

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет»

А. В. Сериков

РАСЧЁТ ТРАНСФОРМАТОРОВ МАЛОЙ МОЩНОСТИ

Утверждено в качестве учебного пособия
Учёным советом Федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего профессионального образования
«Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет»

Комсомольск-на-Амуре
2015

УДК 621.314(07)
ББК 31.261.8-02я7
С327

Рецензенты:

Кафедра «Электротехника, электроника и электромеханика» ФГБОУ ВПО
«Дальневосточный государственный университет путей сообщения»,
профессор кафедры, д-р техн. наук С. В. Власьевский;
Р. Ф. Крупский, канд. техн. наук, начальник научно-производственного
отдела филиала ПАО «Авиационная холдинговая компания «Сухой»
«Комсомольский-на-Амуре авиационный завод им. Ю.А. Гагарина»

Сериков, А. В.

С327 Расчёт трансформаторов малой мощности : учеб. пособие /
А. В. Сериков. – Комсомольск-на-Амуре : ФГБОУ ВПО «КнАГТУ»,
2015. – 72 с.
ISBN 978-5-7765-1202-5

Рассмотрены конструктивные особенности трансформаторов малой мощности. Содержится методика расчёта трансформаторов, справочные материалы, необходимые для выполнения курсовой работы, пример расчёта трансформатора малой мощности, а также контрольные вопросы для подготовки к защите курсовой работы.

Учебное пособие предназначено для студентов специальности «Специальные электромеханические системы».

УДК 621.314(07)
ББК 31.261.8-02я7

ISBN 978-5-7765-1202-5

© ФГБОУ ВПО «Комсомольский-на-Амуре
государственный технический
университет», 2015

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1. ОСОБЕННОСТИ ТРАНСФОРМАТОРОВ МАЛОЙ МОЩНОСТИ С ВОЗДУШНЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ	4
2. МАТЕРИАЛЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ТРАНСФОРМАТОРОВ МАЛОЙ МОЩНОСТИ.....	11
3. МЕТОДИКА РАСЧЁТА ТРАНСФОРМАТОРА.....	13
4. ПРИМЕР РАСЧЁТА ТРАНСФОРМАТОРА	39
5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К ЗАЩИТЕ КУРСОВОЙ РАБОТЫ.....	62
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	64
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	64
ПРИЛОЖЕНИЕ 1. ОБМОТОЧНЫЕ ПРОВОДА	65
ПРИЛОЖЕНИЕ 2. СЕРДЕЧНИКИ ТРАНСФОРМАТОРОВ	67
ПРИЛОЖЕНИЕ 3. ЗАДАНИЕ НА НАМОТКУ ТРАНСФОРМАТОРА.....	71

ВВЕДЕНИЕ

Трансформаторы малой мощности (ТММ) широко используются в современных схемах для электрического питания различных систем автоматики, телемеханики и связи, а также для питания электротехнических устройств: выпрямителей, фильтров, статических преобразователей, стабилизаторов и регуляторов напряжения и тока. Расчёт этих трансформаторов имеет ряд особенностей в отличие от трансформаторов общего назначения. В ряде случаев к ним предъявляются самые жёсткие требования по весовым и габаритным показателям, вместе с тем достаточно остро стоит вопрос экономической эффективности трансформаторов, что связано с большими масштабами их производства.

В связи с тем что курсовая работа выполняется параллельно с изучением теоретического курса «Трансформаторы и дроссели малой мощности», в учебном пособии приводятся основные сведения о конструктивных особенностях таких трансформаторов.

В практике проектирования выбор основных размеров сердечника осуществляется обычно с использованием нормализованных рядов, но в некоторых случаях использование стандартного сердечника не удовлетворяет каким-либо техническим требованиям, заданным в проекте, поэтому в курсовой работе рассматривается методика расчётного определения размеров сердечника.

1. ОСОБЕННОСТИ ТРАНСФОРМАТОРОВ МАЛОЙ МОЩНОСТИ С ВОЗДУШНЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ

Конструкция ТММ должна обеспечивать его надёжную работу в течение всего заданного срока службы (10 000...20 000 ч и более), поэтому в зависимости от места установки к конструкции могут предъявляться следующие требования: высокая механическая прочность, нагревостойкость, влагостойкость, электрическая прочность, экономичность.

Основными элементами конструкции 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 исполнению пластинчатые и ленточные магнитопроводы делятся на три основных типа: стержневые, броневые и кольцевые (рис. 1).

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

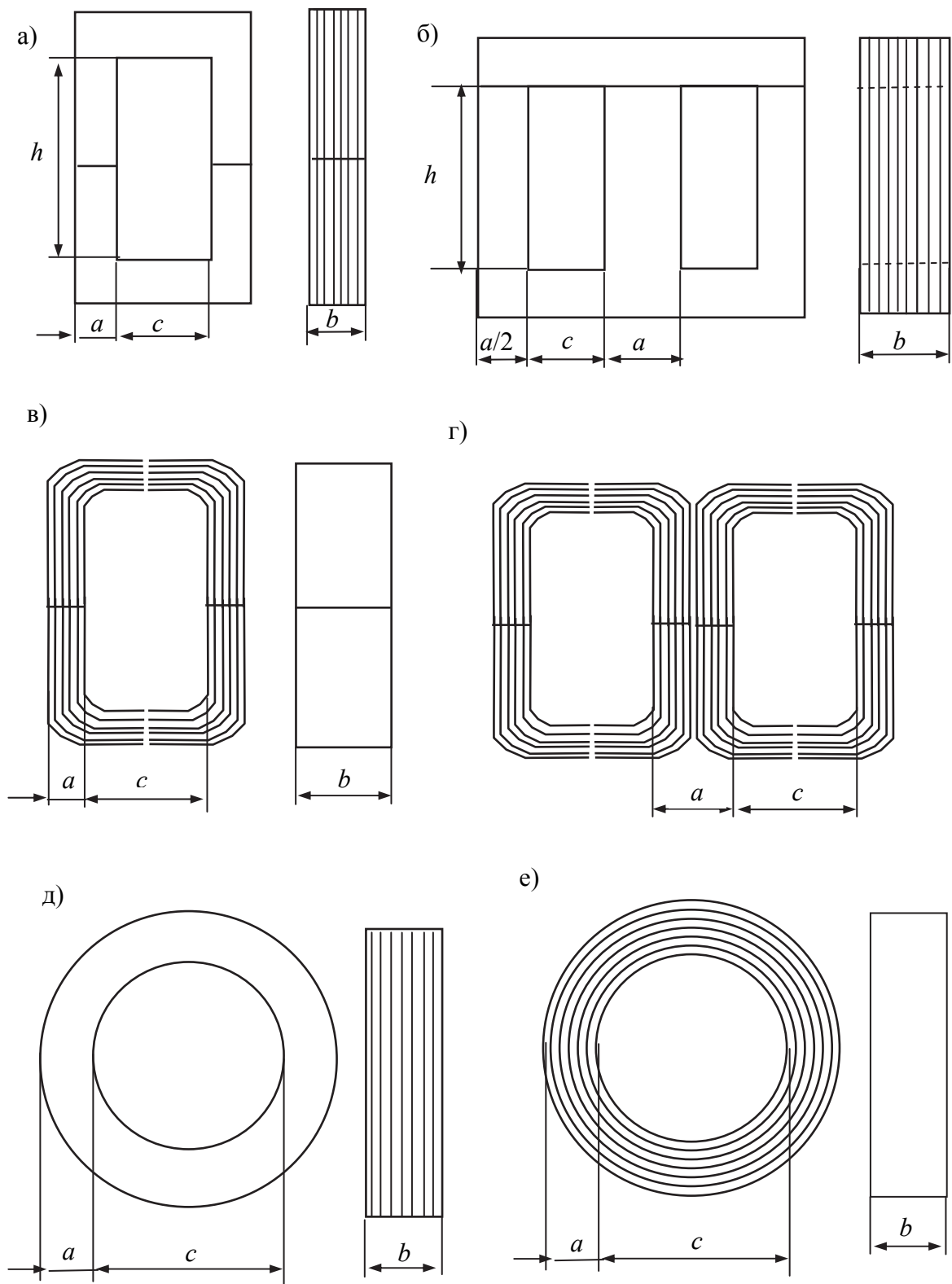


Рис. 1. Конструкции магнитопроводов:
 а – стержневого пластинчатого; б – броневое пластинчатого;
 в – стержневого ленточного; г – броневое ленточного;
 д – кольцевого пластинчатого; е – кольцевого ленточного

Броневые пластинчатые магнитопроводы собираются из Ш-образных пластин и прямоугольных перекрышек (см. рис. 1, б), из одинаковых Ш-образных пластин с разъемом посередине стержня или из сплошных пластин с просечкой среднего стержня. Для уменьшения магнитного сопротивления в местах стыка отдельных пластин их собирают впереплёт, т.е. в одном слое перекрышка находится вверху, а в соседних – внизу (разъем по яруму, см. рис. 1, б).

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

Кольцевые пластинчатые магнитопроводы (см. рис. 1, д) собираются из отдельных штампованных колец.

Кольцевые ленточные магнитопроводы (см. рис. 1, е) изготавливаются путём навивки ленты требуемой ширины на оправу заданного диаметра; они обладают минимальным магнитным сопротивлением, но сложны для изготовления трансформатора (намотка обмотки непосредственно на магнитопровод).

Для уменьшения магнитного сопротивления разрезных ленточных магнитопроводов обе части магнитопровода при сборке трансформатора склеиваются при помощи специальной ферромагнитной пасты, содержащей карбонильное железо. Иногда склеивают и собираемые встык пластинчатые магнитопроводы.

Катушки трансформаторов представляют собой совокупность обмоток и системы изоляции. Обмотки изготавливаются из изолированных проводов; кроме того, предусматривается изоляция катушек от магнитопровода, межслоевая изоляция, внешняя (наружная) изоляция катушек.

Изоляция обмотки от стержневых и броневого магнитопроводов осуществляется при помощи каркасов, изготавливаемых из негигроскопичного материала, обладающего требуемой электрической и механической прочностью. Простейший и наиболее распространённый тип каркаса представляет собой гильзу, изготавливаемую из электротехнического картона (электрокартона) (рис. 2, а). Часто применяются склеенные из электрокартона каркасы (рис. 2, б). При массовом производстве трансформаторов используются сборные каркасы, изготовленные из твёрдых 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, крепления собранного трансформатора, присоединения концов обмоток (клеммы), защиты от механических повреждений и влагозащиты.

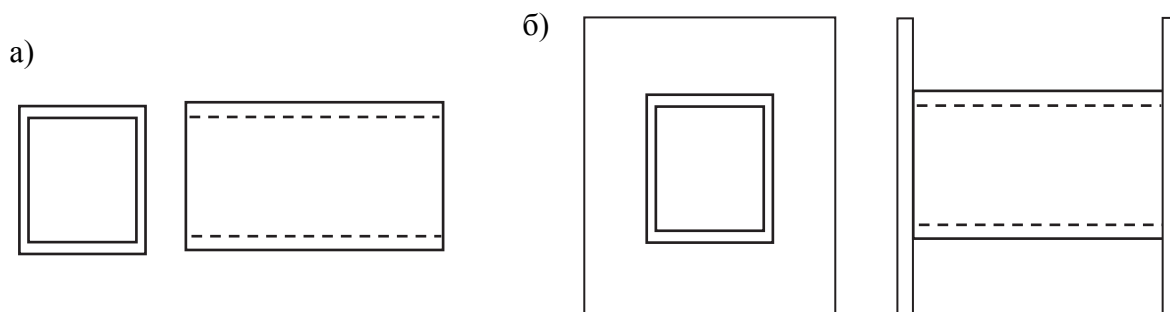


Рис. 2. Гильза (а) и каркас (б) из электрокартона

Пластинчатые магнитопроводы трансформаторов после сборки стягиваются шпильками посредством металлических пластинок или специальных накладок, которые одновременно используются и для крепления трансформатора.

При малых размерах магнитопровода для стяжки железа иногда используют обойму специальной формы, в которую запрессовывают собранный трансформатор. Обойма имеет ушки для крепления к шасси. Применяется также сборка пластинчатых магнитопроводов в пластмассовых обоймах.

На рис. 3, 4 и 5 изображены варианты конструктивного исполнения трансформаторов малой мощности.

Броневого типа трансформатора (пластинчатый – см. рис. 3 или ленточный – см. рис. 4) имеет одну катушку. Его достоинства – более высокий коэффициент заполнения окна сердечника обмоточным проводом, частичная защита обмотки ярмом сердечника от механических повреждений.

Стержневой тип трансформатора (см. рис. 5) может быть как однокатушечным, так и двухкатушечным. Преимущество однокатушечного варианта – лучшая технологичность исполнения. В двухкатушечном варианте на каждой катушке размещается половина витков каждой обмотки. Достоинства двухкатушечного – малая индуктивность рассеяния вследствие меньшего числа витков на каждой катушке, меньшая толщина намотки, меньший расход обмоточных проводов из-за уменьшения средней длины витка, относительно увеличенная поверхность охлаждения.

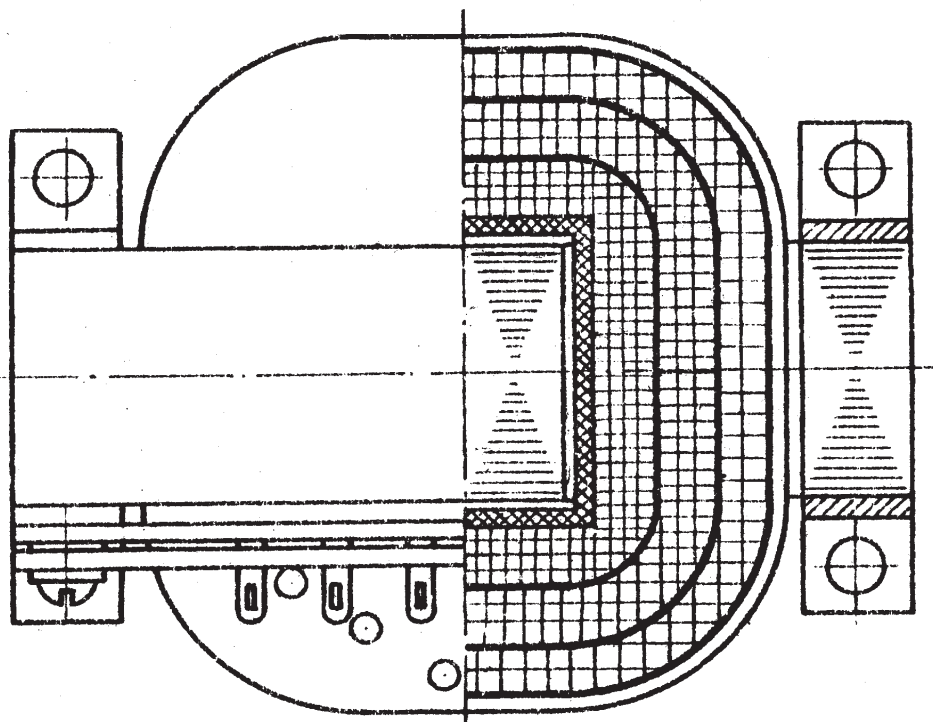
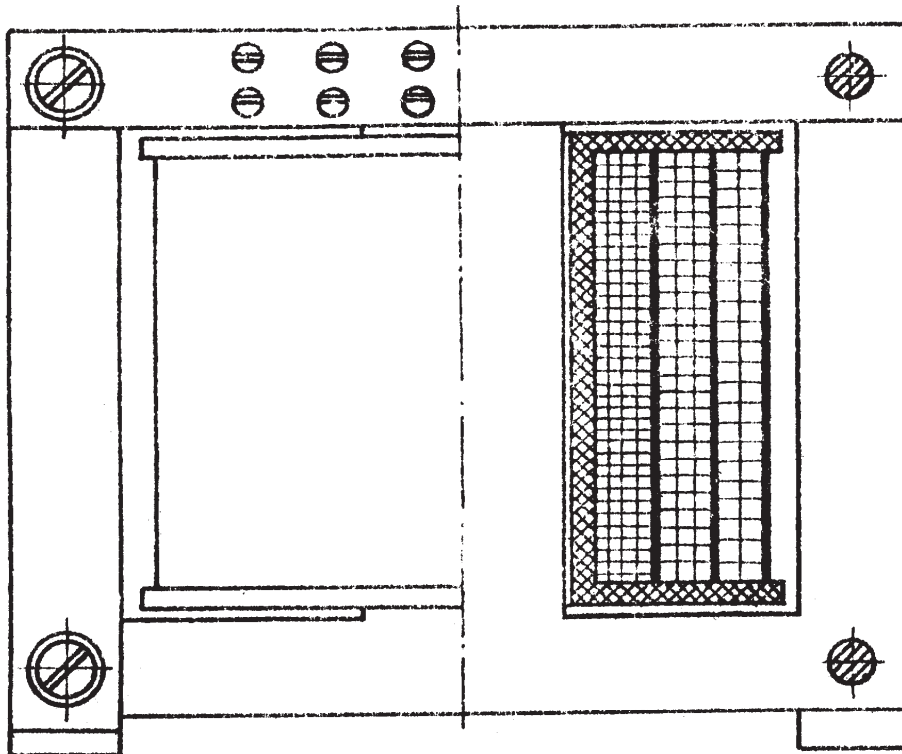


Рис. 3. Броневой пластинчатый трансформатор

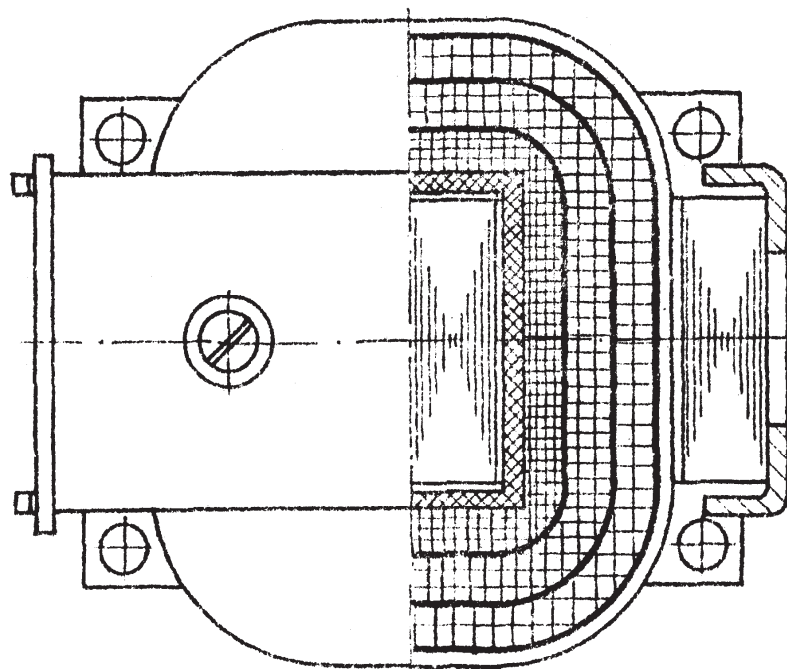
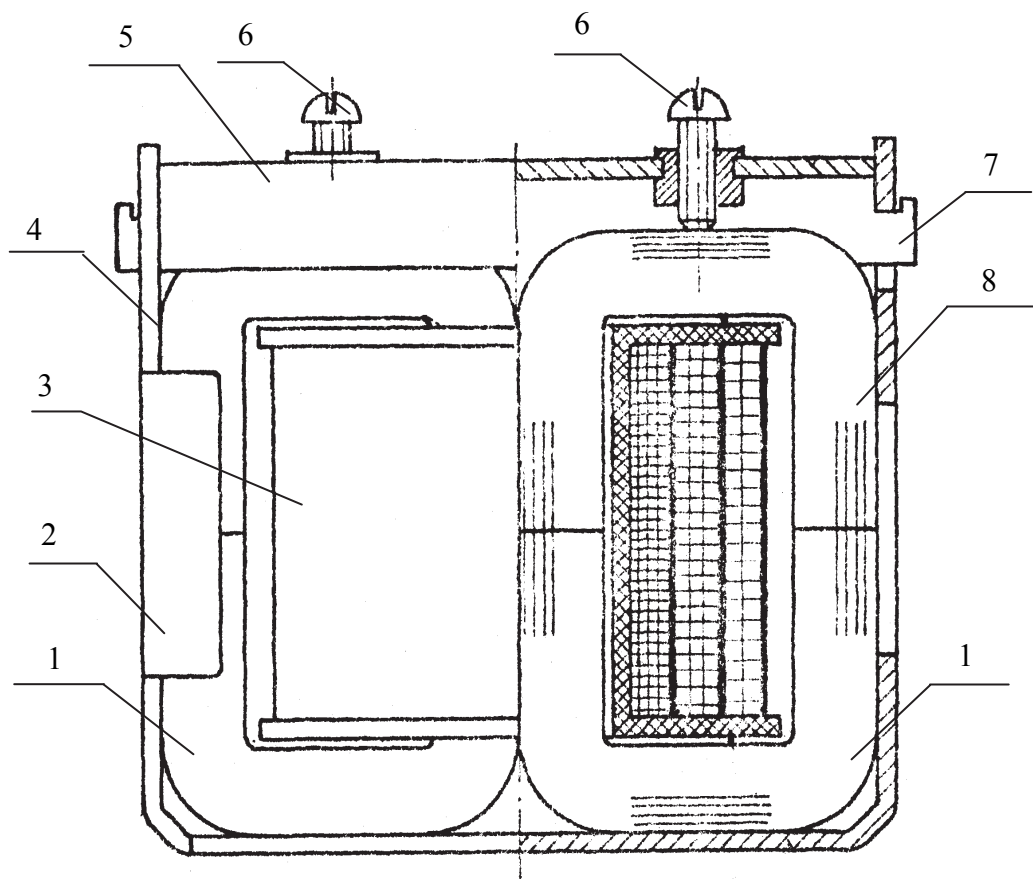


