

Министерство образования и науки РФ

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

Кафедра конструирования узлов и деталей РЭА (КУДР)

Н.И.Кузбных

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТРАНСФОРМАТОРОВ
ПИТАНИЯ ДЛЯ РЭС**

*Методическое пособие по курсовому проектированию
по дисциплине “Перспективная элементная база РЭС”
для студентов специальности 210201
Проектирование и технология радиоэлектронных средств*

2011

СОДЕРЖАНИЕ

1 ВВЕДЕНИЕ.....	4
2 АНАЛИЗ ТЗ, ВЫБОР И ОБОСНОВАНИЕ КОНКУРЕНТНЫХ ВАРИАНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ТП.....	6
2.1 Задачи анализа ТЗ	6
2.2 Выбор и обоснование конкурентных типов трансформаторов.....	6
2.3 Выбор и обоснование конкурентных типов и рядов сердечников....	10
2.4 Выбор и обоснование ферромагнитного материала сердечника.....	16
2.5 Выбор и обоснование конструкции катушки, типа намотки и материала каркаса.....	20
2.6 Выбор и обоснование проводникового материала и марки обмоточных проводов.....	23
2.7 Выбор и обоснование электроизоляционных материалов.....	26
2.8 Выбор и обоснование способа и материалов защиты катушки и трансформатора.....	29
3 РАСЧЕТ ТЭП КОНКУРЕНТНЫХ ВАРИАНТОВ И ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИИ ТРАНСФОРМАТОРА	33
3.1 Постановка задачи.....	33
3.2 Расчет габаритных критериев конкурентных конструкций ТП.....	33
3.3 Выбор типоразмеров сердечников из конкурентных рядов.....	38
3.4 Определение ТЭП для конкурентных вариантов ТП.....	38
3.5 Анализ ТЭП конкурентных трансформаторов и выбор оптимальной конструкции	41
4 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ТРАНСФОРМАТОРА.....	42
4.1 Электрический расчет ТП по падению напряжения.....	42
4.2 Электрический расчет ТП по температуре перегрева при вынужденном тепловом режиме (ТВР).....	45
4.3 Электрический расчет ТП по температуре перегрева при естественном тепловом режиме (ТЕР).....	46
5 КОНСТРУКТИВНЫЙ РАСЧЕТ ТП.....	48
5.1 Постановка задачи.....	48
5.2 Конструктивный расчет броневых и стержневых ТММ.....	48
5.3 Конструктивный расчет тороидального трансформатора.....	55
5.4 Расчет толщины влагозащитного покрытия	62
6 УТОЧНЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПАРАМЕТРОВ И РАСЧЕТ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ.....	64
6.1 Уточнение электромагнитных параметров трансформатора	64
6.2 Расчет технико-экономических показателей трансформатора	66
ОСНОВНАЯ РЕКОМЕНДОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА.....	68
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Основные свойства пластмасс для изготовления каркасов, гильз и обойм	69
.....	

ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Обмоточные медные провода с эмалевой изоляцией	74
.....	
ПРИЛОЖЕНИЕ В. Расчетные коэффициенты.....	76
ПРИЛОЖЕНИЕ Г. Цены электротехнических сталей и обмоточных проводов	78
ПРИЛОЖЕНИЕ Д. Размеры и справочные величины для типовых рядов сердечников и для трансформаторов при типовых условиях	79
.....	
ПРИЛОЖЕНИЕ Е. Характеристики электротехнических холоднокатаных анизотропных сталей	104
.....	
УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ	105
ПРИНЯТЫЕ СОКРАЩЕНИЯ ТЕРМИНОВ.....	109

1 ВВЕДЕНИЕ

Трансформатором питания (ТП) называется статическое электромагнитное устройство переменного тока, предназначенное для преобразования напряжения первичного источника питания в ряд напряжений требуемой величины и служащее для питания различных РЭС и гальванической развязки питаемых устройств и первичного источника. Принцип функционирования и другие сведения о ТП достаточно подробно представлены в [1-3]. ТП находят широкое применение в РЭА.

