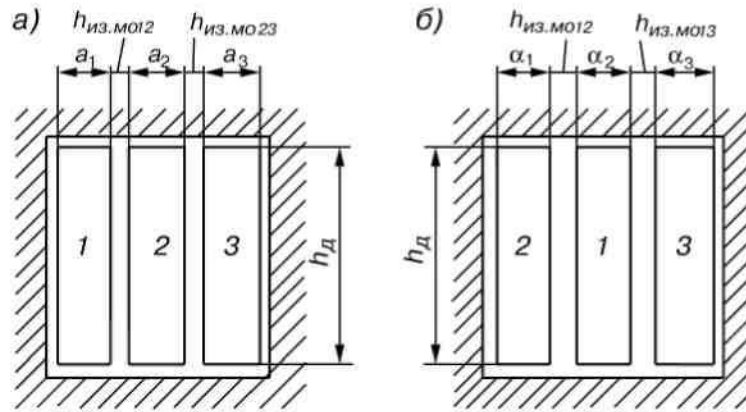


Рис. 19. К определению индуктивных сопротивлений трансформатора

$$S_{p1} \cong \frac{\alpha_1}{3} l_{cp \text{ в} 1} + \frac{h_{из \text{ мо} 12}}{2} l_{12};$$

$$S_{p2} \cong \frac{h_{из \text{ мо} 12}}{2} l_{12} + \frac{\alpha_2}{3} l_{cp \text{ в} 2} (1 + I_2^* + I_3^{*2}) + \frac{h_{из \text{ мо} 23}}{2} l_{23} I_3^{*2}; \quad (64)$$

$$S_{p3} \cong \frac{h_{из \text{ мо} 23}}{2} l_{23} I_3^{*2} + \frac{\alpha_3}{3} l_{cp \text{ в} 3} \cdot l_3^{*2},$$

где  $l_{cp \text{ в} 1}$ ,  $l_{cp \text{ в} 2}$ ,  $l_{cp \text{ в} 3}$  — средние длины витков обмоток, м, полученные ранее по формулам (37–43);

$h_{из \text{ мо} 12}$ ,  $h_{из \text{ мо} 23}$  — толщины межобмоточной изоляции, м (рис. 19, а);

$$l_{12} \cong \frac{1}{2} (l_{cp \text{ в} 1} + l_{cp \text{ в} 2}); l_{23} \cong \frac{1}{2} (l_{cp \text{ в} 2} + l_{cp \text{ в} 3}); \quad (65)$$

$$I_2^* = \frac{I_2'}{I_1}; I_3^* = \frac{I_3'}{I_1}; I_3' = I_3 \frac{\omega_3}{\omega_1}. \quad (66)$$

При размещении обмоток в порядке 2, 1, 3 (рис. 19, б):

$$S_{p1} \cong I_2^* l_{12} \left( I_2^* \frac{\alpha_1}{3} + \frac{h_{из \text{ мо} 12}}{2} \right) + I_3^* l_{13} \left( I_3^* \frac{\alpha_1}{3} + \frac{h_{из \text{ мо} 13}}{2} \right); \quad (67)$$

$$S_{p2} \cong \frac{\alpha_2}{3} l_{cp \text{ в} 2} + \frac{h_{из \text{ мо} 12}}{2} l_{12}; \quad (68)$$

$$S_{p3} \cong \frac{\alpha_3}{3} l_{cp \text{ в} 3} + \frac{h_{из \text{ мо} 13}}{2} l_{13}; \quad (69)$$

$$l_{13} = \frac{1}{2} (l_{cp \text{ в} 1} + l_{cp \text{ в} 3}), \quad (70)$$

где  $h_{из \text{ мо} 12}$  и  $h_{из \text{ мо} 23}$  — толщины межобмоточной изоляции, м (рис. 19, б), полученные ранее в п. 29, табл. 13. Все размеры указаны в метрах.