Рис. 4. Броневой ленточный трансформатор

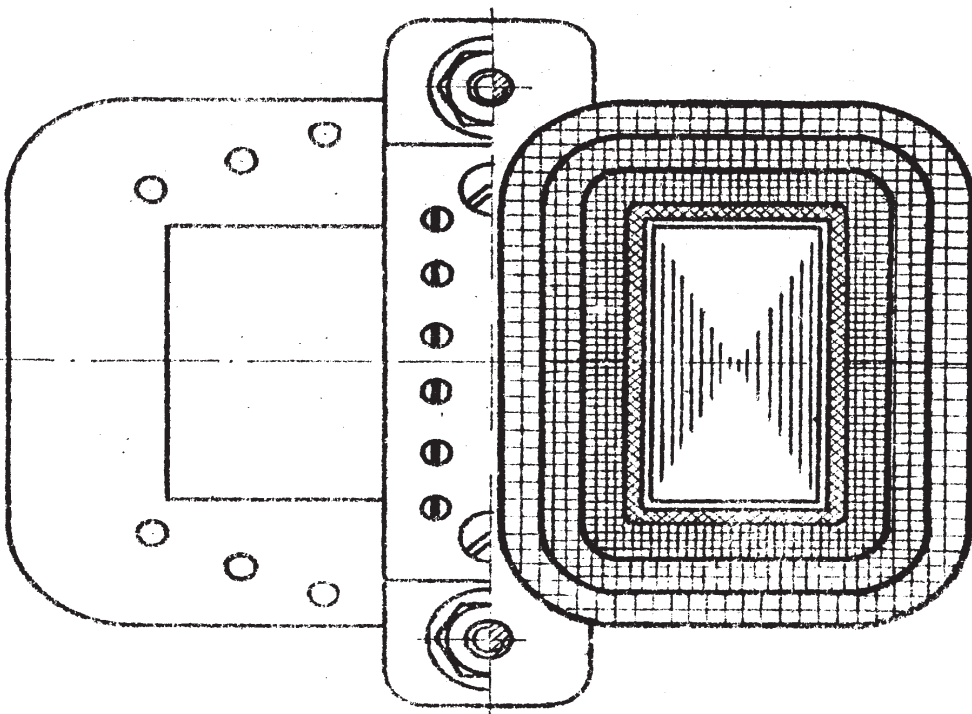
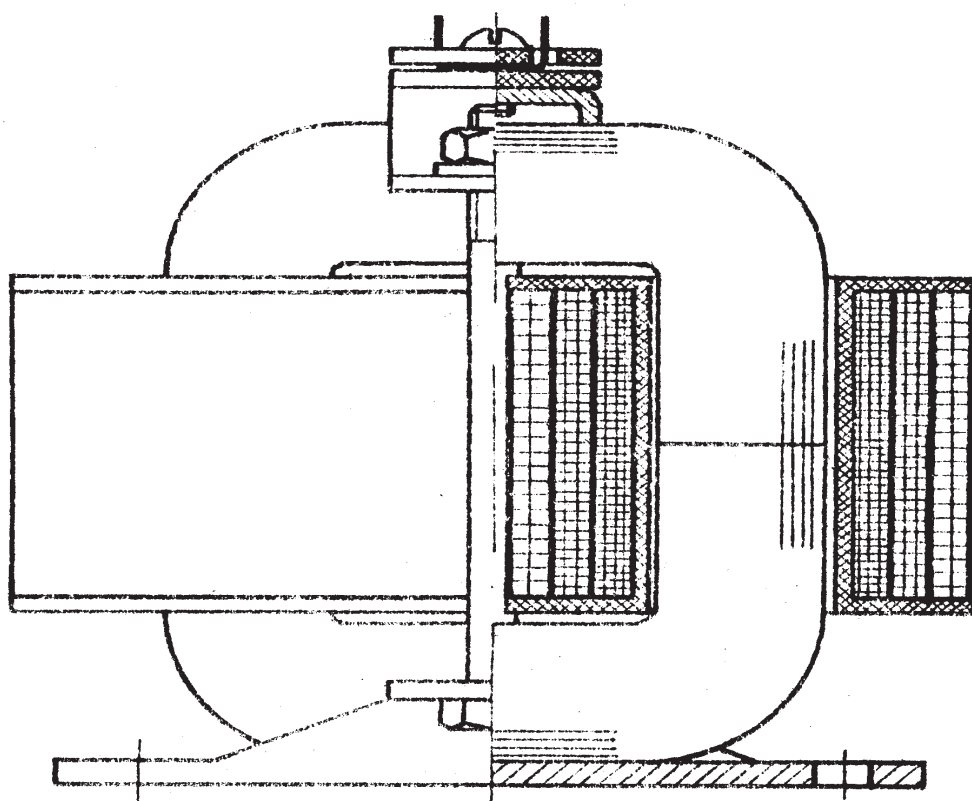


Рис. 5. Стержневой ленточный трансформатор

На рис. 4 приведена конструкция трансформатора с ленточным магнитопроводом броневого типа мощностью до 100 ВА. Каркас трансформатора состоит из штампованного кожуха 4, удерживающей пластины 5 и нажимных винтов 6. Сборка трансформатора выполняется в следующей последовательности: при снятой пластине 5 вставляются нижние половины сердечников 1, затем надеваются катушки 3, вставляются верхние половины сердечников 8, отгибаются вертикальные стойки кожуха 4, и в отверстия кожуха вставляются заплечики 7 удерживающей пластины 5. С помощью нажимных винтов 6 сжимаются верхние и нижние половины сердечника. Для фиксации катушки в вертикальном положении служит выступ 2 в кожухе.

Для защиты обмоток от воздействия влаги их пропитывают изоляционными лаками. Пропитка повышает влагостойкость обмотки, увеличивает её электрическую и механическую прочность, повышает допустимую температуру нагрева и увеличивает теплопроводность от нагретых частей к наружной охлаждаемой поверхности.

2. МАТЕРИАЛЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ТРАНСФОРМАТОРОВ МАЛОЙ МОЩНОСТИ

Магнитные материалы. К магнитным материалам, используемым для изготовления магнитопроводов ТММ, предъявляются следующие требования: высокая магнитная проницаемость, малые потери на вихревые токи и перемагничивание, малая себестоимость. Для изготовления сердечников ТММ в диапазоне от единиц до нескольких сотен вольт-ампер в качестве магнитного материала широко используются горяче- и холоднокатаные электротехнические стали разных марок и толщин.

Магнитные свойства горячекатаных сталей практически одинаковы во всех направлениях проката. Холоднокатаные стали обладают меньшими удельными потерями и значительно лучшими электромагнитными характеристиками вдоль направления проката по сравнению с горячекатаными. Поэтому из горячекатаных сталей выполняются пластинчатые магнитопроводы, а из холоднокатаных – ленточные. При расчёте трансформатора на минимум стоимости следует выбирать горячекатаные стали, а на минимум массы – холоднокатаные.

С учётом наибольшего практического применения при курсовом проектировании ТММ рекомендуются следующие марки сталей:

- 1) при частоте 50 Гц для пластинчатых магнитопроводов – горячекатаная сталь марки 1512 или 1521 с толщиной листов 0,35 мм;
- 2) при частоте 400 Гц для пластинчатых магнитопроводов – горячекатаная сталь марки 1512 или 1521 с толщиной листов 0,2 мм;

3) при частоте 50 Гц для ленточных магнитопроводов – холоднокатаная сталь марки 3411 или 3412 с толщиной ленты 0,35 мм;

4) при частоте 400 Гц для ленточных магнитопроводов – холоднокатаная сталь марки 3411 или 3412 с толщиной ленты 0,2 мм.

Обмоточные провода. При изготовлении обмоток используются обмоточные провода широкой номенклатуры, в качестве материала проволоки берётся в основном медь, имеющая малое удельное сопротивление. Для расчёта ТММ рекомендуются следующие марки проводов:

1) ПЭЛ – провод эмалированный лакостойкий, предназначен для работы при температуре до 105 °С. По стоимости – относительно дешёвый, применяется в трансформаторах, которые рассчитываются на минимум стоимости. Недостаток провода – малая механическая прочность его изоляции.

2) ПЭВ-1 – провод, изолированный высокопрочной эмалью (ванифлекс) в один слой. Применяется при напряжениях до 500 В, удовлетворяет повышенным требованиям надёжности, рабочая температура до 105 °С. Рекомендуется для трансформаторов наименьшей массы.

3) ПЭВ-2 – аналогичный провод, но с изоляцией в два слоя. Применяется при требованиях большой надёжности и при напряжениях обмоток свыше 500 В.

Если диаметр обмоточного провода находится в пределах 0,35...2,0 мм, то выводные концы обмоток выполняются из самого обмоточного провода, если же меньше 0,35 мм или больше 2,0 мм – специальными проводами марок МГШДО (при рабочем напряжении до 127 В), ПТЛ (до 250 В) и МГТФЛ (до 500 В).

Электроизоляционные материалы. Данные материалы в трансформаторах применяются для изоляции токоведущих частей. В зависимости от назначения изоляция бывает межобмоточной, межслоевой, межвитковой и основной (изоляция между катушкой и сердечником).

К изоляции с рабочей температурой до 105 °С (класс изоляции А) относятся отдельные материалы на основе хлопчатобумажной и шёлковой тканей или на основе целлюлозы, не пропитанные или пропитанные лаками.

В качестве материалов, используемых для межслоевой и межобмоточной изоляции, применяются бумаги, пропитанные изоляционным компаундом: кабельная марки К-12, телефонная КТН; конденсаторная КОН-1; пропиточная марок ЭИП-50 и ЭИП-63Б. Из тканевых материалов используются лакоткани марок ЛХ1, ЛХ2, ЛШ1, ЛШ2.

Материалом для сборных каркасов катушек служит текстолит, гетинакс, электрокартон, а для прессованных и литых – пресс-порошки К21-22, К-114-35 и др.

3. МЕТОДИКА РАСЧЁТА ТРАНСФОРМАТОРА

Методика расчёта однофазного трансформатора малой мощности изложена на основе специальной литературы [1; 2].

Определение расчётной мощности

Для определения расчётной мощности трансформатора можно воспользоваться приближённой формулой

$$S_p \approx S_2 + S_3,$$

где S_p – расчётная мощность трансформатора, ВА; S_2, S_3 – номинальные полные мощности вторичных обмоток, ВА.

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

$$S_p \approx \frac{(S_2 + S_3)}{2} \left(1 + \frac{1}{\eta} \right),$$

где η – коэффициент полезного действия (КПД), выбирается в соответствии с табл. 1.

Таблица 1

Выбор КПД

Частота f , Гц	Величина КПД при расчётной 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

Выбор конструкции магнитопровода

Выбор конструкции магнитопровода производится в соответствии с величиной расчётной 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: они технологичнее в изготовлении и проще по конструкции.

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

Для трансформаторов мощностью выше 100 ВА применяются и броневые, и стержневые сердечники. Однако более выгодными являются стержневые трансформаторы с двумя катушками и ленточными разъёмны-

ми 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 расчёта. При минимуме стоимости целесообразен броневой пластинчатый, а при минимуме массы – лучше стержневой ленточный.

Выбор материала сердечника

Для уменьшения потерь на вихревые токи снижают толщину стали, но её уменьшение при данной частоте целесообразно только до определённых пределов, после чего рост потерь на гистерезис сводит на нет уменьшение потерь на вихревые токи. Поэтому 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 её толщины производится в соответствии с заданной частотой сети и условием расчёта (минимум стоимости или минимум массы) в соответствии с табл. 2.

Таблица 2

Выбор толщины и марки стали

Частота f , Гц	Расчётное 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

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

Приведённые в табл. 3 – 6 значения указанных величин могут использоваться как рекомендуемые для трансформаторов при величине напряжения на зажимах обмотки, не превышающей 500 В.

Таблица 3

Выбор магнитной индукции

Конструкция магнитопровода	Частота, Гц	Магнитная индукция B_{\max} , Тл, при S_p , ВА			
		15...50	50...150	150...300	300...1000
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>
Броневая пластинчатая	50	1,3	1,35	1,35	1,3
Броневая ленточная		1,65	1,65	1,65	1,65

Продолжение табл. 3

1	2	3	4	5	6
Стержневая ленточная	50	1,6	1,7	1,7	1,7
Броневая пластинчатая	400	1,2	1,2	1,15	1,0
Броневая ленточная		1,4	1,4	1,4	1,3
Стержневая ленточная		1,6	1,5	1,3	1,0

Таблица 4

Выбор плотности тока

Конструкция магнитопровода	Частота, 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 5

Выбор коэффициента заполнения окна

Конструкция магнитопровода	Частота, 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

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.

Определение токов в обмотках

Активная I_{1a} и реактивная I_{1p} , А, составляющие тока первичной обмотки вычисляются следующим образом:

$$I_{1a} = \frac{S_2 \cos \phi_2 + S_3 \cos \phi_3}{\eta U_1}, \quad I_{1p} = \frac{S_2 \sin \phi_2 + S_3 \sin \phi_3}{\eta U_1} + I_{\mu},$$

где U_1 – напряжение первичной обмотки, В; $\cos \phi_2$, $\cos \phi_3$ – коэффициенты мощности вторичных обмоток; I_{μ} – ток намагничивания, А.

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 расчёте).

Ток первичной обмотки I_1 , А, находится по формуле

$$I_1 = \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1p}^2}.$$

Токи вторичных обмоток I_2 и I_3 , А, определяются по формулам

$$I_2 = \frac{S_2}{U_2}, \quad I_3 = \frac{S_3}{U_3}.$$

Определение сечений и диаметров проводов обмоток

Предварительные значения площадей поперечных сечений проводов обмоток рассчитываются по формулам

$$q_{1пр} = \frac{I_1}{j_{ср}}, \quad q_{2пр} = \frac{I_2}{j_{ср}}, \quad q_{3пр} = \frac{I_3}{j_{ср}},$$

где $q_{1пр}$, $q_{2пр}$, $q_{3пр}$ – предварительные значения площадей поперечных сечений проводов обмоток, м²; $j_{ср}$ – среднее значение плотности тока в обмотках, А/м².

По таблице стандартных сечений и диаметров проводов (приложение 1) выбираются окончательные сечения проводов обмоток $q_1, q_2, q_3, \text{ м}^2$, их диаметры без изоляции $d_1, d_2, d_3, \text{ м}$, и диаметры с изоляцией $d_{1\text{и}}, d_{2\text{и}}, d_{3\text{и}}, \text{ м}$.

Выбор марки провода определяется величиной рабочего напряжения обмотки. При напряжении обмоток до 500 В и токах до нескольких ампер рекомендуется применять провода марок ПЭВ-1 (допустимая температура нагрева 105 °С), ПЭВТЛ-1 (120 °С), ПЭТВ (130 °С), ПСД (155 °С), ПСДК (180 °С). При выборе провода следует принять рабочую температуру ($\theta \leq 105 \text{ °С}$), для которой рекомендуется провод марки ПЭВ-1 для диаметров 1...2 мм и марки ПСД для диаметров больше 2 мм.

По выбранным сечениям проводов уточняются плотности тока в обмотках:

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

где j_1, j_2, j_3 – плотности тока в соответствующих обмотках, А/м^2 .

Определение поперечного сечения стержня сердечника

Поперечное сечение стержня сердечника трансформатора (по стали) $Q_{\text{ст.расч}}, \text{ м}^2$, можно определить по формуле

$$Q_{\text{ст.расч}} = C \sqrt{\frac{\alpha S_1}{f B_{\text{max}} j_{\text{cp}}}},$$

где C – постоянный коэффициент (может быть принят: для трансформаторов броневое типа $C = 0,7$; для трансформаторов стержневого типа с прямоугольными катушками $C = 0,6$); α – отношение массы стали $G_{\text{ст}}$ к массе меди $G_{\text{м}}$ (при расчёте на минимум стоимости $\alpha = 4...6$; при расчёте на минимум массы трансформатора $\alpha = 2...3$); S_1 – полная мощность первичной обмотки трансформатора, ВА; f – частота сети, Гц; B_{max} – предварительное значение магнитной индукции в стержне, Тл; j_{cp} – плотность тока в обмотках, А/м^2 .

Полная мощность первичной обмотки трансформатора вычисляется по формуле

$$S_1 = U_1 I_1,$$

где U_1 – напряжение первичной обмотки, В.

Полное поперечное сечение стержня $Q_{\text{ст.полн}}$ (с учётом междулистовой изоляции), м^2 , определяется по формуле

$$Q_{\text{ст.полн}} = \frac{Q_{\text{ст.расч}}}{k_{\text{ст}}},$$

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

Определение числа витков обмоток трансформатора

Приближённые значения действующих ЭДС в обмотках трансформатора могут быть определены по формулам

$$E_1 = U_1 \left(1 - \frac{\Delta U_{1\%}}{100} \right), \quad E_2 = U_2 \left(1 + \frac{\Delta U_{2\%}}{100} \right), \quad E_3 = U_3 \left(1 + \frac{\Delta U_{3\%}}{100} \right),$$

где E_1, E_2, E_3 – ЭДС в обмотках трансформатора, В; $\Delta U_{i\%}$ – падение напряжения в соответствующей обмотке при нагрузке в процентах от номинального значения напряжения.

Величины падения напряжений $\Delta U_{i\%}$ 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 (табл. 7).

Таблица 7

Выбор падения напряжения в обмотке при нагрузке

Частота, Гц	Конструкция магнитопровода	Величина $\Delta U, \%$	Суммарная полная мощность вторичных обмоток, ВА		
			15...50	50...150	150...300
50	Бронева	$\Delta U_{1\%}$	13,0...6,0	6,0...4,5	4,5...3,0
		$\Delta U_{2\%} = \Delta U_{3\%}$	18,0...10,0	10,0...8,0	8,0...6,0
50	Стержневая	$\Delta U_{1\%}$	12,0...5,5	5,5...4,0	4,0...3,0
		$\Delta U_{2\%} = \Delta U_{3\%}$	17,0...9,0	9,0...6,0	6,0...4,0
400	Бронева	$\Delta U_{1\%}$	8,0...4,0	4,0...1,5	1,5...1,0
		$\Delta U_{2\%} = \Delta U_{3\%}$	8,5...5,0	5,0...2,0	2,0...1,2
400	Стержневая	$\Delta U_{1\%}$	5,0...2,0	2,0...1,0	1,0
		$\Delta U_{2\%} = \Delta U_{3\%}$	6,5...3,0	3,0...1,5	1,5...1,0

Для трёхобмоточных 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 $\Delta U_{2\%} = \Delta U_{3\%}$. 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. 7. При выборе порядка расположения обмоток следует учитывать заданное расчётное условие (минимум массы или минимум стоимости), учитывая при этом, что провод меньшего диаметра имеет большую стоимость. В связи с этим при расчёте на минимум стоимости целесообразно обмотку, имеющую наименьший диаметр, располагать первой на стержне, а при расчёте 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, т.к. такая обмотка не вносит существенного влияния в выполнение заданных расчётных условий.

ЭДС одного витка, В:

$$E'_B = 4,44 f B_{\max} Q_{\text{ст.расч}}.$$

Предварительное число витков в обмотках трансформатора

$$W'_1 = \frac{E_1}{E'_B}, \quad W'_2 = \frac{E_2}{E'_B}, \quad W'_3 = \frac{E_3}{E'_B}.$$

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

$$E_B = E'_B \frac{W_3}{W'_3}, \quad B_{\text{с.расч}} = B_{\max} \frac{W_3}{W'_3}, \quad W_1 = W'_1 \frac{W_3}{W'_3}, \quad W_2 = W'_2 \frac{W_3}{W'_3}.$$

Напряжения на вторичных обмотках при холостом ходе U_{20} и U_{30} , В:

$$U_{20} = E_B W_2, \quad U_{30} = E_B W_3.$$

Определение площади окна сердечника

Площадь окна сердечника F_0 , м², необходимая для размещения всех обмоток трансформатора, определяется по формуле

$$F_0 = \frac{q_1 W_1 + q_2 W_2 + q_3 W_3}{k_{\text{ок}}},$$

где $k_{\text{ок}}$ – коэффициент заполнения окна сердечника обмоткой (выбирается по табл. 5).