Трансформаторы питания используются в источниках вторичного электропитания (ИВЭП), которые являются неотъемлемым функциональным блоком РЭС любого назначения и используются для питания различных потребителей электрической энергии: электронных, полупроводниковых и интегральных схем, устройств индикации и отображения информации и т.д. В РЭА используются преимущественно трансформаторы питания небольшой мощности (до $2...5 \text{ кВ}\cdot\text{А}$), поэтому в технической литературе их называют просто *трансформаторами малой мощности* (ТММ).

Промышленные предприятия страны выпускают широкий перечень нормализованных (типовых) ТП, однако они далеко не всегда могут оптимальным образом удовлетворить техническим требованиям разрабатываемой РЭС различного назначения. Необходимость проектирования ТП возникает в тех случаях, когда в техническом задании (ТЗ) на разработку РЭС накладываются жесткие ограничения по тем или иным техническим или технико-экономическим показателям (ТЭП). Учитывая, что типовые ТП имеют дискретные и ограниченные ряды как по количеству вторичных обмоток, так и по их напряжениям и токам, то они не могут полностью удовлетворить всей совокупности требований, предъявляемых к проектируемым РЭС.

Вопросы проектирования трансформаторов питания весьма подробно рассмотрены в книгах [2 и 4]. Однако методики проектирования ТП, изложенные в них, ориентированы на подготовленных специалистов. Кроме того, указанные книги в настоящее время являются бестселлерами и не всегда доступны широкому кругу студентов. Используемое до сих пор методическое пособие А.К.Майера [5], в котором представлена в сокращенном варианте методика проектирования ТП Р.Х.Бальяна из [4], изрядно устарело. Поэтому назрела необходимость в разработке более совершенного методического пособия, ориентированного на современные условия и требования.

В данном методическом пособии в основу положена также методика проектирования Р.Х.Бальяна, так как она позволяет уже на начальном этапе проектирования учитывать ограничения как по падению напряжения, так и по перегреву обмоток ТП. При выборе конструктивных решений и в конструктивном расчете использованы также рекомендации из работ [2 и 3]. Справочные данные взяты из работ [2, 4] и справочников [6-9].

Конструктивный расчет тороидальных трансформаторов разработан автором и ориентирован на использование вычислительной техники.

Основной целью проектирования ненормализованных ТП является выбор оптимальной конструкции сердечника и катушки, материалов сердечника, обмоток и изоляционных материалов, типа защиты ТП от внешних воздействий и других конструктивных решений, который наилучшим образом обеспечил бы оптимальный режим работы трансформатора. В качестве критериев оптимизации чаще всего задается минимизация массы, габаритного объема или стоимости ТП, а ограничения накладываются на падение напряжения в трансформаторе и на температуру перегрева в обмотках. Возможны и другие варианты.

В техническом задании (ТЗ) на проектирование обычно задаются следующие исходные данные ТП:

- схема электрическая;
- частота f и напряжение U_1 питающей сети;
- напряжения и токи вторичных обмоток U_{2i} и I_{2i} ;
- максимально допустимый перегрев обмоток τ_m ;
- допустимое падение напряжения в обмотках δU ;
- Вид нагрузки трансформатора.

В ТЗ также задаются условия эксплуатации: диапазон изменения температуры окружающей среды, минимальное и максимальное атмосферное давление, влажность, наличие агрессивной среды, механические воздействия; срок службы; ограничения по технико-экономическим показателям. А также указывается назначение ТП, программа выпуска и срок службы.