#### 49. Падения напряжения на обмотках при номинальной нагрузке (в относительных единицах)

$$\Delta U_{a1}^* = \frac{r_1 I_1}{U_1}; \quad \Delta U_{a2}^* = \frac{r_2' I_1}{U_1}; \quad \Delta U_{a3}^* = \frac{r_3' I_1}{U_1}; \quad (71)$$

$$\Delta U_{p1}^* = x_1^*; \quad \Delta U_{p2}^* = x_2^*; \quad \Delta U_{p3}^* = x_3^*, \quad (72)$$

где  $r_1, r_2', r_3'$  — сопротивления обмоток при температуре 105°C.

$$\Delta U_1^* = \sqrt{\Delta U_{a1}^{*2} + \Delta U_{p1}^{*2}}; \quad \Delta U_2^* = \sqrt{\Delta U_{a2}^{*2} + \Delta U_{p2}^{*2}}; \quad (73)$$

$$\Delta U_3^* = \sqrt{\Delta U_{a3}^{*2} + \Delta U_{p3}^{*2}}. \quad (74)$$

### 50. Полные падения напряжения на вторичных обмотках при номинальной нагрузке трансформатора (в относительных единицах).

$$\begin{aligned} \Delta U_{12}^* &= \Delta U_{a1}^* \cos \varphi_1 + \Delta U_{p1}^* \sin \varphi_1 + \\ &+ \frac{I_2'}{I_1} \left( \Delta U_{a2}^* \cos \varphi_2 + \Delta U_{p2}^* \sin \varphi_2 \right); \end{aligned} \quad (75)$$

$$\begin{aligned} \Delta U_{13}^* &= \Delta U_{a1}^* \cos \varphi_1 + \Delta U_{p1}^* \sin \varphi_1 + \\ &+ \frac{I_3'}{I_1} \left( \Delta U_{a3}^* \cos \varphi_3 + \Delta U_{p3}^* \sin \varphi_3 \right). \end{aligned} \quad (76)$$

При расчетном ограничении по падению напряжения величины  $\Delta U_{12}$  и  $\Delta U_{13}$  не должны превышать заданных значений. При отличии полученных значений  $\Delta U_{12}$  и  $\Delta U_{13}$  или одного из них необходимо при частоте 50 Гц уменьшить плотность тока в обмотках и повторить расчет, начиная с п. 5. В тех обмотках, где значения  $\Delta U$ , полученные по (73) и (74) и выраженные в процентах, больше отличаются от принятых в расчетах значений  $\Delta U_1, \Delta U_2, \Delta U_3$  (по заданным  $\Delta U_{12 \text{ здн}}$  и  $\Delta U_{13 \text{ здн}}$  см. п. 7) значения плотностей тока в п. 20 также снижаются больше. Для трансформаторов 400 Гц наряду с уменьшением плотности тока необходимо перейти к нестандартному сердечнику; сохранив неизменной площадь окна, надо увеличить его высоту  $h$  и уменьшить ширину  $s$ , а затем повторить расчет, начиная с п. 7.

### 51. Напряжения на вторичных обмотках

$$U_2 = \frac{\omega_2}{\omega_1} U_1 (1 - \Delta U_{12}^*); \quad (77)$$

$$U_3 = \frac{\omega_3}{\omega_1} U_1 (1 - \Delta U_{13}^*). \quad (78)$$

Если  $\frac{|U_{2 \text{ здн}} - U_2|}{U_{2 \text{ здн}}} \cdot 100$  а также  $\frac{|U_{3 \text{ здн}} - U_3|}{U_{3 \text{ здн}}} \cdot 100$  ( $U_{2 \text{ здн}}; U_{3 \text{ здн}}$  — заданные значения

напряжений второй и третьей обмоток) получится более 2%, то необходимо уточнить числа витков  $\omega_2$  и  $\omega_3$  согласно формулам (77) и (78), оставив число витков  $\omega_1$  неизменным. После этого с учетом новых значений  $\omega_2$  и  $\omega_3$  необходимо внести уточнения в расчеты, начиная с п. 10.