Выбор сердечника трансформатора

Эскизы стандартных сердечников приведены на рис. 1. Основные размеры сердечников: h – высота окна, м; c – ширина окна, м; a – ширина стержня, м; b – толщина пакета, м. Эти размеры для стандартных сердечников приведены в приложении 2.

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 броневоего, так и для стержневого трансформатора) должны удовлетворять следующим основным требованиям:

– площадь поперечного сечения стержня сердечника Q_c , м², должна быть равна или близка к расчётной, т.е.

$$Q_c = ab \approx Q_{\text{ст.полн}}; \quad (1)$$

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

$$hc \geq F_0. \quad (2)$$

Если сердечник со стандартными размерами пластин или стандартный ленточный сердечник не удаётся подобрать из числа сердечников, представленных в приложении 2, то проектирование ведётся из расчёта на нестандартный сердечник. Для этого, приняв оптимальные отношения $b/a = 1 \dots 2$ и $h/c = 2 \dots 3$, определяют размеры магнитопровода, м:

$$b = \sqrt{Q_{\text{ст.полн}} (b/a)}, \quad h = \sqrt{F_0 (h/c)}, \quad a = \frac{b}{(b/a)}, \quad c = \frac{h}{(h/c)}.$$

Размеры сердечника округляют до миллиметра и проверяют выполнение соотношений (1) и (2).

В случае выбора сердечника, у которого сечение Q_c отличается от предварительно рассчитанного $Q_{\text{ст.полн}}$, необходимо заново произвести перерасчёт магнитной индукции в стержне B_c , Тл, по формуле

$$B_c = B_{\text{с.расч}} \frac{Q_{\text{ст.полн}}}{Q_c}.$$

Дальнейший расчёт трансформатора следует вести на основе новых значений величины магнитной индукции.

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

$$n_1 = \frac{h - 2h_{\text{изл}}}{d_{1\text{н}} k_{y1}},$$

где $h_{\text{изл}}$ – изоляционное расстояние от обмотки до ярма, м (обычно $h_{\text{изл}} = 2 \dots 5$ мм); k_{y1} – коэффициент укладки провода в осевом направлении (определяется по кривой на рис. 6).

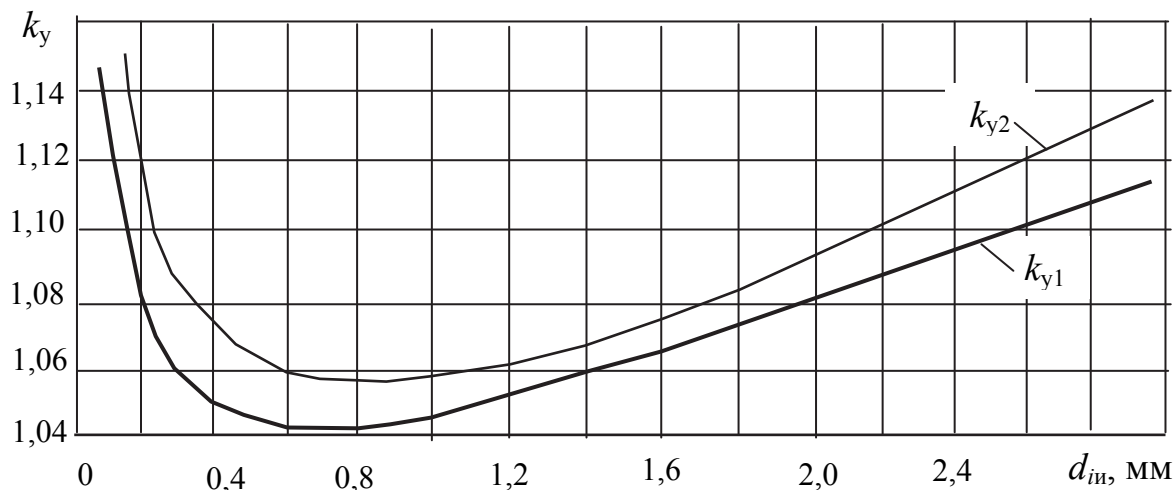


Рис. 6. Зависимость коэффициентов укладки в осевом k_{y1} и радиальном k_{y2} направлениях от диаметра провода d_{in}

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

$$m_1 = \frac{W_1}{n_1}.$$

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} , В, определяется по формуле

$$U_{c1} = 2n_1 E_v.$$

Если напряжение U_{c1} превышает 50 В, то между двумя слоями обмотки следует помещать изоляционные прокладки, толщина которых γ_{mc1} составляет 0,05...0,08 мм.

Толщина первичной обмотки δ_1 , м, составит

$$\delta_1 = k_{y2} m_1 d_{in} + k_{mc} (m_1 - 1) \gamma_{mc1},$$

где k_{y2} – коэффициент укладки обмотки в радиальном направлении в зависимости от диаметра провода (определяют по рис. 6); k_{mc} – коэффициент неплотности межслоевой изоляции, определяется по кривым, приведённым на рис. 7, в зависимости от диаметра провода и толщины изоляции.

Число витков вторичной обмотки в одном слое n_2 составит

$$n_2 = \frac{h - 2h_{из2}}{d_{2и}k_{y1}},$$

где $h_{из2}$ – расстояние от вторичной обмотки до ярма, м (принимается аналогично $h_{из1}$).

Число слоёв вторичной обмотки m_2 трансформатора броневое типа или однокатушечного трансформатора стержневого типа составит

$$m_2 = \frac{W_2}{n_2}.$$

Полученное значение m_2 также округляется до ближайшего большего целого числа.

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

Напряжение между двумя слоями вторичной обмотки $U_{с2}$, В, определяется по формуле

$$U_{с2} = 2n_2E_B.$$

Как и для первичной обмотки, в случае если $U_{с2} > 50$ В, принимаются межслойные изоляционные прокладки $\gamma_{мс2} = 0,05 \dots 0,08$ мм.

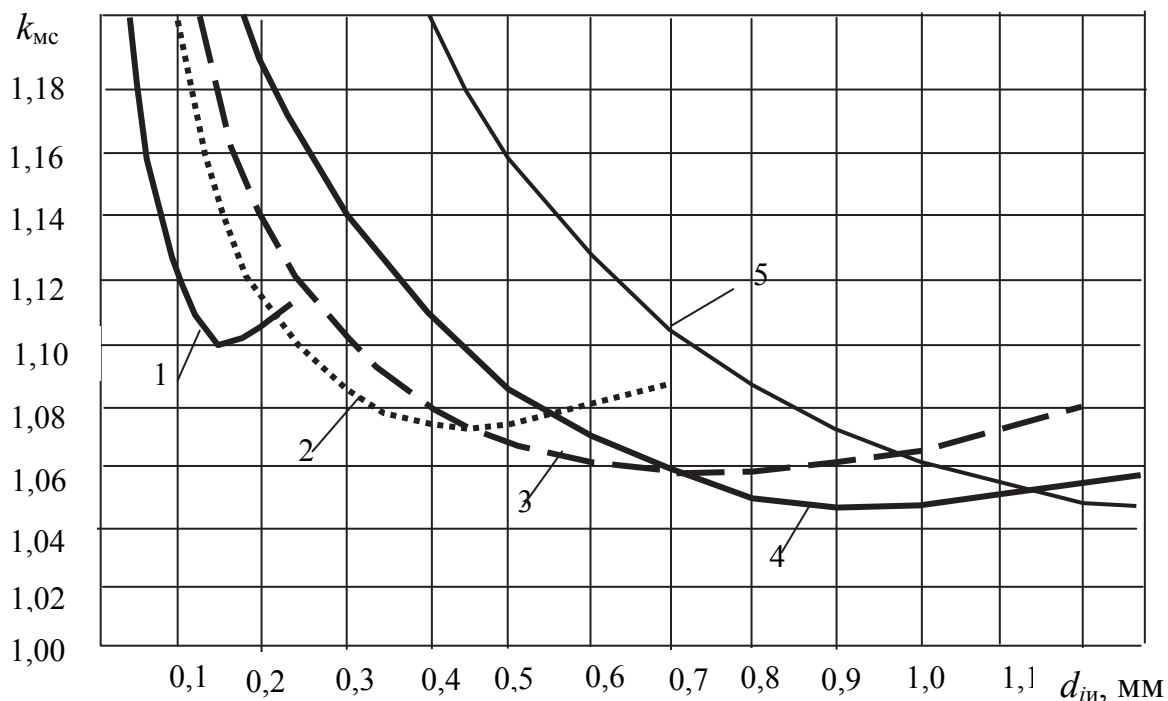


Рис. 7. Зависимость коэффициента неплотности межслоевой изоляции $k_{мс}$ от диаметра изолированного провода $d_{ин}$ и толщины изоляции $\gamma_{мси}$: 1 – до 0,022 мм; 2 – до 0,05 мм; 3 – до 0,09 мм; 4 – 0,11 мм; 5 – до 0,2 мм

Толщина вторичной обмотки δ_2 , м, составит

$$\delta_2 = k_{y2} m_2 d_{2н} + k_{mc} (m_2 - 1) \gamma_{mc2}.$$

Число витков третьей обмотки в одном слое n_3 составит

$$n_3 = \frac{h - 2h_{из3}}{d_{3и} k_{y1}},$$

где $h_{из3}$ – расстояние от вторичной обмотки до ярма, м (принимается аналогично $h_{из1}$).

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

$$m_3 = \frac{W_3}{n_3}.$$

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

Напряжение между двумя слоями третьей обмотки U_{c3} , В, определяется по формуле

$$U_{c3} = 2n_3 E_B.$$

Как и для первичной обмотки, в случае если $U_{c3} > 50$ В, принимаются межслойные изоляционные прокладки $\gamma_{mc3} = 0,05 \dots 0,08$ мм.

Толщина третьей обмотки δ_3 , м, составит

$$\delta_3 = k_{y2} m_3 d_{3и} + k_{mc} (m_3 - 1) \gamma_{mc3}.$$

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

На рис. 8 показаны основные изоляционные расстояния при размещении обмоток.

Полный радиальный размер катушки $a_{кат}$, м, определяется из выражения

$$a_{кат} = \Delta_3 + (h_{из.ос} + \delta_1 + k_{мо} h'_{из.мо} + \delta_2 + k_{мо} h''_{из.мо} + \delta_3 + k_{но} h_{из.н}) k_B,$$

где Δ_3 – зазор между гильзой (каркасом) и сердечником, м (при расчёте принимается 0,5 мм); $h_{из.ос}$ – толщина гильзы (каркаса) с учётом дополнительной изоляции поверх каркаса, м; δ_i – радиальные размеры обмоток, м; $k_{мо}$ – коэффициент неплотности межобмоточной изоляции (при расчёте определяется по рис. 9); $h'_{из.мо}$, $h''_{из.мо}$ – толщина межобмоточной изоляции, м; $k_{но}$ – коэффициент неплотности намотки наружной изоляции (принимается 1,7...2); $h_{из.н}$ – толщина наружной изоляции, м; k_B – коэффициент выпучивания в радиальном направлении (учитывается только при выпол-

нении обмотки на гильзе или каркасе из электрокартона), определяется по графикам (рис. 10) в зависимости от диаметра провода с учётом отношения b/a выбранного типоразмера магнитопровода (при выполнении обмотки на штампованном каркасе принимается $k_B = 1$).

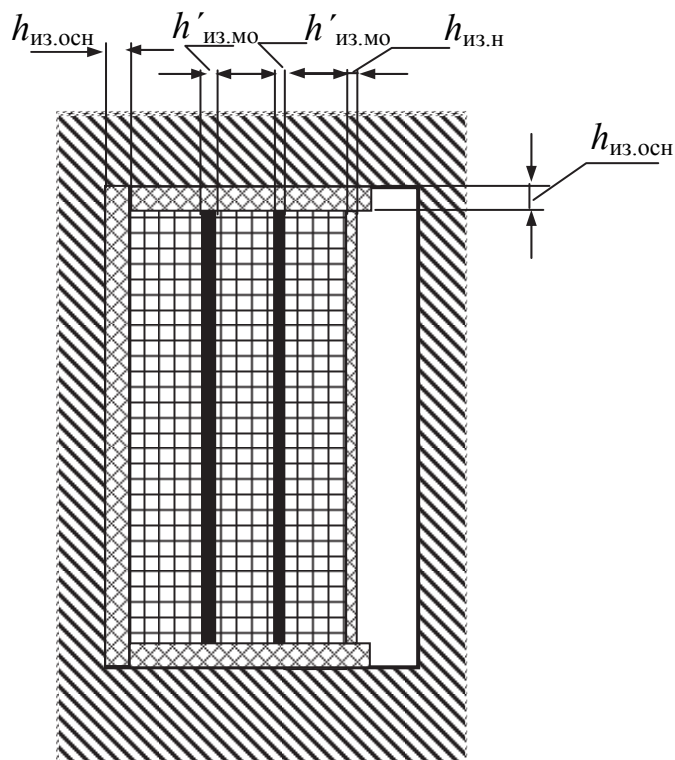


Рис. 8. Изоляционные расстояния при размещении обмоток

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.

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 пропиточной 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 слоёв ЭИП-63Б или четыре слоя К-12; при $U_{исп}$ до 2700 В – шесть слоёв ЭИП-63Б или пять слоёв К-12; при $U_{исп}$ до 3500 В – восемь слоёв ЭИП-63Б или шесть слоёв К-12.

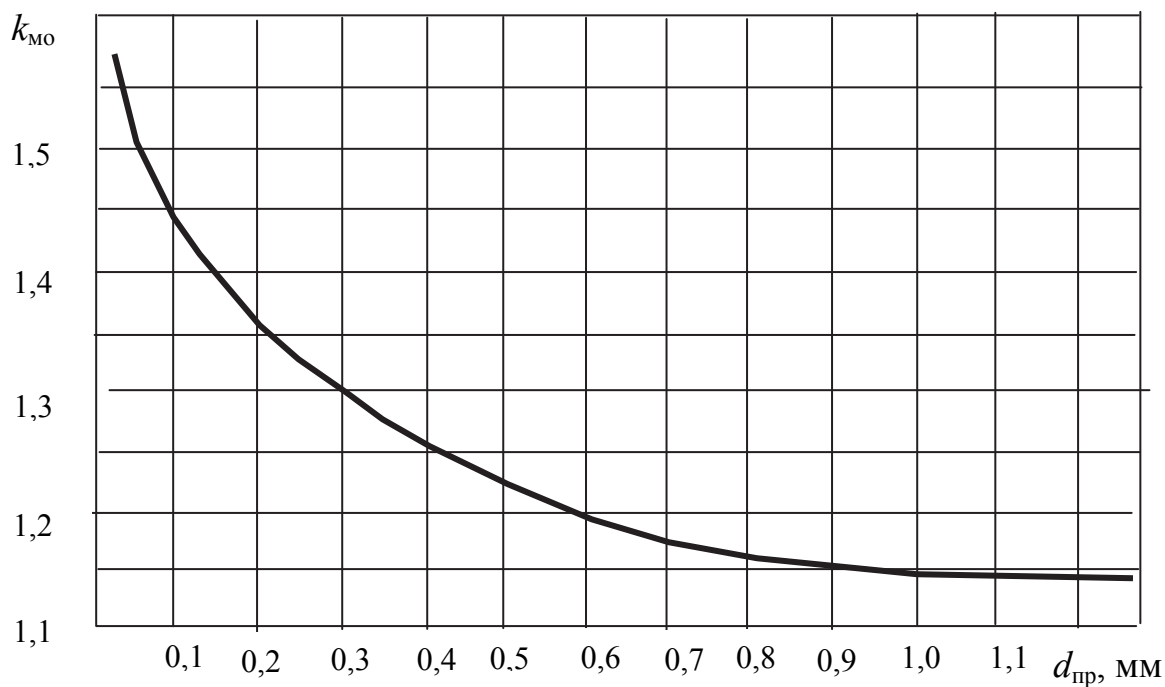


Рис. 9. Зависимость коэффициента неплотности межобмоточной изоляции k_{MO} от диаметра провода $d_{пр}$

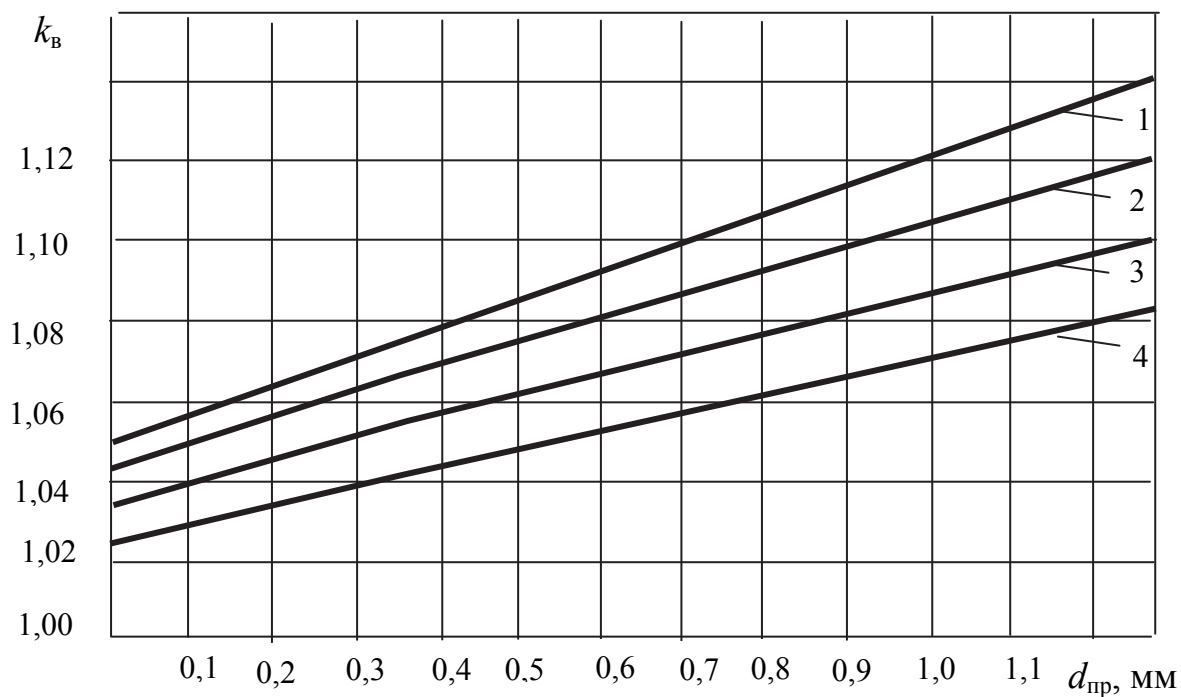


Рис. 10. Зависимость коэффициента выпучивания k_B в радиальном направлении от диаметра провода $d_{пр}$ и конструкции гильзы:
 1 – $b/a = 2,0$; 2 – $b/a = 1,6$; 3 – $b/a = 1,25$; 4 – $b/a = 1,0$

Величина испытательного напряжения определяется в зависимости от амплитудного значения рабочего напряжения по рис. 11. При этом амплитудное значение рабочих напряжений обмоток U_{mp} , В, может быть определено из выражения

$$U_{mp} = \sqrt{2}U_p,$$

где U_p – рабочее напряжение обмоток, В.