Проектирование оптимальных ТП можно условно разделить на *следующие этапы*:

- 1) **анализ технического задания**, предварительное обоснование и выбор конкурентных вариантов конструкций ТП и конструктивных решений;
- 2) **предварительный расчет** технико-экономических показателей конкурентных вариантов и выбор оптимальной конструкции ТП;
- 3) **электрический расчет** оптимального ТП;
- 4) **конструктивный расчет** оптимального ТП;
- 5) **уточнение электромагнитных параметров** и определение фактических технико-экономических показателей ТП;
- 6) **разработка конструкции** и конструкторской документации ТП;
- 7) **критический анализ** результатов проектирования и предложения по совершенствованию разработанной конструкции.

Рассмотрим содержание каждого из этих этапов.

2 АНАЛИЗ ТЗ, ВЫБОР И ОБОСНОВАНИЕ КОНКУРЕНТНЫХ ВАРИАНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ТП

2.1 Задачи анализа ТЗ

При анализе технического задания необходимо выбрать и обосновать:

1) *конкурентные типы конструкций ТП* (броневой, стержневой, тороидальный, обращенный тор, кабельного типа, типа «шпуля» и т.д.);

2) *конкурентные типы сердечников* (ленточный, пластинчатый, прессованный из магнитодиэлектриков или ферритов и т.д.);

3) *конкурентные ряды сердечников* (ШЛ, ПЛ, ОЛ, ШЛМ, ШЛР, ПЛМ, ПЛР и т.д.).

4) *конкурентные ферромагнитные материалы* (марки электротехнических сталей, сплавов, магнитодиэлектриков, ферритов и т.д.);

5) *конструкции катушки* (каркасная, бескаркасная, секционированная);

6) *конкурентные проводниковые материалы* (медь, алюминий, круглого или прямоугольного профиля, ленточный) *и марки обмоточных проводов* (ПЭВ-1, ПЭВ-2, ПЭВТЛ-1, ПЭВТЛ-2, ПЭТВ, ПЭТ-155, ПСД и т.д.);

7) *изоляционные материалы* – корпусная, межслоевая, межобмоточная, наружная изоляция (электроизоляционные бумаги, стеклоткань, лакоткань, пленочные материалы и т.д.);

8) *способ защиты катушки и трансформатора* от влаги и агрессивной среды (пропитка катушки, обволакивание, заливка, защитно-декоративное покрытие ТП и т.д.) *и защитные материалы* (пропиточные – лаки или компаунды; защитно-декоративные – лаки, эмали; покровные компаунды; заливочные компаунды и т.д.). Марки и стандарты или ТУ.

Раскроем более подробно содержание каждого из приведенных выше пунктов анализа ТЗ.

2.2 Выбор и обоснование конкурентных типов трансформаторов

Конструкция ТП определяется функциональным назначением, основными электрическими параметрами, требованиями к форме, габаритам, массе, стоимости, надежности и т.д. Основными элементами конструкции ТП являются магнитопровод (сердечник) и катушка, в которой размещены обмотки. По типу используемого сердечника ТП подразделяются на однофазные броневые (БТ), стержневые (СТ), тороидальные (ТТ), кабельного типа, чашечные и т.д., а также трехфазные (ЗТ). Наиболее широкое применение в ИВЭП РЭС получили БТ, СТ и ТТ, реализованные на ленточных сердечниках, конструкции которых представлены на рисунке 2.1.

В ТП броневого типа (БТ) обмотки располагается на центральном стержне сердечника. Это упрощает конструкцию дросселя (одна катушка), позволяет получить более полное использование окна обмотки и создает