Для низковольтной обмотки, если ЭДС витка  $E_b$  (11) составляет более  $0,02 U_{3н}$  и  $U_3$  отличается от  $U_{3н}$  меньше чем на 5%, то уточнение  $\omega_3$  можно не производить.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ КПД ТРАНСФОРМАТОРА И ВЫБОР ПРОВОДОВ ДЛЯ ВЫВОДОВ ОБМОТОК

### 52. Находим КПД трансформатора по формуле

$$\eta = \frac{P_2 + P_3}{P_2 + P_3 + P_m + P_{ст}} \cdot \quad (79)$$

**53. Выбор проводов для выводов обмоток.** Для обмоток, выполненных проводом диаметром менее 0,2–0,35 мм, выводные концы и отводы делают гибким монтажным проводом сечением 0,05–0,2 мм<sup>2</sup>. При более толстых проводах выводы и отводы делают самим проводом, причем при диаметрах более 0,9–1,0 мм отводы выполняют петлей. При диаметрах проводов около 2 мм (а для отводов—1,0–1,5 мм) снова переходят к монтажному проводу.

Наиболее часто выводы обмоток выполняют проводами марки МГШДО при рабочем напряжении до 127 В, марки МГШДЛ — при рабочем напряжении до 220 В, марки МГТФЛ — при рабочем напряжении до 500 В и марок ПВТФ-2 и ПВТФ-5 — при рабочем напряжении до 2 кВ. Выводные концы заключают в изоляционные трубки.

## РЕКОМЕНДАЦИИ ПО РАЗРАБОТКЕ КОНСТРУКЦИИ ТРАНСФОРМАТОРА И ВЫПОЛНЕНИЮ ЧЕРТЕЖА

Пластинчатые магнитопроводы трансформаторов после сборки стягиваются шпильками посредством металлических (обычно стальных) пластинок или специальных накладок, которые одновременно используются и для крепления трансформатора к шасси (рис. П.1, а). Стяжные шпильки, планки и обоймы должны быть изолированы от магнитопровода бумагой или электрокартоном, с тем чтобы предотвратить возможность образования короткозамкнутого витка вокруг всего сердечника или его части; образование такого витка приводит к сильному нагреву этого витка и увеличению потерь.

При малых размерах магнитопровода для стяжки железа иногда используют обойму специальной формы, в которую запрессовывают собранный трансформатор (рис. П.1, б); обойма имеет уши для крепления к шасси. Применяется также сборка пластинчатых магнитопроводов в пластмассовых обоймах.

На рис. П.2, а, б изображена конструкция стяжки и крепления разрезных ленточных сердечников стержневого трансформатора с двумя катушками. В этой конструкции крепление магнитопровода осуществляется при помощи накладок 1, стягиваемых шпильками 2. Накладки имеют ребра жесткости. Основание трансформатора имеет отверстия 3 для крепления его к панели.

Для ленточных магнитопроводов Ш-образной формы при мощности трансформаторов 50–1000 ВА рекомендуется конструкция, приведенная на рис. П.3, а, б. В этом случае Ш-образные сердечники стягиваются стальными лентами 1 с помощью болтов 2. Для защиты катушки от повреждения и лучшего теплоотвода служит кожух 3 с выштампованными в нем отверстиями. Крепление трансформатора к шасси осуществляется двумя Г-образными стойками 4.

На рис. П.4, *a* приведена удобная конструкция для крепления ленточных магнитопроводов Ш-образной формы трансформаторов до 100 ВА. Она состоит из штампованного кожуха 1, удерживающей пластины 2 и нажимных винтов 3. Сборка трансформатора выполняется в следующей последовательности. При снятой пластине 2 вставляются нижние половины сердечников 4, затем одевается катушка 5, вставляются верхние половины сердечников 6, отгибаются вертикальные стойки кожуха 7, в отверстие 8 в кожухе вставляются заплечики 9 удерживающей пластины 2. Наконец, с помощью нажимных винтов 3 сжимаются верхние и нижние половины сердечника. Для фиксации катушки в вертикальном положении служит выступ 10 на кожухе.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