Толщина наружной изоляции $h_{из.н}$ выбирается в соответствии с рабочим напряжением последней обмотки. При $U_p < 500$ В наружную изоляцию выполняют из двух слоёв 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 , м, для броневых и стержневых трансформаторов с одной прямоугольной катушкой

$$\varepsilon = c - a_{кат}.$$

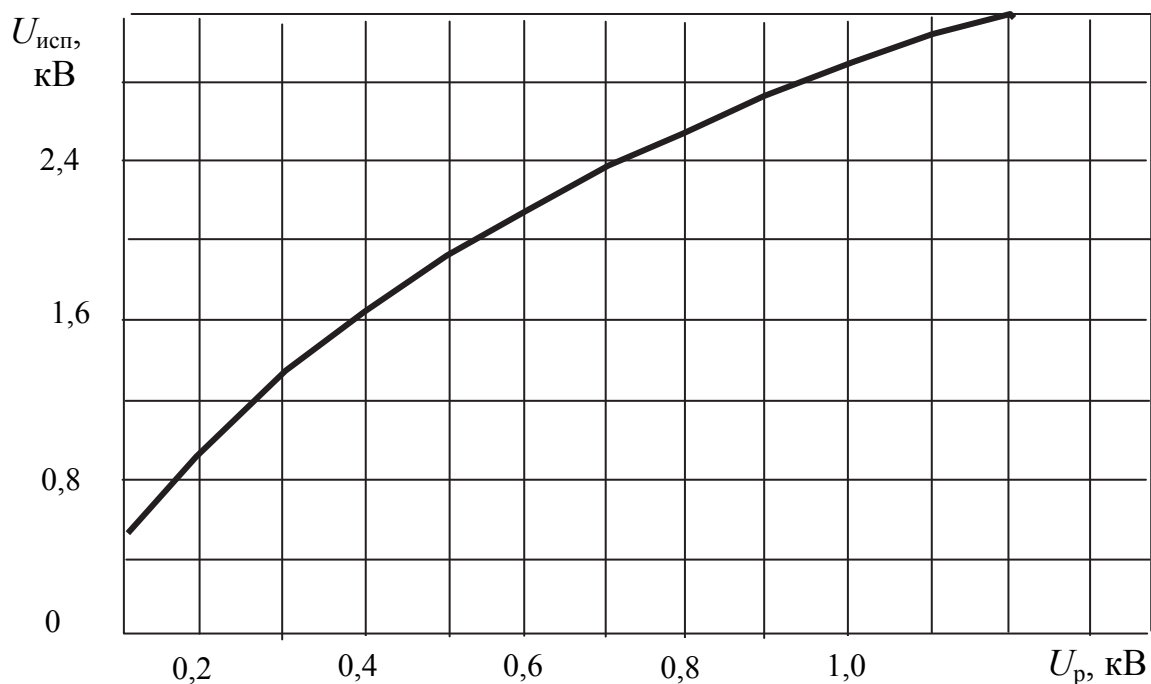


Рис. 11. Зависимость испытательного напряжения от рабочего напряжения обмотки в амплитудных значениях

Для стержневых трансформаторов с одной круглой катушкой

$$\varepsilon = c - \varepsilon_0 - a_{кат},$$

где ε_0 – внутренний зазор от стержня до катушки, м.

Внутренний зазор от стержня до катушки ε_0 , м, вычисляется по формуле

$$\varepsilon_0 = \frac{D_0 - a}{2},$$

где D_0 – диаметр каркаса, м.

Величина зазора между катушками для двухкатушечного стержневого трансформатора ε , м:

$$\varepsilon = c - 2a_{\text{кат}}.$$

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

Определение средней длины витка обмоток

Для прямоугольных катушек средние длины витков соответствующих обмоток $l_{\text{ср.в}i}$, м, определяются по следующим формулам (рис. 12):

$$l_{\text{ср.в}1} = 2(a_{\text{к}} + b_{\text{к}}) + 2\pi r_1, \quad l_{\text{ср.в}2} = 2(a_{\text{к}} + b_{\text{к}}) + 2\pi r_2, \quad l_{\text{ср.в}3} = 2(a_{\text{к}} + b_{\text{к}}) + 2\pi r_3,$$

где $a_{\text{к}}$, $b_{\text{к}}$ – наружные размеры каркаса или гильзы, м; r_1 , r_2 , r_3 – средние радиусы закруглений соответствующих обмоток, м.

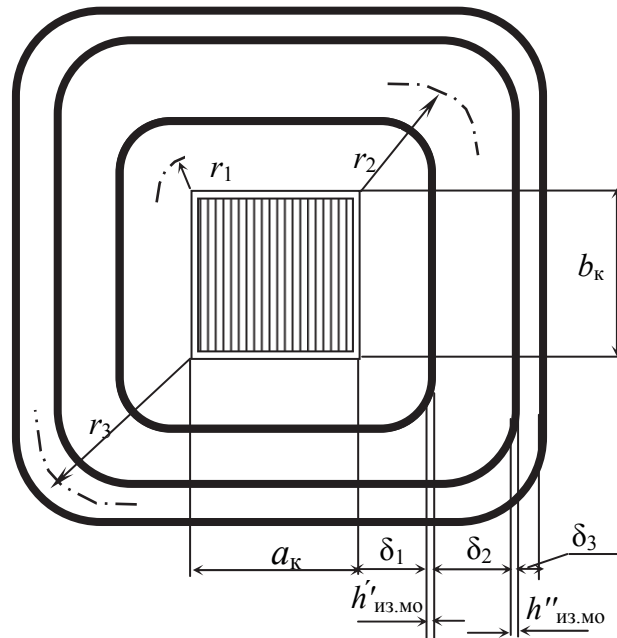


Рис. 12. К определению средней длины витка обмоток

Наружные размеры каркаса (гильзы) вычисляются по формулам

$$a_{\text{к}} = a + 2\Delta_3 + 2h_{\text{из.ос}} k_{\text{в}}, \quad b_{\text{к}} = b + 2\Delta_3 + 2h_{\text{из.ос}} k_{\text{в}}.$$

Средние радиусы закруглений обмоток для случая, когда они намотаны на катушке в порядке первая – вторая – третья можно определить следующим образом:

$$r_1 = \frac{\delta_1}{2} k_B; \quad r_2 = \left(\delta_1 + h'_{\text{из.мо}} k_{\text{мо}} + \frac{\delta_2}{2} \right) k_B, \quad r_3 = \left(\delta_1 + h'_{\text{из.мо}} k_{\text{мо}} + \delta_2 + h''_{\text{из.мо}} k_{\text{мо}} + \frac{\delta_3}{2} \right) k_B.$$

При расположении обмоток в последовательности вторая – первая – третья значения r_1 и r_2 , м, определяются по формулам

$$r_1 = \left(\delta_2 + h'_{\text{из.мо}} k_{\text{мо}} + \frac{\delta_1}{2} \right) k_B, \quad r_2 = \frac{\delta_2}{2} k_B.$$

Для круглых катушек при расположении обмоток в последовательности первая – вторая – третья значения $l_{\text{ср.}vi}$, м, вычисляются по следующим формулам:

$$l_{\text{ср.}v1} = \pi \left(a\sqrt{2} + 2\Delta_3 + 2h_{\text{из.ос}} + \delta_1 \right),$$

$$l_{\text{ср.}v2} = \pi \left(a\sqrt{2} + 2\Delta_3 + 2h_{\text{из.ос}} + 2\delta_1 + 2h'_{\text{из.мо}} k_{\text{мо}} + \delta_2 \right),$$

$$l_{\text{ср.}v3} = \pi \left[a\sqrt{2} + 2 \left(\Delta_3 + h_{\text{из.ос}} + \delta_1 + h'_{\text{из.мо}} k_{\text{мо}} + \delta_2 + h''_{\text{из.мо}} k_{\text{мо}} \right) + \delta_3 \right].$$

Расчёт массы меди обмоток

Масса меди обмоток G_{mi} , кг, определяется по формуле

$$G_{mi} = 8900 W_i q_i l_{\text{ср.}vi},$$

где W_i – число витков соответствующей обмотки ($i = 1, 2, 3$); q_i – поперечное сечение проводников соответствующей обмотки, м²; i – номер соответствующей обмотки.

Суммарная масса обмоток трансформатора G_M , кг:

$$G_M = G_{M1} + G_{M2} + G_{M3},$$

где G_{M1} , G_{M2} , G_{M3} – массы меди отдельных обмоток, кг.

Определение массы стали

Масса стали трансформатора $G_{ст}$, кг, определяется по формуле

$$G_{ст} = \gamma_{ст} V_{ст} = \gamma_{ст} l_{ст} Q_c k_{ст},$$

где $\gamma_{ст} = 7800$ – удельный вес стали, кг/м³; $V_{ст}$ – объём стали, м³; $l_{ст}$ – средняя длина силовых линий магнитного потока в сердечнике, м (определяется по формулам, приведённым в табл. 8).

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

те на минимум стоимости $\alpha = 4 \dots 6$, а при расчёте на минимум массы трансформатора $\alpha = 2 \dots 3$.

Если заданное условие расчёта не выполнено, необходимо сначала внимательно проверить правильность расчётов. При отсутствии ошибок в расчёте, значения α меньше допустимого и 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 расчёте на минимум массы, если α получится больше трёх, следует уменьшить высоту и увеличить ширину окна сердечника, взяв отношение высоты к ширине меньше трёх, но не меньше двух.

Таблица 8

Выбор основных расчётных формул для определения некоторых величин

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

Определение потерь в стали и намагничивающего тока

Для сердечников из сталей 1512, 1521, 3411 и 3412 потери в стали $P_{ст}$, Вт, определяются по формуле

$$P_{ст} = P_{уд} G_{ст},$$

где $P_{уд}$ – удельные потери, Вт/кг.

Величина удельных потерь в сердечнике зависит от значения магнитной индукции B_c , марки стали, толщины листа, частоты сети и типа сердечника (рис. 13, 14).

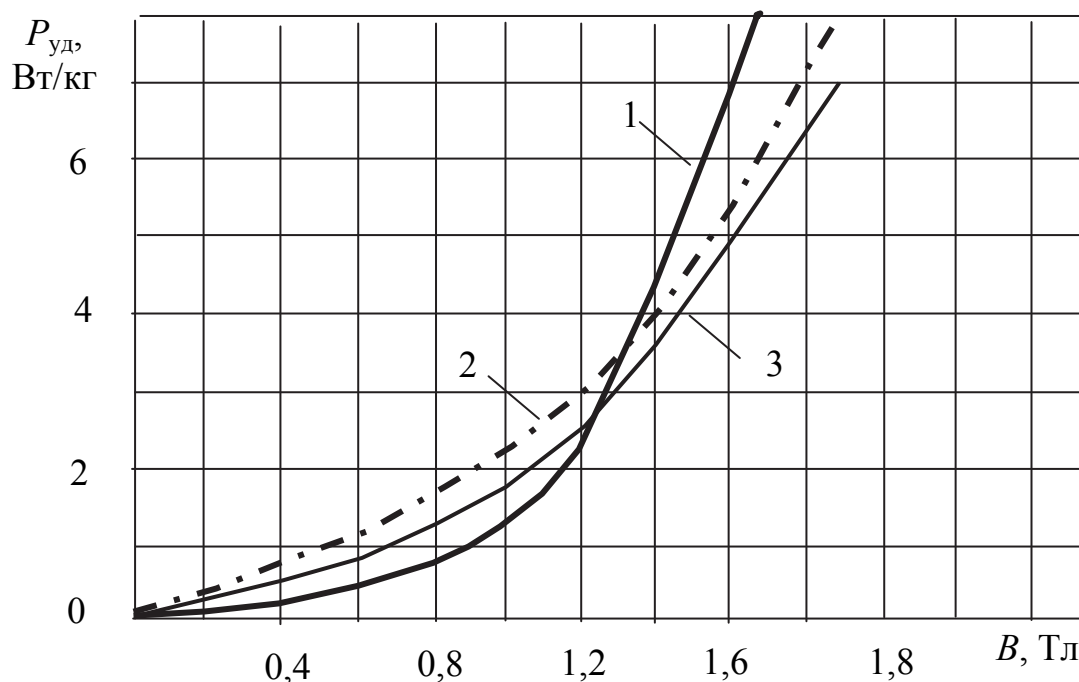


Рис. 13. Удельные потери в сердечниках из трансформаторных сталей толщиной 0,35 мм при частоте 50 Гц: 1 – броневые сердечники из стали 1512 и 1521; 2 – стержневые сердечники из стали 3411 и 3412; 3 – броневые сердечники из стали 3411 и 3412

Активная составляющая намагничивающего тока I_{0a} , А:

$$I_{0a} = \frac{P_{ст}}{E_1}.$$

Реактивная составляющая намагничивающего тока I_{0p} , А, для магнитопроводов ТММ может быть определена по формуле

$$I_{0p} = \frac{H_c l_{ст} + 0,8 B_c n \delta_3 \cdot 10^6}{\sqrt{2} W_1},$$

где H_c – напряжённость поля в стали, определяемая для индукции B_c по кривым намагничивания (рис. 15), А/м; n – число зазоров (стыков) на пути силовой линии (для стержневых и броневых трансформаторов рекомендуется выбирать конструкцию сердечника с числом стыков $n = 2$); δ_s – величина эквивалентного воздушного зазора в стыках сердечника трансформатора, м (для шихтованных сердечников $\delta_s = 0,02 \dots 0,04$ мм и для ленточных разрезных $\delta_s = 0,015 \dots 0,03$ мм).

Ток холостого хода I_{10} , А:

$$I_{10} = \sqrt{I_{0a}^2 + I_{0p}^2}.$$

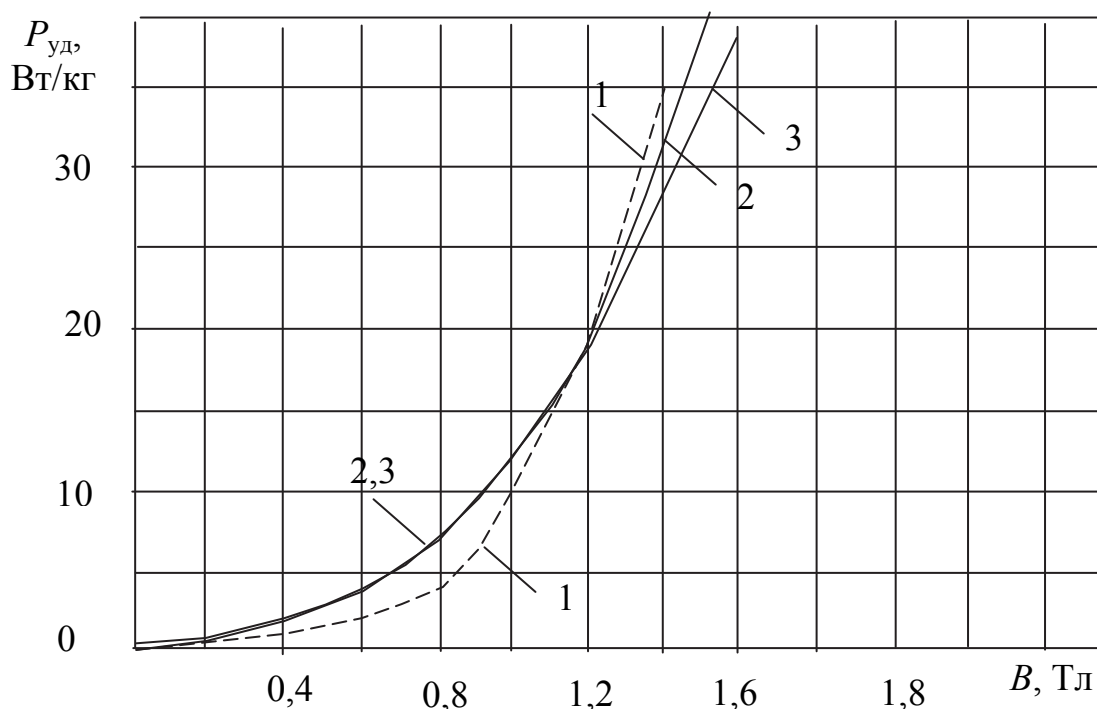


Рис. 14. Удельные потери в сердечниках из трансформаторных сталей при частоте 400 Гц: 1 – броневые сердечники из стали 1512 и 1521; 2 – стержневые сердечники из стали 3411 и 3412; 3 – броневые сердечники из стали 3411 и 3412

Ток первичной обмотки при номинальной нагрузке I_1 , А:

$$I_1 = \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1p}^2},$$

где I_{1a} , I_{1p} – соответственно активная и реактивная составляющие тока первичной обмотки при номинальной нагрузке, А.

Активную и реактивную составляющие тока можно определить по следующим формулам:

$$I_{1a} = I_{0a} + I'_{2a} + I'_{3a}, \quad I_{1p} = I_{0p} + I'_{2p} + I'_{3p},$$

где I'_{2a} , I'_{3a} , I'_{2p} , I'_{3p} – приведённые значения активной и реактивной составляющих токов соответствующих вторичных обмоток, А.

Приведённые значения активной и реактивной составляющих токов вторичных обмоток можно определить по следующим формулам:

$$I'_{2a} = \frac{S_2 \cos \phi_2}{U_2} \cdot \frac{W_2}{W_1}, \quad I'_{3a} = \frac{S_3 \cos \phi_3}{U_3} \cdot \frac{W_3}{W_1},$$

$$I'_{2p} = \frac{S_2 \sin \phi_2}{U_2} \cdot \frac{W_2}{W_1}, \quad I'_{3p} = \frac{S_3 \sin \phi_3}{U_3} \cdot \frac{W_3}{W_1}.$$

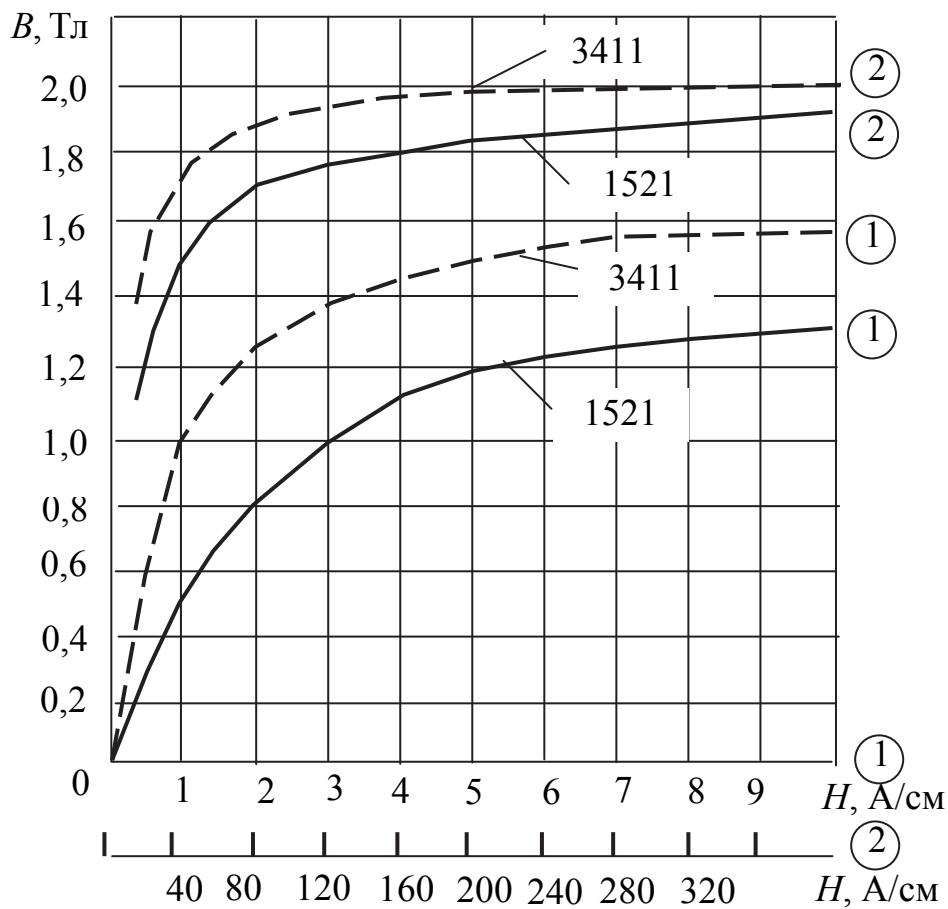


Рис. 15. Характеристики намагничивания электротехнических сталей марок 1521 и 3411

Относительное значение тока холостого хода I_{10}^* в относительных единицах (далее – о.е.)

$$I_{10}^* = \frac{I_{10}}{I_1}.$$

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 расчёта можно считать окончанным.

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.

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

Коэффициент мощности

$$\cos \phi_1 = \frac{I_{1a}}{I_1}.$$

Определение потерь в меди обмоток трансформатора

Потери в меди обмоток P_{mi} , Вт, определяются по формуле

$$P_{mi} = k_t j_i^2 G_{mi} \cdot 10^{-12},$$

где k_t – коэффициент, зависящий от температуры провода; j_i – плотность тока в i -й обмотке ($i = 1, 2, 3$), А/м²; G_{mi} – масса меди соответствующих обмоток, кг.

Значения коэффициента k_t при различных температурах провода приведены в табл. 9.

Таблица 9

Значения коэффициента k_t при различных температурах провода

Температура провода t , °С	90	105	120	130	155	180	200
Значение коэффициента k_t	2,52	2,65	2,76	2,84	3,02	3,23	3,38

Суммарные потери в меди обмоток P_m , Вт:

$$P_m = P_{m1} + P_{m2} + P_{m3}.$$

После определения потерь в стали и меди необходимо проверить значение β :

$$\beta = \frac{P_m}{P_{ст}}.$$

Для хорошо спроектированного трансформатора отношение β должно находиться в пределах 1,25...2 (в некоторых случаях до 2,5) при частоте 50 Гц и в пределах 0,9...1,5 при частоте 400 Гц.

Определение активных сопротивлений обмоток

Активные сопротивления обмоток при температуре 105 °С r_{105i} , Ом:

$$r_{105i} = \rho l_{\text{ср.в}i} \frac{W_i}{q_i},$$

где ρ – удельное сопротивление медного провода (при $t = 105$ °С $\rho = 2,35 \cdot 10^{-8}$ Ом·м); $l_{\text{ср.в}i}$ – средняя длина витка i -й обмотки, м; q_i – сечение проводника соответствующей обмотки, м²; W_i – число витков i -й обмотки.