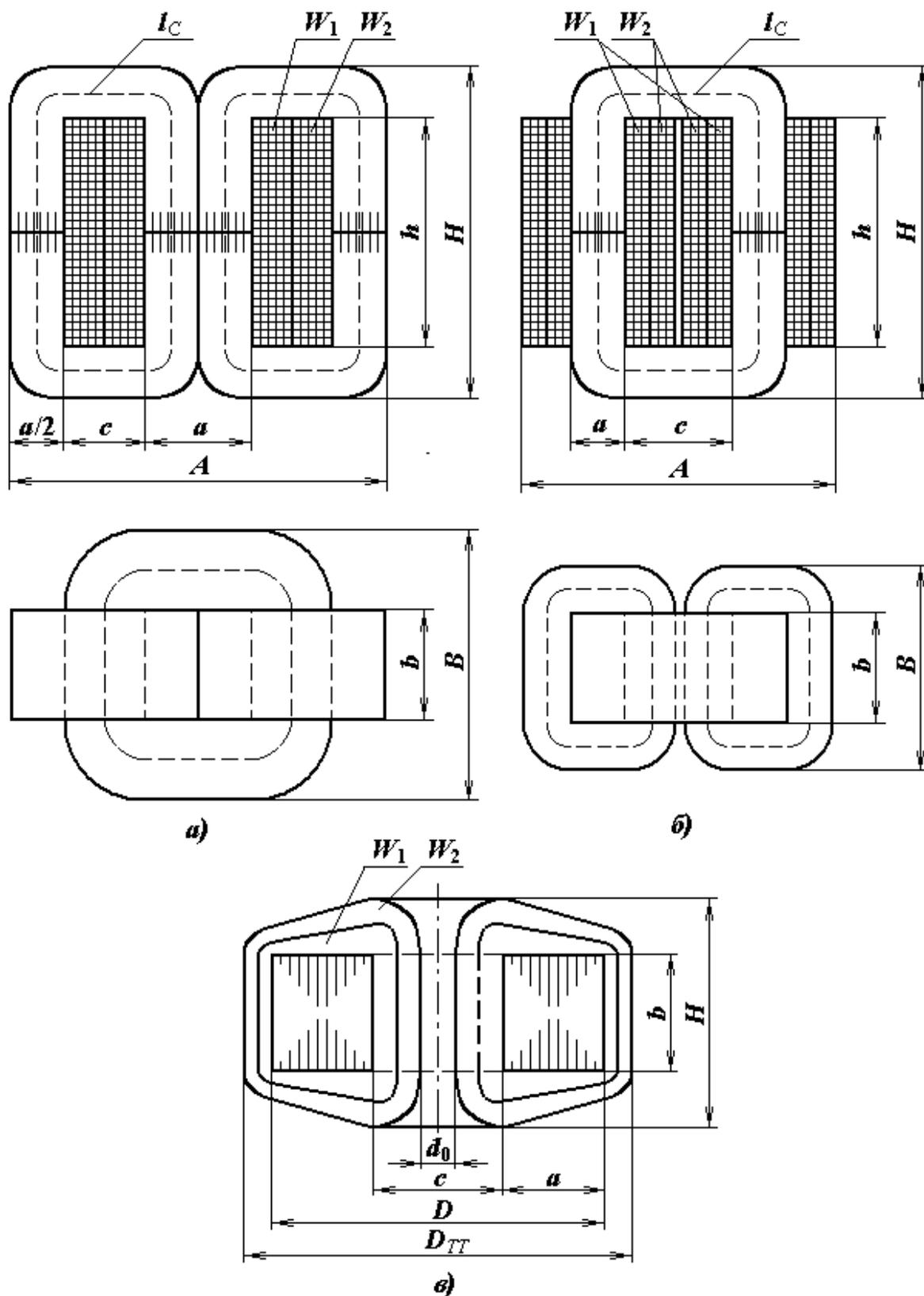


Рисунок 2.1 – Конструкции броневые (а), стержневые (б) и тороидальные (в) трансформаторов питания

частичную механическую защиту обмоток. Благодаря этим достоинствам броневые трансформаторы получили широкое применение. Одним из

основных недостатков БТ является наличие относительно больших полей рассеяния и, как следствие, дополнительные проблемы с обеспечением электромагнитной совместимости ТП с другими радиокомпонентами электронной аппаратуры.