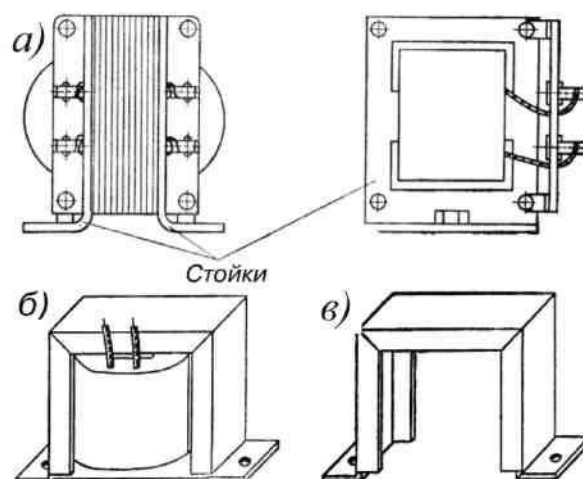


Рис. П1. Пластинчатый трансформатор: *а* — с сердечником, стянутым накладными стойками и шпильками; *б* — с запрессованным в обойму сердечником; *в* — обойма

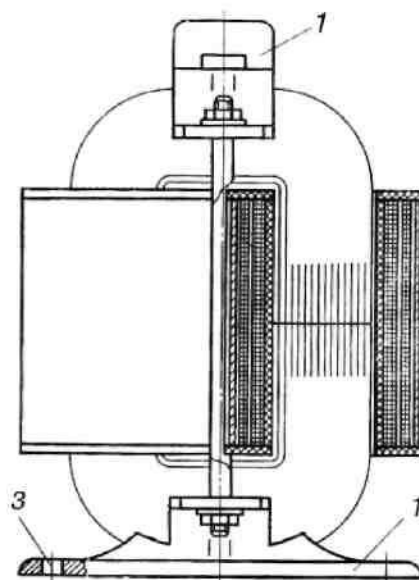
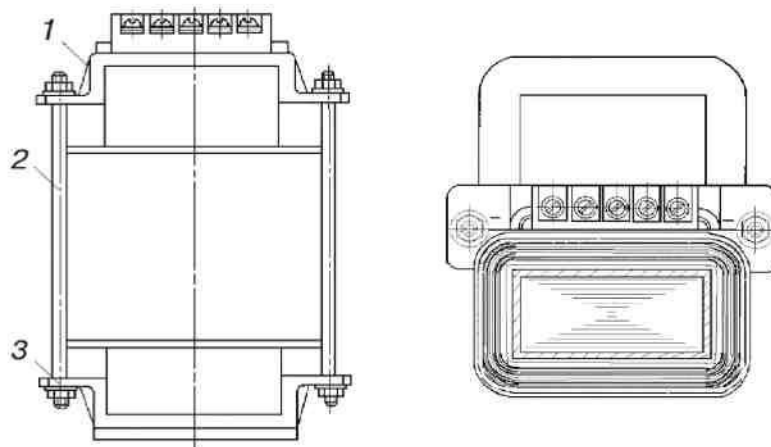
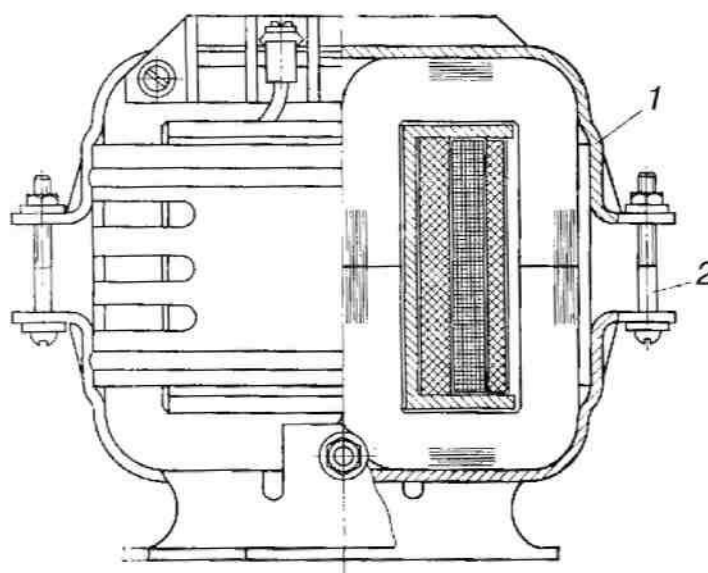