При температуре окружающей среды 20 °С активное сопротивление обмотки r_{20} , Ом, можно вычислить по формуле

$$r_{20} = \frac{1,75r_{105}}{2,35}.$$

Сопротивления вторичных обмоток, приведённые к первичной, r'_2 и r'_3 , Ом, определим по формулам

$$r'_2 = r_2 \left(\frac{W_1}{W_2} \right)^2, \quad r'_3 = r_3 \left(\frac{W_1}{W_3} \right)^2,$$

где r_2 и r_3 – активные сопротивления соответствующих обмоток при температуре 105 °С, Ом.

Определение индуктивных сопротивлений рассеяния обмоток

Индуктивное сопротивление рассеяния i -й обмотки x_i^* , о.е.:

$$x_i^* = \frac{7,9W_1 I_1 f \cdot 10^{-6}}{E_B} \cdot \frac{S_{pi}}{h_k},$$

где S_{pi} – площадь канала рассеяния i -й обмотки ($i = 1, 2, 3$), м²; h_k – высота катушки, м.

Значение высоты катушки можно вычислить по формуле

$$h_k = h - 2h_{\text{из}}.$$

При размещении обмоток в порядке первая – вторая – третья (рис. 16, а) площади каналов рассеяния определяются следующим образом:

$$S_{p1} = \frac{\delta_1}{3} l_{\text{ср.в}1} + \frac{k_B k_{\text{мо}12} h_{\text{из.мо}12}}{2} l_{12},$$

$$S_{p2} = \frac{k_B k_{\text{мо}12} h_{\text{из.мо}12}}{2} l_{12} + \frac{\delta_2}{3} l_{\text{ср.в}2} (1 + I_2^* + I_3^{*2}) + \frac{k_B k_{\text{мо}23} h_{\text{из.мо}23}}{2} l_{23} I_3^{*2},$$

$$S_{p3} = \frac{k_B k_{MO23} h_{из.МО23}}{2} l_{23} I_3^{*2} + \frac{\delta_3}{3} l_{ср.в3} I_3^{*2},$$

где $h_{из.МО12}$, $h_{из.МО23}$ – толщины изоляции между соответствующими обмотками, м (зависят от испытательного напряжения); l_{12} , l_{23} – средние длины витков двух соответствующих обмоток, м; I_2^* , I_3^* – относительные значения токов вторичных обмоток, о.е.

Значения l_{12} и l_{23} , м, определяются выражениями

$$l_{12} \approx \frac{l_{ср.в1} + l_{ср.в2}}{2}, \quad l_{23} \approx \frac{l_{ср.в2} + l_{ср.в3}}{2}.$$

Относительные значения токов вторичных обмоток I_2^* и I_3^* , о.е.:

$$I_2^* = \frac{I'_2}{I_1}, \quad I_3^* = \frac{I'_3}{I_1},$$

где I'_2 , I'_3 – приведённые токи вторичных обмоток, А.

Значения приведённых токов вторичных обмоток I'_2 и I'_3 , А, определяются по формулам

$$I'_2 = I_2 \frac{W_2}{W_1}, \quad I'_3 = I_3 \frac{W_3}{W_1}.$$

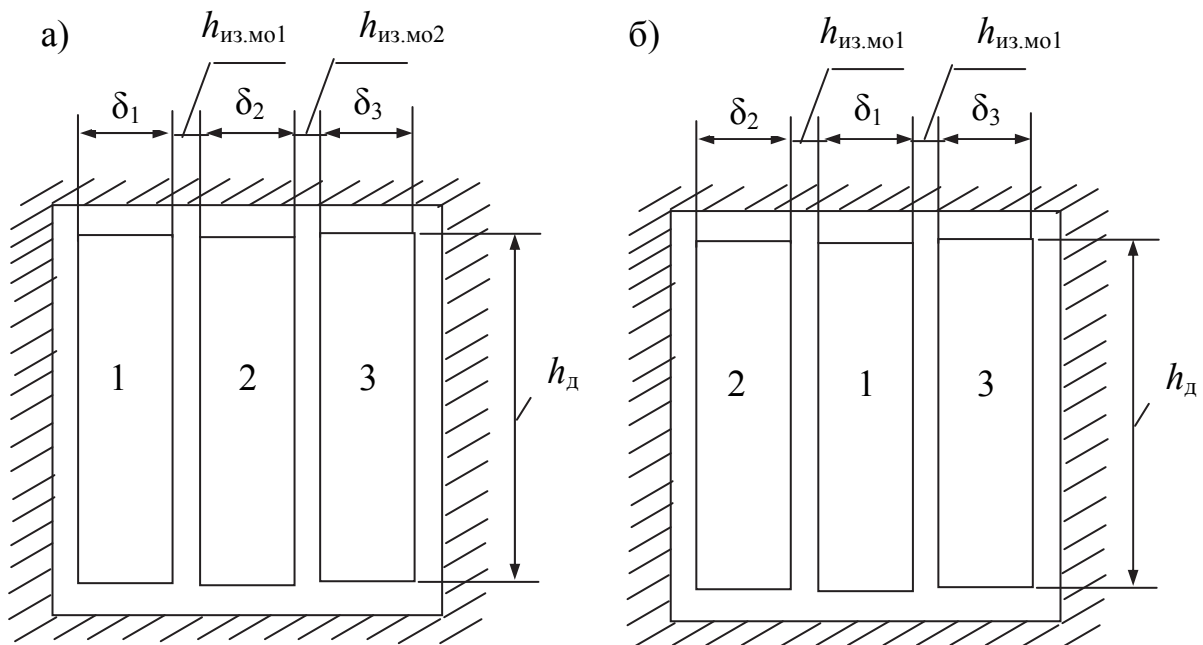


Рис. 16. К определению индуктивных сопротивлений рассеяния

При размещении обмоток в порядке вторая – первая – третья (рис. 16, б) площади каналов рассеяния, m^2 , определяются по формулам

$$S_{p1} = I_2^* l_{12} \left(I_2^* \frac{\delta_1}{3} + \frac{k_B k_{mo12} h_{из.мо12}}{2} \right) + I_3^* l_{13} \left(I_3^* \frac{\delta_1}{3} + \frac{k_B k_{mo13} h_{из.мо13}}{2} \right),$$

$$S_{p2} = \frac{k_B k_{mo12} h_{из.мо12}}{2} l_{12} + \frac{\delta_2}{3} l_{ср.в2}, \quad S_{p3} = \frac{\delta_3}{3} l_{ср.в3} + \frac{k_B k_{mo13} h_{из.мо13}}{2} l_{13},$$

где l_{13} – средняя длина витков первой и третьей обмоток, м.

Значение l_{13} , м, можно определить по формуле

$$l_{13} \approx \frac{l_{ср.в1} + l_{ср.в3}}{2}.$$

Падения напряжений на обмотках при номинальной нагрузке

Активные и реактивные составляющие падений напряжений на обмотках при номинальной нагрузке, о.е., вычисляются по формулам

$$\Delta U_{a1}^* = \frac{r_1 I_1}{U_1}, \quad \Delta U_{a2}^* = \frac{r_2 I_1}{U_1}, \quad \Delta U_{a3}^* = \frac{r_3 I_1}{U_1},$$

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

где r_1, r_2, r_3 – сопротивления обмоток при температуре 105 °С, Ом.

Полные падения напряжения на вторичных обмотках при номинальной нагрузке трансформатора, о.е.:

$$\Delta U_{12}^* = \Delta U_{a1}^* \cos \phi_1 + \Delta U_{p1}^* \sin \phi_1 + \frac{I_2 W_2}{I_1 W_1} (\Delta U_{a2}^* \cos \phi_2 + \Delta U_{p2}^* \sin \phi_2),$$

$$\Delta U_{13}^* = \Delta U_{a1}^* \cos \phi_1 + \Delta U_{p1}^* \sin \phi_1 + \frac{I_3 W_3}{I_1 W_1} (\Delta U_{a3}^* \cos \phi_3 + \Delta U_{p3}^* \sin \phi_3).$$

Напряжения на вторичных обмотках

Напряжения на вторичных обмотках $U_{2расч}$, $U_{3расч}$, В:

$$U_{2расч} = \frac{W_2}{W_1} U_1 (1 - \Delta U_{12}^*), \quad U_{3расч} = \frac{W_3}{W_1} U_1 (1 - \Delta U_{13}^*).$$

Относительная погрешность, т.е. относительная разность заданных и полученных значений напряжений на вторичных обмотках, выраженная в процентах, определяется по формулам

$$\varepsilon_2 = \frac{|U_2 - U_{2расч}|}{U_2} \cdot 100\%, \quad \varepsilon_3 = \frac{|U_3 - U_{3расч}|}{U_3} \cdot 100\%.$$

Если ε_2 или ε_3 более 2...8 %, то необходимо уточнить числа витков W_2 или W_3 , соответственно оставив число витков W_1 неизменным. После этого с учётом новых значений W_2 и W_3 необходимо внести уточнения в расчёты.

Коэффициент полезного действия трансформатора

Коэффициент полезного действия трансформатора может быть определён при номинальной нагрузке по формуле

$$\eta = \frac{P}{P + P_m + P_{ст}},$$

где P – суммарная активная мощность вторичных обмоток трансформатора, Вт.

Суммарную активную мощность вторичных обмоток трансформатора P , Вт, можно определить по формуле

$$P = U_{2расч} I_2 \cos \phi_2 + U_{3расч} I_3 \cos \phi_3.$$

Проверка трансформатора на нагрев

В маломощных трансформаторах отдача тепла в окружающее пространство осуществляется с открытых частей обмоток и сердечника. Так как между сердечником и обмотками трансформатора имеется достаточный тепловой обмен, то превышение температуры наиболее нагретой части над температурой окружающей среды $\Delta\theta_{тр}$, °С (которое обычно лимитирует мощность трансформатора), можно определить по формуле

$$\Delta\theta_{тр} = \frac{P_m + P_{ст}}{k_T(Q_{обм} + Q_{серд})} + \Delta\theta,$$

где k_T – средний коэффициент теплоотдачи с охлаждающей поверхности трансформатора, Вт/(м²·°С) (при расчёте приближённо можно принять равным 13 Вт/(м²·°С)); $Q_{серд}$, $Q_{обм}$ – площади открытых поверхностей сердечника и обмоток трансформатора соответственно, м² (вычисляются по формулам, приведённым в табл. 8); $\Delta\theta$ – перепад температуры от внутренних слоёв обмоток к наружным, °С (для пропитанных лаком обмоток приближённо может быть принят равным 10...15 °С).

Площадь открытой поверхности круглой катушки, м:

$$Q_{обм} \approx \pi D_{нар} h_k,$$

где $D_{нар}$ – наружный диаметр катушки, м.

Величину $D_{нар}$, м, можно определить по следующей формуле:

$$D_{нар} = a + 2a_{кат}.$$

Сумма превышения температуры $\Delta\theta_{\text{тр}}$ и температуры окружающей среды θ_0 не должна быть больше допустимой величины в соответствии с выбранным при расчёте классом нагревостойкости изоляции, т.е.

$$\theta_{\text{тр}} = \Delta\theta_{\text{тр}} + \theta_0 \leq \theta_{\text{доп}}.$$

Например, для изоляции класса нагревостойкости А $\theta_{\text{тр}} \leq 105$ °С, а для изоляции класса нагревостойкости В – $\theta_{\text{тр}} \leq 130$ °С.

Выбор проводов для выводов обмоток

Для обмоток, выполненных проводом диаметром менее 0,2...0,35 мм, выводные концы и отводы выполняют гибким монтажным проводом сечением 0,05...0,2 мм². При более толстых проводах выводы и отводы делают самим проводом, причём при диаметрах более 0,9...1,0 мм отводы выполняют петлей. При диаметрах проводов около 2 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.

Сводные данные расчёта трансформатора

Основные результаты расчёта трансформатора целесообразно оформить в виде формуляра:

Масса стали сердечника, кг	$G_{\text{ст}}$
Удельный расход стали, кг/кВА	$G_{\text{ст}}/S$,
(где S – суммарная полная мощность вторичных обмоток трансформатора)	
Масса меди обмоток, кг	$G_{\text{м}}$
Удельный расход меди, кг/кВА	$G_{\text{м}}/S$
Отношение массы стали к массе меди	$G_{\text{ст}}/G_{\text{м}}$
Потери в стали сердечника, Вт	$P_{\text{ст}}$
Потери в меди обмоток, Вт	$P_{\text{м}}$
Отношение потерь в меди к потерям в стали	$P_{\text{м}}/P_{\text{ст}}$
КПД при номинальной нагрузке.....	η
Максимальное превышение температуры обмотки трансформатора над температурой окружающей среды, °С	$\Delta\theta_{\text{тр}}$
Относительный ток холостого хода	I_0/I_1
Относительные изменения напряжения при номинальной нагрузке:	
на второй обмотке	ΔU_{12}^*
на третьей обмотке	ΔU_{13}^*

По результатам расчёта трансформатора следует составить таблицу обмоточных данных и задание на намотку по образцам, приведённым в приложении 3.

4. ПРИМЕР РАСЧЁТА ТРАНСФОРМАТОРА

Исходные данные расчёта

Напряжение первичной обмотки U_1 , В	220
Напряжения вторичных обмоток U_2/U_3 , В	300/18
Частота тока f , Гц	400
Полные мощности вторичных обмоток S_2/S_3 , ВА	120/50
Коэффициенты мощности $\cos\phi_2/\cos\phi_3$	0,65/0,9
Температура окружающей среды θ_0 , °С	30
Расчётное условие	минимум стоимости

Расчётная мощность трансформатора S_p , ВА:

$$S_p = S_2 + S_3,$$

$$S_p = 120 + 50 = 170.$$

Для рассчитываемого трансформатора мощностью выше 100 ВА при условии минимума стоимости целесообразно использовать броневого пластинчатый магнитопровод. Для частоты сети 400 Гц и при условии минимума стоимости выбираем горячекатаную сталь марки 1521 толщиной 0,2 мм.

Активная составляющая тока первичной обмотки I_{1a} , А:

$$I_{1a} = \frac{S_2 \cos \phi_2 + S_3 \cos \phi_3}{\eta U_1},$$

где η – предварительный КПД трансформатора.

$$I_{1a} = \frac{120 \cdot 0,65 + 50 \cdot 0,9}{0,95 \cdot 220} = 0,589.$$

Предварительный ток намагничивания I_μ , А:

$$I_\mu = (0,35 \dots 0,5) I_{1a},$$

$$I_\mu = 0,4 \cdot 0,589 = 0,236.$$

Реактивная составляющая тока первичной обмотки I_{1p} , А:

$$I_{1p} = \frac{S_2 \sin \phi_2 + S_3 \sin \phi_3}{\eta U_1} + I_\mu,$$

$$I_{1p} = \frac{120 \cdot 0,76 + 50 \cdot 0,436}{0,95 \cdot 220} + 0,236 = 0,777.$$

Ток первичной обмотки I_1 , А:

$$I_1 = \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1p}^2},$$

$$I_1 = \sqrt{0,589^2 + 0,777^2} = 0,975.$$

Ток второй обмотки I_2 , А:

$$I_2 = \frac{S_2}{U_2},$$

$$I_2 = \frac{120}{300} = 0,4.$$

Ток третьей обмотки I_3 , А:

$$I_3 = \frac{S_3}{U_3},$$

$$I_3 = \frac{50}{18} = 2,78.$$

Предварительное значение площади поперечного сечения провода первичной обмотки $q_{1пр}$, м²:

$$q_{1пр} = \frac{I_1}{j_{cp}},$$

где j_{cp} – средняя плотность тока в обмотках, А/м².

$$q_{1пр} = \frac{0,975}{3,4 \cdot 10^6} = 0,287 \cdot 10^{-6}.$$

Предварительное значение площади поперечного сечения провода второй обмотки $q_{2пр}$, м²:

$$q_{2пр} = \frac{I_2}{j_{cp}},$$

$$q_{2пр} = \frac{0,4}{3,4 \cdot 10^6} = 0,118 \cdot 10^{-6}.$$

Предварительное значение площади поперечного сечения провода третьей обмотки $q_{3пр}$, м²:

$$q_{3\text{пр}} = \frac{I_3}{j_{\text{ср}}},$$

$$q_{3\text{пр}} = \frac{2,78}{3,4 \cdot 10^6} = 0,818 \cdot 10^{-6}.$$

Так как трансформатор проектируется по условию минимальной стоимости, то выбираем эмалированный лакостойкий провод марки ПЭЛ, предназначенный для работы при температуре до 105 °С.

Стандартные сечения проводов соответствующих обмоток: $q_1 = 0,2734 \text{ мм}^2$; $q_2 = 0,1134 \text{ мм}^2$; $q_3 = 0,7854 \text{ мм}^2$. Диаметры проводов обмоток без изоляции: $d_1 = 0,59 \text{ мм}$; $d_2 = 0,38 \text{ мм}$; $d_3 = 1,00 \text{ мм}$. Диаметры проводов обмоток с изоляцией: $d_{1и} = 0,64 \text{ мм}$; $d_{2и} = 0,42 \text{ мм}$; $d_{3и} = 1,07 \text{ мм}$.

Уточнённая плотность тока в первичной обмотке j_1 , А/м²:

$$j_1 = \frac{I_1}{q_1},$$

$$j_1 = \frac{0,975}{0,2734 \cdot 10^{-6}} = 3,57 \cdot 10^6.$$

Уточнённая плотность тока во второй обмотке j_2 , А/м²:

$$j_2 = \frac{I_2}{q_2},$$

$$j_2 = \frac{0,4}{0,1134 \cdot 10^{-6}} = 3,53 \cdot 10^6.$$

Уточнённая плотность тока в третьей обмотке j_3 , А/м²:

$$j_3 = \frac{I_3}{q_3},$$

$$j_3 = \frac{2,78}{0,7854 \cdot 10^{-6}} = 3,54 \cdot 10^6.$$

Полная мощность первичной обмотки трансформатора S_1 , ВА:

$$S_1 = U_1 I_1,$$

$$S_1 = 220 \cdot 0,975 = 214,5.$$

Поперечное сечение стержня сердечника (по стали) $Q_{\text{ст.расч}}$, м²:

$$Q_{\text{ст.расч}} = C \sqrt{\frac{\alpha S_1}{f B_{\text{с.пред}} j_{\text{ср}}}},$$

где C – постоянный коэффициент; α – отношение массы стали к массе меди; $B_{с.пред}$ – предварительное значение магнитной индукции, Тл.

$$Q_{ст.расч} = 0,7 \sqrt{\frac{4,4 \cdot 214,5}{400 \cdot 0,9 \cdot 3,4 \cdot 10^6}} = 6,15 \cdot 10^{-4}.$$

Полное поперечное сечение стержня $Q_{ст.полн}$, м² (с учётом междулистовой изоляции)

$$Q_{ст.полн} = \frac{Q_{ст.расч}}{k_{ст}},$$

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

$$Q_{ст.полн} = \frac{6,15 \cdot 10^{-4}}{0,85} = 7,24 \cdot 10^{-4}.$$

Так как трансформатор должен иметь минимум стоимости, то целесообразно обмотку, имеющую меньшее поперечное сечение провода располагать ближе к сердечнику. Выбираем следующее расположение обмоток на стержне: вторая – первая – третья.

ЭДС в первичной обмотке трансформатора E_1 , В:

$$E_1 = U_1 \left(1 - \frac{\Delta U_{1\%}}{100} \right),$$

где $\Delta U_{1\%}$ – падение напряжения в первичной обмотке при нагрузке в процентах от номинального значения напряжения.

$$E_1 = 220 \left(1 - \frac{1,3}{100} \right) = 217,1.$$

ЭДС во второй обмотке трансформатора E_2 , В:

$$E_2 = U_2 \left(1 + \frac{\Delta U_{2\%}}{100} \right),$$

где $\Delta U_{2\%}$ – падение напряжения во второй обмотке при нагрузке в процентах от номинального значения напряжения.

$$E_2 = 300 \cdot \left(1 + \frac{1,6}{100} \right) = 304,8.$$

ЭДС в третьей обмотке трансформатора E_3 , В:

$$E_3 = U_3 \left(1 + \frac{\Delta U_{3\%}}{100} \right),$$

где $\Delta U_{3\%}$ – падение напряжения в третьей обмотке при нагрузке, %.

$$E_3 = 18 \cdot \left(1 + \frac{1,6}{100}\right) = 18,3.$$

Предварительная ЭДС одного витка $E_{в.пред}$, В:

$$E_{в.пред} = 4,44 f B_{с.пред} Q_{ст.расч},$$

$$E_{в.пред} = 4,44 \cdot 400 \cdot 0,9 \cdot 6,15 \cdot 10^{-4} = 0,983.$$

Предварительное число витков в первичной обмотке $W_{1пред}$

$$W_{1пред} = \frac{E_1}{E_{в.пред}},$$

$$W_{1пред} = \frac{217,1}{0,983} = 221.$$

Предварительное число витков во второй обмотке $W_{2пред}$

$$W_{2пред} = \frac{E_2}{E_{в.пред}},$$

$$W_{2пред} = \frac{304,8}{0,983} = 310.$$

Предварительное число витков в третьей обмотке $W_{3пред}$

$$W_{3пред} = \frac{E_3}{E_{в.пред}},$$

$$W_{3пред} = \frac{18,3}{0,983} = 18,6.$$

Принимаем число витков в третьей обмотке трансформатора $W_3 = 19$.