В ТП стержневого типа (СТ) обмотка располагается на двух стержнях. Это несколько усложняет конструкцию, но уменьшает толщину намотки и снижает расход обмоточного провода. При этом снижаются активные потери в обмотках (уменьшается активное сопротивление) и увеличивается поверхность охлаждения катушек, что способствует снижению температуры перегрева в обмотках. Кроме того, стержневые ТП при симметричном распределении обмоток по катушкам имеют существенно меньшие, чем у броневых ТП, внешние поля рассеяния. Это обусловлено взаимной компенсацией внешних магнитных полей катушками.

В тороидальных трансформаторах (ТТ) используются кольцевые неразрезные сердечники, а обмотки распределяются равномерно по периметру сердечника, что позволяет наиболее полно использовать свойства магнитного материала, иметь очень слабое внешнее магнитное поле и существенно уменьшить ток холостого хода. Тороидальные ТП имеют преимущества перед броневыми и стержневыми в области повышенных и высоких частот питающего напряжения (от 400 Гц и выше). Причем, чем выше частота, тем существеннее преимущество ТТ, а в области высоких частот (свыше 10 кГц) их преимущество подавляющее. Однако, тороидальные ТП отличаются наиболее сложной технологией изготовления. В частности, весьма затруднена намотка обмоток, требующая специального оборудования. Но при повышении частоты, при прочих равных условиях, обратно пропорционально уменьшается число витков обмоток, а, следовательно, облегчается намотка обмоток. Поэтому ТТ нашли преимущественное применение в спецтехнике при повышенной частоте питающего напряжения, особенно в тех случаях, когда требуется плоская конструкция. А в аппаратуре, питающейся от промышленных источников (50 Гц), предпочтение отдается БТ и СТ.

При выборе конкурентных типов конструкций ТП следует учитывать, прежде всего, конкретные ограничения по ТЭП, величину габаритной мощности и частоту питающей сети.

Исследования, проведенные в [4, глава 11], для типовых условий показали, что при малых мощностях ($P_r \leq (25-40) \text{ В}\cdot\text{А}$) **наименьшие массогабаритные показатели**, при прочих равных условиях, имеют броневые и тороидальные ТП, а в области больших мощностей ($P_r \geq (150-250) \text{ В}\cdot\text{А}$) предпочтение отдается стержневым конструкциям. Следует обратить внимание на то, что исследования проводились для типовых условий, то есть условия эксплуатации нормальные, падение напряжения $U = 10 \%$ или перегрев обмоток $\tau_m = 50 \text{ К}$, частота питающей сети 50 или 400 Гц. Но, как показал опыт, указанные значения граничных мощностей наиболее близки

лишь применительно к ТП промышленной частоты (50 Гц), а при увеличении частоты питающего напряжения эти границы существенно сдвигаются в область более высоких мощностей. В широком диапазоне средних мощностей, учитывая дискретность типовых рядов сердечников, оптимальной по массогабаритным показателям может оказаться любая конструкция ТП.

Если ТП должен иметь *наименьшую стоимость*, то на передний план выдвигается стоимость основных материалов и технологичность конструкции ТП. Учитывая, что обмоточные провода, особенно медные, существенно дороже материалов сердечника, то для ТП низкой и повышенной частоты (до нескольких килогерц), в которых используются сердечники из электротехнических сталей, предпочтение следует отдавать СТ. Вторыми по этому показателю идут БТ. С точки зрения технологичности изготовления БТ предпочтительнее СТ. Таким образом, при оптимизации по стоимости БТ и СТ можно считать равнопредпочтительными. Самыми нетехнологичными являются тороидальные трансформаторы, что оказывается определяющим и исключает их из ряда предпочтительных конструкций.

Наиболее оптимальными *по габаритному объему* являются броневые конструкции, вторыми в этом ряду стоят СТ, а наибольший удельный объем, при прочих равных условиях, имеют тороидальные ТП.

На основании анализа результатов исследований Р.Х.Бальяна [4] и собственного опыта составлены ряды предпочтительных конструкций однофазных ТП в зависимости от частоты питающего напряжения, габаритной мощности и оптимизируемого технико-экономического показателя, которые представлены в таблице 2.1. При этом необходимо подчеркнуть, что наиболее предпочтительными в этих рядах являются первые конструкции ТП.