Рис. П2, *а*. Конструкция крепления и стяжки, ленточного стержневого трансформатора (вид спереди)

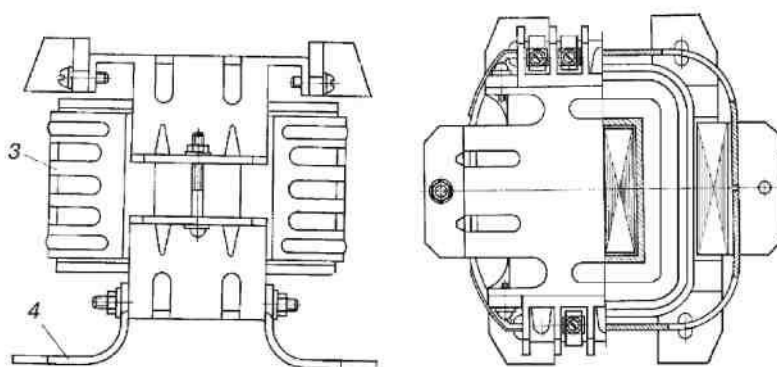




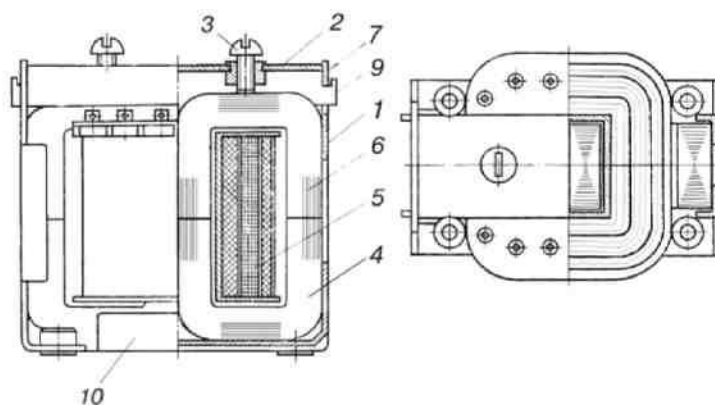
**Рис. П2, б. Конструкция крепления и стяжки, ленточного магнитопровода стержневого типа (виды сбоку и сверху)**



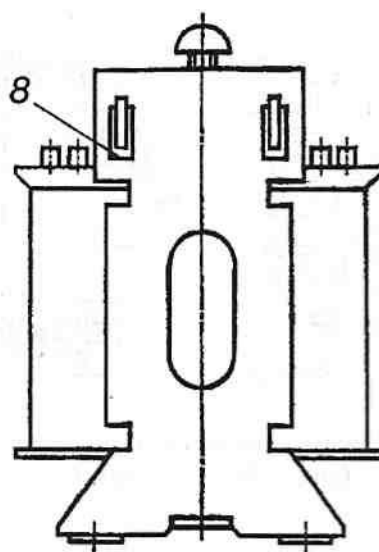
**Рис. П3, а. Конструкция крепления и стяжки, ленточного сердечника магнитопровода броневое типа с помощью накладок и винтов (вид спереди)**



**Рис. П3, б. Конструкция броневое магнитопровода (виды сбоку и сверху)**



**Рис. П4, а. Конструкция крепления и стяжки, ленточных магнитопроводов броневое типа трансформаторов малой мощности (виды спереди и сверху); на виде сверху ленточного магнитопровода показанную штриховку необходимо развернуть на 90°**



**Рис. П4, б. Конструкция броневое магнитопровода малой мощности (вид сбоку)**