Уточнённая ЭДС одного витка $E_{в}$, В:

$$E_{в} = E_{в.пред} \frac{W_{3пред}}{W_3},$$

$$E_{в} = 0,983 \cdot \frac{18,6}{19} = 0,962.$$

Уточнённая магнитная индукция в стержне, Тл:

$$B_{с.расч} = B_{с.пред} \frac{W_{3пред}}{W_3},$$

$$B_{\text{с.расч}} = 0,9 \cdot \frac{18,6}{19} = 0,881.$$

Уточнённое число витков в первичной обмотке W_1

$$W_1 = W_{1\text{пред}} \frac{W_3}{W_{3\text{пред}}},$$

$$W_1 = 221 \cdot \frac{19}{18,6} = 226.$$

Уточнённое число витков во вторичной обмотке W_2

$$W_2 = W_{2\text{пред}} \frac{W_3}{W_{3\text{пред}}},$$

$$W_2 = 310 \cdot \frac{19}{18,6} = 317.$$

Уточнённая ЭДС первичной обмотки E_1 , В:

$$E_1 = E_{\text{в}} W_1,$$

$$E_1 = 0,962 \cdot 226 = 217,4.$$

Напряжение на второй обмотке при холостом ходе U_{20} , В:

$$U_{20} = E_{\text{в}} W_2,$$

$$U_{20} = 0,962 \cdot 317 = 305.$$

Напряжение на третьей обмотке при холостом ходе U_{30} , В:

$$U_{30} = E_{\text{в}} W_3,$$

$$U_{30} = 0,962 \cdot 19 = 18,3.$$

Площадь окна сердечника, необходимая для размещения всех обмоток трансформатора $F_{0\text{тр}}$, м²:

$$F_{0\text{тр}} = \frac{q_1 W_1 + q_2 W_2 + q_3 W_3}{k_{\text{ок}}},$$

где $k_{\text{ок}}$ – коэффициент заполнения окна магнитопровода.

$$F_{0\text{тр}} = \frac{0,2734 \cdot 10^{-6} \cdot 226 + 0,1134 \cdot 10^{-6} \cdot 317 + 0,8495 \cdot 10^{-6} \cdot 19}{0,25} = 4,56 \cdot 10^{-4}.$$

Предварительные оптимальные отношения $b/a = 1,5$ и $h/c = 3,0$.

Толщина пакета сердечника b , м:

$$b = \sqrt{Q_{\text{ст.полн}} (b/a)},$$

$$b = \sqrt{7,24 \cdot 10^{-4} \cdot 1,5} = 33,0 \cdot 10^{-3}.$$

Высота окна сердечника h , м:

$$h = \sqrt{F_{0\text{тр}} (h/c)},$$

$$h = \sqrt{4,56 \cdot 10^{-4} \cdot 3,0} = 37,0 \cdot 10^{-3}.$$

Ширина стержня a , м:

$$a = \frac{b}{(b/a)},$$

$$a = \frac{33,0 \cdot 10^{-3}}{1,5} = 22,0 \cdot 10^{-3}.$$

Ширина окна сердечника c , м:

$$c = \frac{h}{(h/c)},$$

$$c = \frac{37,0 \cdot 10^{-3}}{3,0} = 12,3 \cdot 10^{-3}.$$

Выбираем стандартный сердечник типа ШУ 22×33, который имеет следующие размеры (рис. 17):

- ширина стержня $a = 22$ мм;
- толщина пакета сердечника $b = 33$ мм;
- высота окна сердечника $h = 39$ мм;
- ширина окна сердечника $c = 14$ мм.

Площадь поперечного сечения стержня сердечника $Q_c = 7,26 \text{ см}^2$ близка к расчётной $Q_{\text{ст.полн}} = 7,24 \text{ см}^2$, а площадь окна выбранного сердечника $F_0 = 5,46 \text{ см}^2$ больше необходимого $F_{0\text{треб}} = 4,56 \text{ см}^2$, что удовлетворяет требованиям выбора сердечника.

Уточнённая магнитная индукция в стержне магнитопровода B_c , Тл:

$$B_c = B_{\text{с.расч}} \frac{Q_{\text{ст.полн}}}{Q_c},$$

$$B_c = 0,881 \cdot \frac{7,24 \cdot 10^{-4}}{7,26 \cdot 10^{-4}} = 0,879.$$

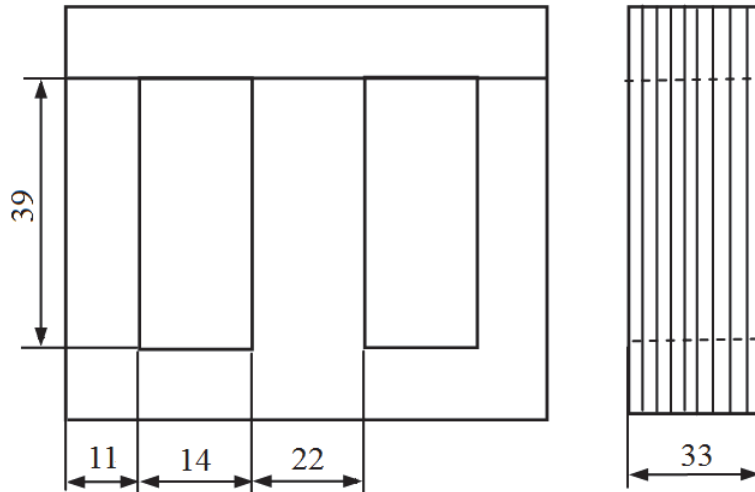


Рис. 17. Броневого пластинчатый магнитопровод трансформатора с размерами в миллиметрах

Число витков первичной обмотки в одном слое n_1

$$n_1 = \frac{h - 2h_{\text{из}}}{d_{1\text{н}} k_{y11}},$$

где $h_{\text{из}}$ – изоляционное расстояние от обмотки до ярма, м; k_{y11} – коэффициент укладки провода первичной обмотки в осевом направлении.

$$n_1 = \frac{0,039 - 2 \cdot 0,003}{0,64 \cdot 10^{-3} \cdot 1,043} = 49.$$

Число слоёв первичной обмотки трансформатора m_1

$$m_1 = \frac{W_1}{n_1},$$

$$m_1 = \frac{226}{49} = 4,61.$$

Число слоёв первичной обмотки округляем до $m_1 = 5$.

Напряжение между двумя слоями первичной обмотки U_{c1} , В:

$$U_{c1} = 2n_1 E_B,$$

$$U_{c1} = 2 \cdot 49 \cdot 0,962 = 94,3.$$

Так как напряжение U_{c1} превышает 50 В, то между двумя слоями обмотки размещаем изоляционные прокладки с толщиной $\gamma_{\text{мс}} = 0,08$ мм.

Толщина первичной обмотки δ_1 , м:

$$\delta_1 = k_{y21} m_1 d_{1\text{н}} + k_{\text{мс1}} (m_1 - 1) \gamma_{\text{мс}},$$

где k_{y21} – коэффициент укладки первичной обмотки в радиальном направлении; k_{mc1} – коэффициент неплотности межслоевой изоляции.

$$\delta_1 = 1,057 \cdot 5 \cdot 0,64 \cdot 10^{-3} + 1,06 \cdot (5 - 1) \cdot 0,08 \cdot 10^{-3} = 3,72 \cdot 10^{-3}.$$

Число витков второй обмотки в одном слое n_2

$$n_2 = \frac{h - 2h_{из}}{d_{2и} k_{y12}},$$

где k_{y12} – коэффициент укладки провода второй обмотки в осевом направлении.

$$n_2 = \frac{0,039 - 2 \cdot 0,003}{0,42 \cdot 10^{-3} \cdot 1,05} = 75.$$

Число слоёв второй обмотки трансформатора m_2

$$m_2 = \frac{W_2}{n_2},$$

$$m_2 = \frac{317}{75} = 4,23.$$

Число слоёв второй обмотки округляем до $m_2 = 5$.

Напряжение между двумя слоями второй обмотки U_{c2} , В:

$$U_{c2} = 2n_2 E_B,$$

$$U_{c2} = 2 \cdot 75 \cdot 0,962 = 144,3.$$

Так как напряжение U_{c1} превышает 50 В, то между двумя слоями обмотки размещаем изоляционные прокладки с толщиной $\gamma_{mc} = 0,08$ мм.

Толщина второй обмотки δ_2 , м:

$$\delta_2 = k_{y22} m_2 d_{2и} + k_{mc2} (m_2 - 1) \gamma_{mc},$$

где k_{y22} – коэффициент укладки второй обмотки в радиальном направлении; k_{mc2} – коэффициент неплотности межслоевой изоляции.

$$\delta_2 = 1,075 \cdot 5 \cdot 0,42 \cdot 10^{-3} + 1,075 \cdot (5 - 1) \cdot 0,08 \cdot 10^{-3} = 2,60 \cdot 10^{-3}.$$

Число витков третьей обмотки в одном слое n_3

$$n_3 = \frac{h - 2h_{из}}{d_{3и} k_{y13}},$$

где k_{y13} – коэффициент укладки провода третьей обмотки в осевом направлении.

$$n_3 = \frac{0,039 - 2 \cdot 0,003}{1,07 \cdot 10^{-3} \cdot 1,047} = 29.$$

Число слоёв третьей обмотки трансформатора m_3

$$m_3 = \frac{W_3}{n_3},$$

$$m_3 = \frac{19}{29} = 0,655.$$

Число слоёв третьей обмотки округляем до $m_3 = 1$.

Толщина третьей обмотки δ_3 , м:

$$\delta_3 = k_{y23} m_3 d_{3и},$$

где k_{y23} – коэффициент укладки первичной обмотки в радиальном направлении.

$$\delta_3 = 1,06 \cdot 1 \cdot 1,07 \cdot 10^{-3} = 1,13 \cdot 10^{-3}.$$

Катушку размещаем на каркасе, изготовленном из электротехнического картона. Толщина каркаса $\Delta_k = 2$ мм. Поверх каркаса наматываем изоляционную кабельную бумагу К-12 толщиной $\Delta_{из} = 0,11$ мм при величине рабочего напряжения обмотки 300 В (до 500 В) в два слоя ($n_{из} = 2$).

Толщина каркаса с учётом дополнительной изоляции $h_{из.ос}$, м:

$$h_{из.ос} = \Delta_k + n_{из} \Delta_{из},$$

$$h_{из.ос} = 2 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 0,11 \cdot 10^{-3} = 2,22 \cdot 10^{-3}.$$

Рабочее напряжение между второй и первой обмотками $U_{p21} = 300$ В, а между первой и третьей обмотками – $U_{p13} = 220$ В.

Амплитудное значение рабочего напряжения между второй и первой обмотками U_{mp21} , В:

$$U_{mp21} = \sqrt{2} U_{21},$$

$$U_{mp21} = \sqrt{2} \cdot 300 = 424.$$

Амплитудное значение рабочего напряжения между первой и третьей обмотками U_{mp13} , В:

$$U_{mp13} = \sqrt{2} U_{13},$$

$$U_{mp13} = \sqrt{2} \cdot 220 = 311.$$

Испытательные напряжения: $U_{исп21} = 1700$ В; $U_{исп13} = 1350$ В.

Между второй и первой обмотками применяем четыре слоя кабельной бумаги К-12, а между первой и третьей – три слоя бумаги К-12.

Толщина изоляции между второй и первой обмотками $h_{\text{из.мо21}}$, м:

$$h_{\text{из.мо21}} = n_{\text{из.мо21}} \Delta_{\text{из}},$$

где $n_{\text{из.мо21}}$ – число изоляционных слоев между второй и первой обмотками.

$$h_{\text{из.мо21}} = 4 \cdot 0,11 \cdot 10^{-3} = 0,44 \cdot 10^{-3}.$$

Толщина изоляции между первой и третьей обмотками $h_{\text{из.мо13}}$, м:

$$h_{\text{из.мо13}} = n_{\text{из.мо13}} \Delta_{\text{из}},$$

где $n_{\text{из.мо13}}$ – число изоляционных слоев между первой и третьей обмотками.

$$h_{\text{из.мо13}} = 3 \cdot 0,11 \cdot 10^{-3} = 0,33 \cdot 10^{-3}.$$

Наружную изоляцию катушки выполняем из двух слоёв кабельной бумаги К-12 и одного слоя батистовой ленты толщиной 0,16 мм, наматываемой с половинным перекрытием.

Толщина наружной изоляции $h_{\text{из.н}}$, м:

$$h_{\text{из.н}} = n_{\text{из.н}} \Delta_{\text{из}} + 2\Delta_{\text{б.л}},$$

где $n_{\text{из.н}}$ – число слоёв наружной изоляции; $\Delta_{\text{б.л}}$ – толщина батистовой ленты, м.

$$h_{\text{из.н}} = 2 \cdot 0,11 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 0,16 \cdot 10^{-3} = 0,54 \cdot 10^{-3}.$$

Полный радиальный размер катушки $a_{\text{кат}}$, м:

$$a_{\text{кат}} = \Delta_3 + (h_{\text{из.ос}} + \delta_1 + k_{\text{мо21}} h_{\text{из.мо21}} + \delta_2 + k_{\text{мо13}} h_{\text{из.мо13}} + \delta_3 + k_{\text{но}} h_{\text{из.н}}) k_{\text{в}},$$

где Δ_3 – зазор между каркасом и сердечником, м; $k_{\text{мо21}}$, $k_{\text{мо13}}$ – коэффициенты неплотности межобмоточной изоляции; $k_{\text{но}}$ – коэффициент неплотности намотки наружной изоляции; $k_{\text{в}}$ – коэффициент выпучивания в радиальном направлении.

$$a_{\text{кат}} = 0,5 + (2,22 \cdot 10^{-3} + 3,72 \cdot 10^{-3} + 1,27 \cdot 0,44 \cdot 10^{-3} + 2,6 \cdot 10^{-3} + 1,2 \cdot 0,33 \cdot 10^{-3} + 1,13 \cdot 10^{-3} + 1,85 \cdot 0,54 \cdot 10^{-3}) \cdot 1,1 = 13,3 \cdot 10^{-3}.$$

Зазор между катушкой и сердечником ε , м:

$$\varepsilon = c - a_{\text{кат}},$$

$$\varepsilon = 14 \cdot 10^{-3} - 13,3 \cdot 10^{-3} = 0,7 \cdot 10^{-3}.$$

Величина зазора лежит в пределах 0,5...1,0 мм, что допустимо для нормальной укладки катушки в окне магнитопровода. Эскиз катушки с изоляционными расстояниями в миллиметрах показан на рис. 18.

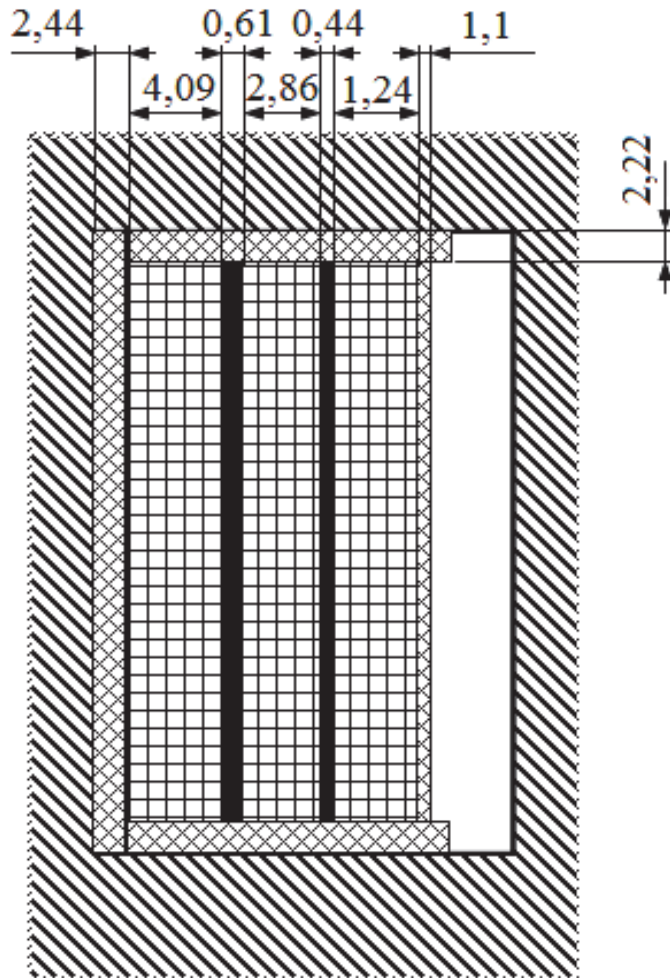


Рис. 18. Катушка трансформатора

Наружные размеры каркаса a_k, b_k , м:

$$a_k = a + 2\Delta_3 + 2h_{из.ос} k_B,$$

$$a_k = 22 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 2,22 \cdot 10^{-3} \cdot 1,1 = 27,9 \cdot 10^{-3}.$$

$$b_k = b + 2\Delta_3 + 2h_{из.ос} k_B,$$

$$b_k = 33 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 2,22 \cdot 10^{-3} \cdot 1,1 = 38,9 \cdot 10^{-3}.$$

Средний радиус изгиба второй обмотки r_2 , м:

$$r_2 = \frac{\delta_2}{2} k_B,$$

$$r_2 = \frac{2,6 \cdot 10^{-3}}{2} \cdot 1,1 = 1,43 \cdot 10^{-3}.$$

Средняя длина витка второй обмотки $l_{ср.в2}$, м:

$$l_{\text{ср.в2}} = 2(a_{\text{к}} + b_{\text{к}}) + 2\pi r_2,$$

$$l_{\text{ср.в2}} = 2(27,9 \cdot 10^{-3} + 38,9 \cdot 10^{-3}) + 2\pi \cdot 1,43 \cdot 10^{-3} = 0,143.$$

Средний радиус изгиба первичной обмотки r_1 , м:

$$r_1 = \left(\delta_2 + h_{\text{из.мо21}} k_{\text{мо21}} + \frac{\delta_1}{2} \right) k_{\text{в}},$$

$$r_1 = \left(2,6 \cdot 10^{-3} + 0,44 \cdot 10^{-3} \cdot 1,27 + \frac{3,72 \cdot 10^{-3}}{2} \right) \cdot 1,1 = 5,52 \cdot 10^{-3}.$$

Средняя длина витка первичной обмотки $l_{\text{ср.в1}}$, м:

$$l_{\text{ср.в1}} = 2(a_{\text{к}} + b_{\text{к}}) + 2\pi r_1,$$

$$l_{\text{ср.в1}} = 2(27,9 \cdot 10^{-3} + 38,9 \cdot 10^{-3}) + 2\pi \cdot 5,52 \cdot 10^{-3} = 0,168.$$

Средний радиус изгиба наружной обмотки r_3 , м:

$$r_3 = \left(\delta_1 + h_{\text{из.мо21}} k_{\text{мо21}} + \delta_2 + h_{\text{из.мо13}} k_{\text{мо13}} + \frac{\delta_3}{2} \right) k_{\text{в}},$$

$$r_3 = (3,72 \cdot 10^{-3} + 0,44 \cdot 10^{-3} \cdot 1,27 + 2,6 \cdot 10^{-3} + 0,33 \cdot 10^{-3} \cdot 1,2 + \frac{1,13 \cdot 10^{-3}}{2}) \cdot 1,1 = 8,62 \cdot 10^{-3}.$$

Средняя длина витка наружной обмотки $l_{\text{ср.в3}}$, м:

$$l_{\text{ср.в3}} = 2(a_{\text{к}} + b_{\text{к}}) + 2\pi r_3,$$

$$l_{\text{ср.в3}} = 2(27,9 \cdot 10^{-3} + 38,9 \cdot 10^{-3}) + 2\pi \cdot 8,62 \cdot 10^{-3} = 0,188.$$

Масса меди первичной обмотки $G_{\text{м1}}$, кг:

$$G_{\text{м1}} = 8900 W_1 q_1 l_{\text{ср.в1}},$$

$$G_{\text{м1}} = 8900 \cdot 226 \cdot 0,2734 \cdot 10^{-6} \cdot 0,168 = 92,4 \cdot 10^{-3}.$$

Масса меди второй обмотки $G_{\text{м2}}$, кг:

$$G_{\text{м2}} = 8900 W_2 q_2 l_{\text{ср.в2}},$$

$$G_{\text{м2}} = 8900 \cdot 317 \cdot 0,1134 \cdot 10^{-6} \cdot 0,143 = 45,8 \cdot 10^{-3}.$$

Масса меди третьей обмотки $G_{\text{м3}}$, кг:

$$G_{\text{м3}} = 8900 W_3 q_3 l_{\text{ср.в3}},$$

$$G_{M3} = 8900 \cdot 19 \cdot 0,7854 \cdot 10^{-6} \cdot 0,188 = 25,0 \cdot 10^{-3}.$$

Суммарная масса обмоток трансформатора G_M , кг:

$$G_M = G_{M1} + G_{M2} + G_{M3},$$

$$G_M = 92,4 \cdot 10^{-3} + 45,8 \cdot 10^{-3} + 25,0 \cdot 10^{-3} = 0,163.$$

Средняя длина силовых линий магнитного потока в сердечнике $l_{ст}$, м:

$$l_{ст} = 2(h + c + a),$$

$$l_{ст} = 2(39 \cdot 10^{-3} + 14 \cdot 10^{-3} + 22 \cdot 10^{-3}) = 0,150.$$

Поперечное сечение магнитопровода (по стали) $Q_{ст}$, м²:

$$Q_{ст} = k_{ст} ab,$$

$$Q_{ст} = 0,85 \cdot 22 \cdot 10^{-3} \cdot 33 \cdot 10^{-3} = 6,17 \cdot 10^{-4}.$$

Масса стали трансформатора $G_{ст}$, кг:

$$G_{ст} = \gamma_{ст} l_{ст} Q_{ст},$$

где $\gamma_{ст}$ – удельный вес стали, кг/м³.

$$G_{ст} = 7800 \cdot 0,150 \cdot 6,17 \cdot 10^{-4} = 0,722.$$

Отношение массы стали к массе меди α

$$\alpha = \frac{G_{ст}}{G_M},$$

$$\alpha = \frac{0,722}{0,163} = 4,43.$$

При расчёте трансформатора на минимум стоимости отношение α должно быть в пределах 4...6. Для рассчитываемого трансформатора это условие выполняется.