Приведенное выше разделение ТП на предпочтительные конструкции по различным признакам весьма условное и помогает лишь ограничить число конкурентных конструкций. Из проведенного выше анализа по выбору конкурентных конструкций ТП можно сформулировать следующие обобщенные рекомендации:

- для ТП промышленной частоты при оптимизации как по стоимости, так и по массогабаритным показателям нет смысла рассматривать тороидальные конструкции;

- для ТП повышенной частоты (до 1 кГц) при оптимизации по массогабаритным показателям, при малых мощностях можно ограничиться броневыми и тороидальными, при больших мощностях – стержневыми и тороидальными конструкциями, а в области средних мощностей следует рассматривать все типы конструкций – БТ, ТТ, и СТ;

- при проектировании ТП повышенной частоты (свыше 1 кГц) следует отдать предпочтение тороидальным и стержневым конструкциям, а при высоких частотах (свыше 10 кГц) – только тороидальным.

Следует также иметь в виду, что стержневые ТП с одной катушкой использовать не рекомендуется, так как по массогабаритным и техническим показателям они хуже всех перечисленных выше конструкций.

Более подробные сведения о конструкциях унифицированных ТП приведены в работах [2, раздел 2] и [3, раздел 1], а вопросы выбора оптимальных конструкций ТП подробно рассмотрены в работе [4, раздел 11].

2.3 Выбор и обоснование конкурентных типов и рядов сердечников

Ферромагнитные сердечники (магнитопроводы) в ТП предназначены для создания замкнутой магнитной цепи для магнитного потока, с помощью которого передается энергия из первичной обмотки во вторичные. Одним из основных требований к ним является обеспечение наименьшего магнитного сопротивления, в связи с чем соответствующие требования предъявляются к конструкциям сердечников и к свойствам магнитных материалов. Магнитопроводы должны обеспечивать наикратчайший путь магнитному потоку, а магнитные материалы должны обладать высокой магнитной проницаемостью и малыми удельными активными потерями в сильных переменных магнитных полях.

Отечественной промышленностью выпускается достаточно большое разнообразие конструкций сердечников и широкая номенклатура ферромагнитных материалов. По конструктивному признаку сердечники разделяются на броневые, стержневые, тороидальные, кольцевые, чашечные, типа “шпуля”, кабельного типа и т.д. [2-4]. Для изготовления сердечников используются электротехнические стали, сплавы железа с никелем (пермаллой) или с кобальтом (пермендюры), магнитодиэлектрики и ферриты.

Сердечники из электротехнических сталей и сплавов конструктивно делятся на *ленточные* и *пластинчатые* (шихтованные).

Пластинчатые сердечники набираются из пластин соответствующей формы, которые штампуются из листового материала, обезжириваются и покрываются тонким изолирующим слоем лака или окисла. На рисунке 2.2 представлены броневая и стержневая конструкции пластинчатых сердечников типа Ш и П (ГОСТ 20249 – 80), собранных внахлест из пластин типа Ш-I и П-I, соответственно [9, с. 162]. К достоинствам пластинчатых сердечников можно отнести то, что они могут быть изготовлены из любых, даже очень хрупких материалов. Однако пластины должны обладать достаточной механической прочностью (жесткостью), необходимой при сборке сердечника, что не позволяет использовать слишком тонкие листы. Существенными недостатками шихтованных сердечников являются большой отход материала в процессе штамповки пластин и трудоемкость сборки трансформаторов.

Пластинчатые сердечники изготавливаются преимущественно из листовых горячекатаных сталей марок 1411-1413, 1511-1514 ГОСТ 21427.3-75 толщиной 0,35 и 0,5 мм и используются в ТММ только промышленной

частоты (50 Гц). Однако в последнее время ТММ с пластинчатыми сердечниками практически полностью вытеснили трансформаторы на ленточных сердечниках из холоднокатаных электротехнических сталей, а пластинчатые сердечники из горячекатаных сталей нашли преимущественное применение в силовых трансформаторах промышленной частоты мощностью от единиц киловольт-ампер и выше.