Потери в стали $P_{ст}$, Вт:

$$P_{ст} = P_{уд} G_{ст},$$

где $P_{уд}$ – удельные потери, Вт/кг.

$$P_{ст} = 5,5 \cdot 0,722 = 3,97.$$

Активная составляющая намагничивающего тока I_{0a} , А:

$$I_{0a} = \frac{P_{ст}}{E_1},$$

$$I_{0a} = \frac{3,97}{217,4} = 0,0183.$$

Реактивная составляющая намагничивающего тока I_{0p} , А:

$$I_{0p} = \frac{H_c l_{ст} + 0,8 B_c n \delta_3 \cdot 10^6}{\sqrt{2} W_1},$$

где H_c – напряжённость поля в стали, А/м; n – число зазоров (стыков) на пути силовой линии; δ_3 – величина эквивалентного воздушного зазора в стыках сердечника трансформатора, м.

$$I_{0p} = \frac{220 \cdot 0,15 + 0,8 \cdot 0,879 \cdot 2 \cdot 0,02 \cdot 10^{-3} \cdot 10^6}{\sqrt{2} \cdot 226} = 0,191.$$

Ток холостого хода I_{10} , А:

$$I_{10} = \sqrt{I_{0a}^2 + I_{0p}^2},$$

$$I_{10} = \sqrt{0,0183^2 + 0,191^2} = 0,192.$$

Активная составляющая приведённого тока второй обмотки I'_{2a} , А:

$$I'_{2a} = \frac{S_2 \cos \phi_2}{U_2} \cdot \frac{W_2}{W_1},$$

$$I'_{2a} = \frac{120 \cdot 0,65}{300} \cdot \frac{317}{226} = 0,365.$$

Активная составляющая приведённого тока третьей обмотки I'_{3a} , А:

$$I'_{3a} = \frac{S_3 \cos \phi_3}{U_3} \cdot \frac{W_3}{W_1},$$

$$I'_{3a} = \frac{50 \cdot 0,9}{18} \cdot \frac{19}{226} = 0,21.$$

Реактивная составляющая приведённого тока второй обмотки I'_{2p} , А:

$$I'_{2p} = \frac{S_2 \sin \phi_2}{U_2} \cdot \frac{W_2}{W_1},$$

$$I'_{2p} = \frac{120 \cdot 0,76}{300} \cdot \frac{317}{226} = 0,426.$$

Реактивная составляющая приведённого тока третьей обмотки I'_{3p} , А:

$$I'_{3p} = \frac{S_3 \sin \phi_3}{U_3} \cdot \frac{W_3}{W_1},$$

$$I'_{3p} = \frac{50 \cdot 0,436}{18} \cdot \frac{19}{226} = 0,102.$$

Активная составляющая тока первичной обмотки при номинальной нагрузке I_{1a} , А:

$$I_{1a} = I_{0a} + I'_{2a} + I'_{3a},$$

$$I_{1a} = 0,0183 + 0,365 + 0,21 = 0,593.$$

Реактивная составляющая тока первичной обмотки при номинальной нагрузке I_{1p} , А:

$$I_{1p} = I_{0p} + I'_{2p} + I'_{3p},$$

$$I_{1p} = 0,191 + 0,426 + 0,102 = 0,719.$$

Полный ток первичной обмотки при номинальной нагрузке, А:

$$I_1 = \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1p}^2},$$

$$I_1 = \sqrt{0,593^2 + 0,719^2} = 0,932.$$

Относительное значение тока холостого хода I_{10}^* , о.е.:

$$I_{10}^* = \frac{I_{10}}{I_1},$$

$$I_{10}^* = \frac{0,192}{0,932} = 0,2.$$

Величина относительного тока холостого хода при частоте 400 Гц лежит в пределах 0,1...0,2, следовательно, выбор магнитопровода на этой стадии расчёта можно считать окончанным.

Коэффициент мощности

$$\cos \phi_1 = \frac{I_{1a}}{I_1},$$

$$\cos \phi_1 = \frac{0,593}{0,932} = 0,636.$$

Потери в первичной обмотке при температуре 90 °С P_{m1} , Вт:

$$P_{m1} = k_{90} j_1^2 G_{m1} \cdot 10^{-12},$$

где k_{90} – коэффициент, зависящий от температуры провода.

$$P_{M1} = 2,52 \cdot (3,57 \cdot 10^6)^2 \cdot 0,0924 \cdot 10^{-12} = 2,97.$$

Потери во второй обмотке при температуре 90 °С P_{M2} , Вт:

$$P_{M2} = k_{90} j_2^2 G_{M2} \cdot 10^{-12},$$

$$P_{M2} = 2,52 \cdot (3,53 \cdot 10^6)^2 \cdot 0,0458 \cdot 10^{-12} = 1,44.$$

Потери в третьей обмотке при температуре 90 °С P_{M3} , Вт:

$$P_{M3} = k_{90} j_3^2 G_{M3} \cdot 10^{-12},$$

$$P_{M3} = 2,52 \cdot (3,54 \cdot 10^6)^2 \cdot 0,025 \cdot 10^{-12} = 0,789.$$

Суммарные потери в меди обмоток P_M , Вт:

$$P_M = P_{M1} + P_{M2} + P_{M3},$$

$$P_M = 2,97 + 1,44 + 0,789 = 5,2.$$

Отношение β

$$\beta = \frac{P_M}{P_{ct}},$$

$$\beta = \frac{5,2}{3,97} = 1,31.$$

Отношение β находится в пределах 0,9...1,5 при частоте 400 Гц, следовательно, трансформатор спроектирован удовлетворительно.

Удельное сопротивление медного провода при температуре 90 °С ρ_{90} , Ом·м:

$$\rho_{90} = \rho_{20} [1 + \alpha_t (\theta_{об} - 20)],$$

где ρ_{20} – удельное сопротивление медного провода при температуре 20 °С, Ом·м; α_t – температурный коэффициент сопротивления меди; $\theta_{об}$ – температура обмотки, °С.

$$\rho_{90} = 1,75 \cdot 10^{-8} [1 + 0,004 \cdot (90 - 20)] = 2,24 \cdot 10^{-8}.$$

Активное сопротивление первичной обмотки при температуре 90 °С r_{1t} , Ом:

$$r_{1t} = \rho_{90} l_{cp,в1} \frac{W_1}{q_1},$$

$$r_{1t} = 2,24 \cdot 10^{-8} \cdot 0,168 \cdot \frac{226}{0,2734 \cdot 10^{-6}} = 3,11.$$

Активное сопротивление второй обмотки при температуре 90 °С
 r_{2t} , Ом:

$$r_{2t} = \rho_{90} l_{\text{ср.в2}} \frac{W_2}{q_2},$$

$$r_{2t} = 2,24 \cdot 10^{-8} \cdot 0,143 \cdot \frac{317}{0,1134 \cdot 10^{-6}} = 8,95.$$

Активное сопротивление третьей обмотки при температуре 90 °С
 r_{3t} , Ом:

$$r_{3t} = \rho_{90} l_{\text{ср.в3}} \frac{W_3}{q_3},$$

$$r_{3t} = 2,24 \cdot 10^{-8} \cdot 0,188 \cdot \frac{19}{0,7854 \cdot 10^{-6}} = 0,102.$$

Сопротивление второй обмотки, приведённое к первичной, r'_2 , Ом:

$$r'_2 = r_{2t} \left(\frac{W_1}{W_2} \right)^2,$$

$$r'_2 = 8,95 \cdot \left(\frac{226}{317} \right)^2 = 4,55.$$

Сопротивление третьей обмотки, приведённое к первичной, r'_3 , Ом:

$$r'_3 = r_{3t} \left(\frac{W_1}{W_3} \right)^2,$$

$$r'_3 = 0,102 \cdot \left(\frac{226}{19} \right)^2 = 14,4.$$

Ток второй обмотки, приведённый к первичной, I'_2 , А:

$$I'_2 = I_2 \frac{W_2}{W_1},$$

$$I'_2 = 0,4 \cdot \frac{317}{226} = 0,561.$$

Ток третьей обмотки, приведённый к первичной, I'_3 , А:

$$I'_3 = I_3 \frac{W_3}{W_1},$$

$$I'_3 = 2,78 \cdot \frac{19}{226} = 0,234.$$

Относительный ток второй обмотки I_2^* , о.е.:

$$I_2^* = \frac{I'_2}{I_1},$$

$$I_2^* = \frac{0,561}{0,932} = 0,602.$$

Относительный ток третьей обмотки I_3^* , о.е.:

$$I_3^* = \frac{I'_3}{I_1},$$

$$I_3^* = \frac{0,234}{0,932} = 0,251.$$

Средняя длина витков первой и второй обмоток l_{12} , м:

$$l_{12} = \frac{l_{\text{ср.в1}} + l_{\text{ср.в2}}}{2},$$

$$l_{12} = \frac{0,168 + 0,143}{2} = 0,156.$$

Средняя длина витков первой и третьей обмоток l_{13} , м:

$$l_{13} = \frac{l_{\text{ср.в1}} + l_{\text{ср.в3}}}{2},$$

$$l_{13} = \frac{0,168 + 0,188}{2} = 0,178.$$

Площадь канала рассеяния S_{p1} , м²:

$$S_{\text{p1}} = I_2^* l_{12} \left(I_2^* \frac{\delta_1}{3} + \frac{k_{\text{в}} k_{\text{мо21}} h_{\text{из.мо21}}}{2} \right) + I_3^* l_{13} \left(I_3^* \frac{\delta_1}{3} + \frac{k_{\text{в}} k_{\text{мо13}} h_{\text{из.мо13}}}{2} \right),$$

$$S_{\text{p1}} = 0,602 \cdot 0,156 \cdot \left(0,602 \cdot \frac{3,72 \cdot 10^{-3}}{3} + \frac{1,1 \cdot 1,27 \cdot 0,44 \cdot 10^{-3}}{2} \right) +$$

$$+ 0,251 \cdot 0,178 \cdot \left(0,251 \cdot \frac{3,72 \cdot 10^{-3}}{3} + \frac{1,1 \cdot 1,2 \cdot 0,33 \cdot 10^{-3}}{2} \right) = 1,23 \cdot 10^{-4}.$$

Площадь канала рассеяния S_{p2} , м²:

$$S_{p2} = \frac{k_B k_{\text{MO21}} h_{\text{из.МО21}}}{2} l_{12} + \frac{\delta_2}{3} l_{\text{ср.в2}},$$

$$S_{p2} = \frac{1,1 \cdot 1,27 \cdot 0,44 \cdot 10^{-3}}{2} \cdot 0,156 + \frac{2,6 \cdot 10^{-3}}{3} \cdot 0,143 = 1,72 \cdot 10^{-4}.$$

Площадь канала рассеяния S_{p3} , м²:

$$S_{p3} = \frac{\delta_3}{3} l_{\text{ср.в3}} + \frac{k_B k_{\text{MO13}} h_{\text{из.МО13}}}{2} l_{13},$$

$$S_{p3} = \frac{1,13 \cdot 10^{-3}}{3} \cdot 0,188 + \frac{1,1 \cdot 1,2 \cdot 0,33 \cdot 10^{-3}}{2} \cdot 0,178 = 1,1 \cdot 10^{-4}.$$

Высота катушки h_k , м:

$$h_k = h - 2h_{\text{из}},$$

$$h_k = 39 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 3 \cdot 10^{-3} = 33 \cdot 10^{-3}.$$

Индуктивное сопротивление рассеяния первичной обмотки x_1^* , о.е.:

$$x_1^* = \frac{7,9 W_1 I_1 f \cdot 10^{-6}}{E_B} \cdot \frac{S_{p1}}{h_k},$$

$$x_1^* = \frac{7,9 \cdot 226 \cdot 0,932 \cdot 400 \cdot 10^{-6}}{0,962} \cdot \frac{1,23 \cdot 10^{-4}}{33 \cdot 10^{-3}} = 2,58 \cdot 10^{-3}.$$

Индуктивное сопротивление рассеяния второй обмотки x_2^* , о.е.:

$$x_2^* = \frac{7,9 W_1 I_1 f \cdot 10^{-6}}{E_B} \cdot \frac{S_{p2}}{h_k},$$

$$x_2^* = \frac{7,9 \cdot 226 \cdot 0,932 \cdot 400 \cdot 10^{-6}}{0,962} \cdot \frac{1,72 \cdot 10^{-4}}{33 \cdot 10^{-3}} = 3,61 \cdot 10^{-3}.$$

Индуктивное сопротивление рассеяния третьей обмотки x_3^* , о.е.:

$$x_3^* = \frac{7,9 W_1 I_1 f \cdot 10^{-6}}{E_B} \cdot \frac{S_{p3}}{h_k},$$

$$x_3^* = \frac{7,9 \cdot 226 \cdot 0,932 \cdot 400 \cdot 10^{-6}}{0,962} \cdot \frac{1,1 \cdot 10^{-4}}{33 \cdot 10^{-3}} = 2,31 \cdot 10^{-3}.$$

Активная составляющая падения напряжения в первичной обмотке при номинальной нагрузке ΔU_{a1}^* , о.е.:

$$\Delta U_{a1}^* = \frac{r_{1t} I_1}{U_1},$$

$$\Delta U_{a1}^* = \frac{3,11 \cdot 0,932}{220} = 0,0132.$$

Активная составляющая падения напряжения во второй обмотке при номинальной нагрузке ΔU_{a2}^* , о.е.:

$$\Delta U_{a2}^* = \frac{r_{2t} I_1}{U_1},$$

$$\Delta U_{a2}^* = \frac{8,95 \cdot 0,932}{220} = 0,0379.$$

Активная составляющая падения напряжения во второй обмотке при номинальной нагрузке ΔU_{a3}^* , о.е.:

$$\Delta U_{a3}^* = \frac{r_{3t} I_1}{U_1},$$

$$\Delta U_{a3}^* = \frac{0,102 \cdot 0,932}{220} = 0,432 \cdot 10^{-3}.$$

Реактивные составляющие падений напряжений в обмотках при номинальной нагрузке, о.е.:

$$\Delta U_{p1}^* = x_1^*, \quad \Delta U_{p1}^* = 2,58 \cdot 10^{-3},$$

$$\Delta U_{p2}^* = x_2^*, \quad \Delta U_{p2}^* = 3,61 \cdot 10^{-3},$$

$$\Delta U_{p3}^* = x_3^*, \quad \Delta U_{p3}^* = 2,31 \cdot 10^{-3}.$$

Полное падение напряжения на второй обмотке при номинальной нагрузке трансформатора ΔU_{12}^* , о.е.:

$$\Delta U_{12}^* = \Delta U_{a1}^* \cos \phi_1 + \Delta U_{p1}^* \sin \phi_1 + \frac{I_2 W_2}{I_1 W_1} (\Delta U_{a2}^* \cos \phi_2 + \Delta U_{p2}^* \sin \phi_2),$$

$$\begin{aligned} \Delta U_{12}^* &= 0,0132 \cdot 0,636 + 2,58 \cdot 10^{-3} \cdot 0,772 + \\ &+ \frac{0,4 \cdot 317}{0,932 \cdot 226} \cdot (0,0379 \cdot 0,65 + 3,61 \cdot 10^{-3} \cdot 0,76) = 0,0269. \end{aligned}$$

Полное падение напряжения на третьей обмотке при номинальной нагрузке трансформатора ΔU_{13}^* , о.е.:

$$\Delta U_{13}^* = \Delta U_{a1}^* \cos \phi_1 + \Delta U_{p1}^* \sin \phi_1 + \frac{I_3 W_3}{I_1 W_1} (\Delta U_{a3}^* \cos \phi_3 + \Delta U_{p3}^* \sin \phi_3),$$

$$\Delta U_{13}^* = 0,0132 \cdot 0,636 + 2,58 \cdot 10^{-3} \cdot 0,772 +$$

$$+ \frac{2,78 \cdot 19}{0,932 \cdot 226} \cdot (0,432 \cdot 10^{-3} \cdot 0,9 + 2,31 \cdot 10^{-3} \cdot 0,436) = 0,0107.$$

Напряжение на второй обмотке при номинальной нагрузке $U_{2\text{расч}}$, В:

$$U_{2\text{расч}} = \frac{W_2}{W_1} U_1 (1 - \Delta U_{12}^*),$$

$$U_{2\text{расч}} = \frac{317}{226} \cdot 220 \cdot (1 - 0,0269) = 300,3.$$

Напряжение на третьей обмотке при номинальной нагрузке $U_{3\text{расч}}$, В:

$$U_{3\text{расч}} = \frac{W_3}{W_1} U_1 (1 - \Delta U_{13}^*),$$

$$U_{3\text{расч}} = \frac{19}{226} \cdot 220 \cdot (1 - 0,0107) = 18,3.$$

Относительная разность заданных и полученных значений напряжений на второй обмотке ε_2 , %:

$$\varepsilon_2 = \frac{|U_2 - U_{2\text{расч}}|}{U_2} \cdot 100,$$

$$\varepsilon_2 = \frac{|300 - 300,3|}{300} \cdot 100 = 0,1.$$

Относительная разность заданных и полученных значений напряжений на третьей обмотке ε_3 , %:

$$\varepsilon_3 = \frac{|U_3 - U_{3\text{расч}}|}{U_3} \cdot 100,$$

$$\varepsilon_3 = \frac{|18 - 18,3|}{18} \cdot 100 = 1,67.$$

Так как относительные погрешности ε_2 и ε_3 не превышают 2...8 %, то необходимости уточнения числа витков W_2 или W_3 нет.

Суммарную активную мощность вторичных обмоток трансформатора P , Вт, можно определить по формуле

$$P = U_{2\text{расч}} I_2 \cos \phi_2 + U_{3\text{расч}} I_3 \cos \phi_3,$$

$$P = 300,3 \cdot 0,4 \cdot 0,65 + 18,3 \cdot 2,78 \cdot 0,9 = 123,9.$$

Коэффициент полезного действия трансформатора при номинальной нагрузке η

$$\eta = \frac{P}{P + P_m + P_{ст}},$$

$$\eta = \frac{123,9}{123,9 + 5,2 + 3,97} = 0,931.$$

Открытая поверхность охлаждения сердечника $Q_{серд}$, м²:

$$Q_{серд} = 2(a + b)(a + 2c + h) + 4a \left(b + \frac{a}{2} \right),$$

$$Q_{серд} = 2 \cdot (22 \cdot 10^{-3} + 33 \cdot 10^{-3}) \cdot (22 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 14 \cdot 10^{-3} + 39 \cdot 10^{-3}) +$$

$$+ 4 \cdot 22 \cdot 10^{-3} \cdot \left(33 \cdot 10^{-3} + \frac{22 \cdot 10^{-3}}{2} \right) = 136,6 \cdot 10^{-4}.$$

Средний радиус изгиба катушки r_k , м:

$$r_k = \frac{1}{2} (\delta_1 + h_{из.мо21} k_{мо21} + \delta_2 + h_{из.мо13} k_{мо13} + \delta_3 + h_{из.н} k_{но}) k_b,$$

$$r_k = \frac{1}{2} (3,72 \cdot 10^{-3} + 0,44 \cdot 10^{-3} \cdot 1,27 + 2,6 \cdot 10^{-3} + 0,33 \cdot 10^{-3} \cdot 1,2 +$$

$$+ 1,13 \cdot 10^{-3} + 0,54 \cdot 10^{-3} \cdot 1,85) \cdot 1,1 = 5,17 \cdot 10^{-3}.$$

Средняя длина витка катушки $l_{в.ср}$, м:

$$l_{в.ср} = 2(a_k + b_k) + 2\pi r_k,$$

$$l_{в.ср} = 2 \cdot (27,9 \cdot 10^{-3} + 38,9 \cdot 10^{-3}) + 2\pi \cdot 5,17 \cdot 10^{-3} = 0,166.$$

Открытая поверхность обмоток трансформатора $Q_{обм}$, м²:

$$Q_{обм} = 2h(a + 4c),$$

$$Q_{обм} = 2 \cdot 39 \cdot 10^{-3} \cdot (22 \cdot 10^{-3} + 4 \cdot 14 \cdot 10^{-3}) = 60,8 \cdot 10^{-4}.$$

Превышение температуры наиболее нагретой части трансформатора над температурой окружающей среды $\Delta\theta_{тр}$, °С:

$$\Delta\theta_{тр} = \frac{P_m + P_{ст}}{k_T (Q_{обм} + Q_{серд})} + \Delta\theta,$$

где k_T – средний коэффициент теплоотдачи с охлаждающей поверхности трансформатора, Вт/(м²·°С); $\Delta\theta$ – перепад температуры от внутренних слоёв обмоток к наружным, °С.

$$\Delta\theta_{\text{тр}} = \frac{5,2 + 3,97}{13 \cdot (60,8 \cdot 10^{-4} + 136,6 \cdot 10^{-4})} + 15 = 50,7.$$

Температура наиболее нагретой части трансформатора $\theta_{\text{тр}}$, °С:

$$\theta_{\text{тр}} = \Delta\theta_{\text{тр}} + \theta_0,$$

$$\theta_{\text{тр}} = 50,7 + 30 = 80,7.$$

Так как температура $\theta_{\text{тр}}$ не превышает допустимую для изоляции класса нагревостойкости А, то трансформатор в тепловом отношении спроектирован верно.

Сводные данные расчёта трансформатора

Масса стали сердечника, кг	0,722
Удельный расход стали, кг/кВА	4,25
Масса меди обмоток, кг	0,163
Удельный расход меди, кг/кВА	0,959
Отношение массы стали к массе меди	4,43
Потери в стали сердечника, Вт	3,97
Потери в меди обмоток, Вт	5,2
Отношение потерь в меди к потерям в стали	1,31
КПД при номинальной нагрузке	0,931
Максимальное превышение температуры обмотки трансформатора над температурой окружающей среды, °С	50,7
Относительный ток холостого хода	0,206
Относительные изменения напряжения при номинальной нагрузке:	
на второй обмотке	0,0269
на третьей обмотке	0,0107

Задание на намотку трансформатора приведено в приложении 3.

5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К ЗАЩИТЕ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

- 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 и как его определить опытным путём?
- 10) Объясните выбор межслоевой и межобмоточной 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 что повлияет 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 трёхобмоточного трансформатора.
- 36) Что такое приведённые параметры вторичных обмоток?

37) Покажите на чертеже основные элементы конструкции трансформатора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Улучшение технико-экономических и эксплуатационных показателей современных трансформаторов малой мощности является важнейшей задачей при создании эффективных схем электропитания различного электротехнического оборудования и систем управления. Использование современных проводниковых, изоляционных и конструкционных материалов, применение новых дизайнерских решений, совершенствование методов расчёта и проектирования являются перспективными направлениями в дальнейшем развитии трансформаторов малой мощности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Брускин, Д. Э. Электрические машины и микромашины / Д. Э. Брускин, А. Е. Зорохович, В. С. Хвостов. – М. : Высш. шк., 1990. – 528 с.
2. Белополюский, И. И. Расчёт трансформаторов и дросселей малой мощности / И. И. Белополюский, Е. И. Каретникова, Л. Г. Пикалова. – М. : Альянс, 2013. – 400 с.
3. Ермолин, Н. П. Расчёт трансформаторов малой мощности / Н. П. Ермолин. – М. : Энергия, 1969. – 192 с.
4. Бальян, Р. Х. Трансформаторы для радиоэлектроники / Р. Х. Бальян. – М. : Советское радио, 1971. – 720 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

ОБМОТОЧНЫЕ ПРОВОДА

Диаметр голого провода, мм	Сечение голого провода, мм ²	Диаметр провода с изоляцией, мм		
		ПЭЛ	ПЭВ-1	ПБД
0,03	0,000706	0,045	0,045	-
0,04	0,00126	0,055	0,055	-
0,05	0,00196	0,065	0,070	-
0,06	0,00283	0,075	0,085	-
0,07	0,00385	0,085	0,95	-
0,08	0,00503	0,095	0,105	-
0,09	0,00636	0,105	0,115	-
0,10	0,00785	0,12	0,125	-
0,11	0,00950	0,13	0,135	-
0,12	0,01131	0,14	0,145	-
0,13	0,01327	0,15	0,155	-
0,14	0,01539	0,16	0,165	-
0,15	0,01767	0,17	0,18	-
0,16	0,02011	0,18	0,19	-
0,17	0,02270	0,19	0,20	-
0,18	0,02545	0,20	0,21	-
0,19	0,02835	0,21	0,22	-
0,20	0,03142	0,225	0,23	0,39
0,21	0,03464	0,235	0,24	0,40
0,23	0,04155	0,255	0,27	0,42
0,25	0,04909	0,275	0,29	0,44
0,27	0,05726	0,31	0,31	0,49
0,29	0,06605	0,33	0,33	0,51
0,31	0,07548	0,35	0,35	0,53
0,33	0,08553	0,37	0,37	0,55
0,35	0,09621	0,39	0,39	0,57
0,38	0,1134	0,42	0,42	0,60
0,41	0,1320	0,45	0,45	0,63
0,44	0,1521	0,49	0,48	0,66
0,47	0,1735	0,52	0,51	0,69
0,49	0,1886	0,54	0,53	0,71
0,51	0,2043	0,56	0,56	0,73
0,53	0,2206	0,58	0,58	0,75
0,55	0,2376	0,6	0,60	0,77
0,57	0,2552	0,62	0,62	0,79
0,59	0,2734	0,64	0,64	0,81
0,62	0,3019	0,67	0,67	0,84

Диаметр голого провода, мм	Сечение голого провода, мм ²	Диаметр провода с изоляцией, мм		
		ПЭЛ	ПЭВ-1	ПБД
0,64	0,3217	0,69	0,69	0,86
0,67	0,3526	0,72	0,72	0,89
0,69	0,3739	0,74	0,74	0,91
0,72	0,4072	0,78	0,77	0,94
0,74	0,4301	0,80	0,80	0,96
0,77	0,4657	0,83	0,83	0,99
0,80	0,5027	0,86	0,86	1,02
0,83	0,5411	0,89	0,89	1,05
0,86	0,5809	0,92	0,92	1,08
0,90	0,6362	0,96	0,96	1,12
0,93	0,6793	0,99	0,99	1,15
0,96	0,7238	1,02	1,02	1,18
1,00	0,7854	1,07	1,08	1,27
1,04	0,8495	1,12	1,12	1,31
1,08	0,9161	1,16	1,16	1,35
1,12	0,9852	1,20	1,20	1,39
1,16	1,0568	1,24	1,24	1,43
1,20	1,1310	1,28	1,28	1,47
1,25	1,2272	1,33	1,33	1,52
1,30	1,3270	1,38	1,38	1,57
1,35	1,4314	1,43	1,43	1,62
1,40	1,5394	1,48	1,48	1,67
1,45	1,6513	1,53	1,53	1,72
1,50	1,7672	1,58	1,58	1,77
1,56	1,9113	1,64	1,64	1,83
1,62	2,0612	1,71	1,70	1,89
1,68	2,217	1,77	1,76	1,95
1,74	2,378	1,83	1,82	2,01
1,81	2,573	1,90	1,90	2,08
1,88	2,776	1,97	1,97	2,15
1,95	2,987	2,04	2,04	2,22
2,02	3,205	2,12	2,11	2,29
2,10	3,464	2,20	2,20	2,37
2,26	4,012	2,36	2,36	2,53
2,44	4,676	2,54	2,54	2,71

Примечание. Государственные стандарты регламентируют марки и размеры обмоточных проводов. В таблицу включены сведения о проводах марок ПЭЛ, ПЭВ-1 и ПБД:
ПЭЛ – провод эмалированный лакостойкий;
ПЭВ-1 – провод, изолированный высокопрочной эмалью в один слой;
ПБД – провод, изолированный двумя слоями хлопчатобумажной пряжи.

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

СЕРДЕЧНИКИ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Тип магнитопровода	Размеры, мм				Справочные величины, см ²	
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>h</i>	<i>c</i>	Q_c	F_0
Броневые пластинчатые магнитопроводы						
Ш-10x10		10			1,00	
Ш-10x16	10	16	25	10	1,60	2,5
Ш-10x20		20			2,00	
Ш-12x12		12			1,44	
Ш-12x16	12	16	30	12	1,92	3,6
Ш-12x25		25			3,00	
Ш-16x16		16			2,56	
Ш-16x20	16	20	40	16	3,20	6,4
Ш-16x25		25			4,00	
Ш-16x32		32			5,12	
Ш-20x12	20	12	50	20	2,40	10,00
Ш-20x16		16			3,20	
Ш-20x20	20	20	50	20	4,00	10,00
Ш-20x32		32			6,40	
Ш-20x40		40			8,00	
Ш-25x25	25	25	62,5	25	6,25	15,625
Ш-25x32		32			8,00	
Ш-25x50		50			12,5	
Ш-32x20	32	20	80	32	6,4	25,6
Ш-32x25		25			8,00	
Ш-32x32		32			10,24	
Ш-32x40		40			12,80	
Ш-32x50		50			16,00	
Ш-40x25	40	25	100	40	10,00	40,00
Ш-40x40		40			16,00	
Ш-40x60		60			24,00	
Ш-40x80		80			48,00	
Сердечники с уширенным ярмом						
ШУ-10x10	10	10	18	6,5	1,00	1,17
ШУ-12x12	12	12	22	8,0	1,44	1,76
ШУ-14x14	14	14	25	9,0	1,96	2,25
ШУ-16x16	16	16	28	10,0	2,56	2,80
ШУ-19x19	19	19	33,5	12	3,61	4,02
ШУ-19x28		28			5,32	
ШУ-19x38		38			7,22	

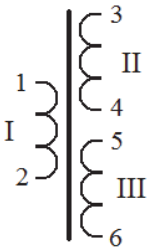
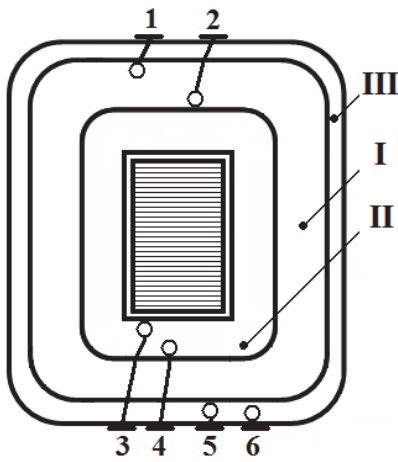
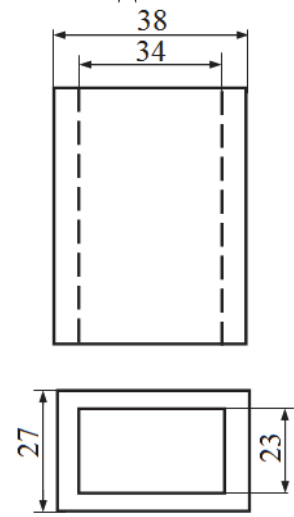
Тип магнитопровода	Размеры, мм				Справочные величины, см ²	
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>h</i>	<i>c</i>	<i>Q_c</i>	<i>F₀</i>
ШУ-22x22 ШУ-22x33	22	22 33	39	14	4,84 7,26	5,46
ШУ-26x26 ШУ-26x39 ШУ-26x52	26	26 39 52	47	17	6,76 10,14 13,52	7,99
ШУ-30x30 ШУ-30x45 ШУ-30x60	30	30 45 60	53	19	9,00 13,45 18,00	10,07
ШУ-35x35 ШУ-35x52 ШУ-35x70	35	35 52 70	61,5	22	12,25 18,20 24,50	13,53
Броневые ленточные магнитопроводы						
ШЛ-12x12,5 ШЛ-12x16 ШЛ-12x20 ШЛ-12x25	12	12,5 16 20 25	30	12	1,50 1,92 2,40 3,00	3,6
ШЛ-16x16 ШЛ-16x20 ШЛ-16x25 ШЛ-16x32	16	16 20 25 32	40	16	2,56 3,20 4,00 5,12	6,4
ШЛ-20x20 ШЛ-20x32 ШЛ-20x25 ШЛ-20x40	20	20 32 25 40	50	20	4,00 6,40 5,00 8,00	10
ШЛ-25x25 ШЛ-25x32 ШЛ-25x40 ШЛ-25x50	25	25 32 40 50	62,5	25	6,25 8,00 10,00 12,50	15,6
ШЛ-32x32 ШЛ-32x40 ШЛ-32x50 ШЛ-32x64	32	32 40 50 64	80	32	10,24 12,80 16,00 20,48	25,6
ШЛМ-12x10 ШЛМ-12x12,5 ШЛМ-12x16 ШЛМ-12x20 ШЛМ-12x25	12	10 12,5 16 20 25	23	8	1,2 1,5 1,92 2,4 3,0	1,84

Тип магнитопровода	Размеры, мм				Справочные величины, см ²	
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>h</i>	<i>c</i>	<i>Q_c</i>	<i>F₀</i>
ШЛМ-16x12,5 ШЛМ-16x16 ШЛМ-16x20 ШЛМ-16x25 ШЛМ-16x32	16	12,5	26	9	2,00	2,34
		16			2,56	
		20			3,20	
		25			4,00	
		32			5,12	
ШЛМ-20x16 ШЛМ-20x20 ШЛМ-20x25 ШЛМ-20x32 ШЛМ-20x40	20	16	36	12	3,2	4,32
		20			4,0	
		25			5,0	
		32			5,4	
		40			8,0	
ШЛМ-25x20 ШЛМ-25x25 ШЛМ-25x32 ШЛМ-25x40 ШЛМ-25x50	25	20	45	15	5,00	6,75
		25			6,25	
		32			8,00	
		40			10,00	
		50			12,50	
ШЛМ-32x25 ШЛМ-32x32 ШЛМ-32x40 ШЛМ-32x50	32	25	55	18	8,00	9,90
		32			10,24	
		40			12,80	
		50			16,00	
ШЛМ-40x32 ШЛМ-40x40 ШЛМ-40x50 ШЛМ-40x64	40	32	72	24	12,80	17,28
		40			16,00	
		50			20,00	
		64			25,60	
Стержневые ленточные магнитопроводы						
ПЛ 12,5x16-25 ПЛ 12,5x16-32 ПЛ 12,5x16-40 ПЛ 12,5x16-50	12,5	16	25	16	2,00	4,00
			32			5,12
			40			6,40
			50			8,00
ПЛ 12,5x25-32 ПЛ 12,5x25-40 ПЛ 12,5x25-50 ПЛ 12,5x25-60	12,5	25	32	20	3,125	6,40
			40			8,00
			50			10,00
			60			12,00
ПЛ 16x32-40 ПЛ 16x32-50 ПЛ 16x32-65 ПЛ 16x32-80	16	32	40	25	5,12	10,00
			50			12,50
			65			16,25
			80			20,00

Тип магнитопровода	Размеры, мм				Справочные величины, см ²		
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>h</i>	<i>c</i>	<i>Q_c</i>	<i>F₀</i>	
ПЛ 20x40-50	20	40	50	32	8,00	16,00	
ПЛ 20x40-60			60			19,20	
ПЛ 20x40-80			80			25,60	
ПЛ 20x40-100			100			32,00	
ПЛ 25x50-65	25	50	65	40	12,50	26,00	
ПЛ 25x50-80			80			40,00	
ПЛ 25x50-100			100			50,00	
ПЛ 25x50-120			120			60,00	
ПЛ 14x20	14	20	45	11,5	2,8	5,2	
ПЛ 14x25		25					3,5
ПЛ 14x32		32					4,5
ПЛ 14x36		36					5,0
ПЛ 16x20	16	20	60	16	3,2	9,6	
ПЛ 16x25		25					4,0
ПЛ 16x32		32					5,1
ПЛ 16x40		40					6,4
ПЛ 18x25	18	25	71	18	4,5	13,0	
ПЛ 18x32		32					5,8
ПЛ 18x40		40					7,2
ПЛ 18x45		45					8,1
ПЛ 21x36	21	36	85	25	7,6	21,0	
ПЛ 21x40		40					8,4
ПЛ 21x45		45					9,5
ПЛ 25x40	25	40	100	28	10,0	28	
ПЛ 25x45		45					11,3
ПЛ 25x50		50					12,5
ПЛ 28x40	28	40	120	32	11,2	38	
ПЛ 28x45		45					12,6
ПЛ 28x50		50					14,0

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

ЗАДАНИЕ НА НАМОТКУ ТРАНСФОРМАТОРА

<p>Схема</p> 	<p>Эскиз</p>  <p style="text-align: center;">Расположение выводов</p>	<p>Заказ №</p> <p>Количество 1 шт.</p> <p>Магнитопровод Типоразмер ШУ 22×33</p> <p>Пластина Толщина пластины 0,2 мм Марка стали 1521</p> <p>Количество пластин, шт.</p>		
		<p style="text-align: center;">Гильза для обмоток</p> 		
		<table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="border: none;">Материал: электро-технический картон</td> <td style="border: none;">Количество 1 шт.</td> </tr> </table>	Материал: электро-технический картон	Количество 1 шт.
Материал: электро-технический картон	Количество 1 шт.			

Обмоточные данные

Номер обмотки	Провод	Число			Высота намотки, мм	Масса меди, г	Отводы	Примечание
		ВИТКОВ	ВИТКОВ В слое	слоёв				
I	ПЭЛ 0,59/0,64	226	49	5	32,7	92,4	ПЭЛ 0,59/0,64	
II	ПЭЛ 0,38/0,42	317	75	5	33,1	45,8	ПЭЛ 0,38/0,42	
III	ПЭЛ 1,00/1,07	19	19	1	21,3	25,0	ПЭЛ 1,00/1,07	

Выводы на лепестки своим проводом согласно эскизу.

Изоляция:

– между слоями первичной обмотки – бумага ЭИП-50 0,08 мм;

- между слоями второй обмотки – бумага ЭИП-50 0,08 мм;
- между второй и первичной обмотками – кабельная бумага К-12, 4 слоя;
- между первичной и третьей обмотками – кабельная бумага К-12, 3 слоя;
- поверх катушки – кабельная бумага К-12, 2 слоя; батистовая лента 0,16 мм 1 слой с половинным перекрытием.

Пропитка: без пропитки.

<p>Схема принципиальная электрическая</p>		<p>Рабочая частота 400 Гц Условия эксплуатации в наземной аппаратуре Масса $G_M + G_{ст} = 0,885$ кг</p>					
Номер обмотки	Номера выводов	Режим холостого хода				Номинальный режим	
		Напряжение, В	Сопротивление обмотки ($t = +20$ °C), Ом	Испытательное напряжение, В		Напряжение, В	Ток, А
				на корпус	между обмотками		
I	1, 2	220	2,43	1350	1700	220	0,932
II	3, 4	305	6,99	1700	1700	300,3	0,4
III	5, 6	18,3	0,0797	200	1350	18,3	2,78

Проверяемый параметр	Единица измерения	Величина
Ток холостого хода	А	0,192
Потери в стали	Вт	3,97
Превышение температуры	°C	50,7

Учебное издание

Сериков Александр Владимирович

РАСЧЁТ ТРАНСФОРМАТОРОВ МАЛОЙ МОЩНОСТИ

Учебное пособие

Научный редактор – кандидат технических наук, доцент Р. В. Кузьмин

Редактор Т. Н. Карпова

Подписано в печать 23.09.2015.

Формат 60 × 84 1/16. Бумага 65 г/м². Ризограф EZ570E.

Усл. печ. л. 4,42. Уч.-изд. л. 4,24. Тираж 70 экз. Заказ 27334.

Редакционно-издательский отдел
Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего профессионального образования
«Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет»
681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27.

Полиграфическая лаборатория
Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего профессионального образования
«Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет»
681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27.