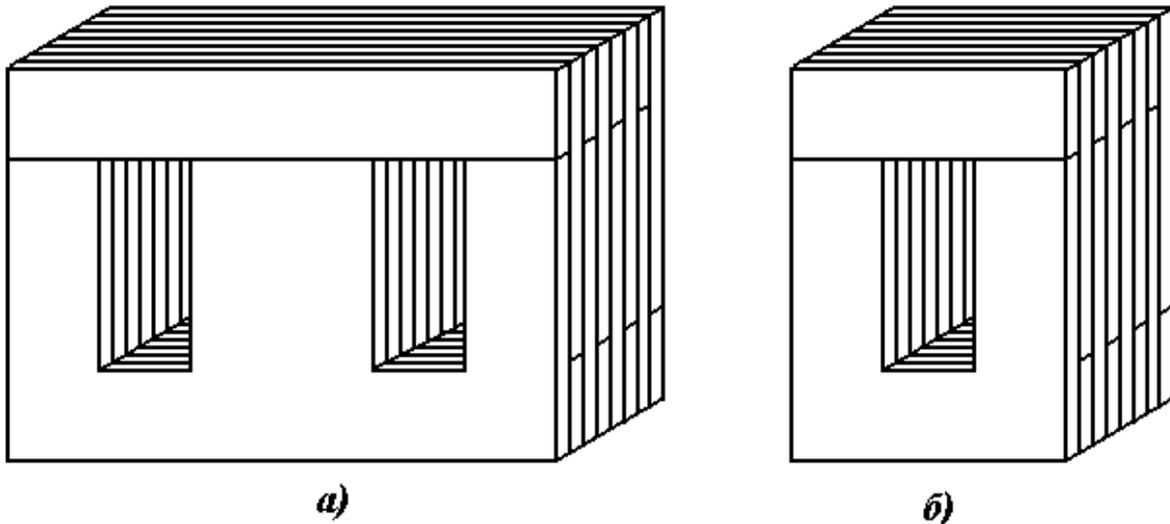


Рисунок 2.2 – Конструкции броневого (а) и стержневого (б) пластинчатых сердечников

ТММ на ленточных сердечниках по сравнению с пластинчатыми имеют существенно меньшие массогабаритные показатели и значительно меньшие поля рассеяния. Это обусловлено тем, что для изготовления шихтованных сердечников используются преимущественно изотропные горячекатаные стали, у которых допустимая рабочая индукция B_s (при напряженности 2500 А/м) существенно ниже, чем у холоднокатаных текстурованных сталей. Поэтому использование ленточных сердечников из холоднокатаных текстурованных сталей позволяет существенно снизить массогабаритные показатели трансформаторов. Более того, даже при ограничениях по стоимости ТП с ленточными сердечниками во многих случаях оказываются дешевле шихтованных. Это объясняется тем, что более высокая стоимость холоднокатаных текстурованных сталей по сравнению с горячекатаными с лихвой компенсируется снижением массы сердечника и обмоток, а также более высокой технологичностью изготовления сердечника и сборки трансформатора.

Ленточные сердечники изготавливаются путем навивки на оправку тонкой ленты, витки которой прочно склеиваются между собой. Конструкции броневого, стержневого и тороидального ленточных сердечников представлены на рисунке 2.3. К достоинствам ленточных сердечников следует отнести: полное использование свойств текстурованных магнитных

материалов, простоту изготовления, позволяющую полную автоматизацию производства, отсутствие отходов и возможность изготавливать сердечники из очень тонких ленточных материалов. Для упрощения технологии сборки трансформаторов броневые и стержневые сердечники после навивки разрезаются, а торцы обеих половинок попарно шлифуются для уменьшения немагнитного зазора.

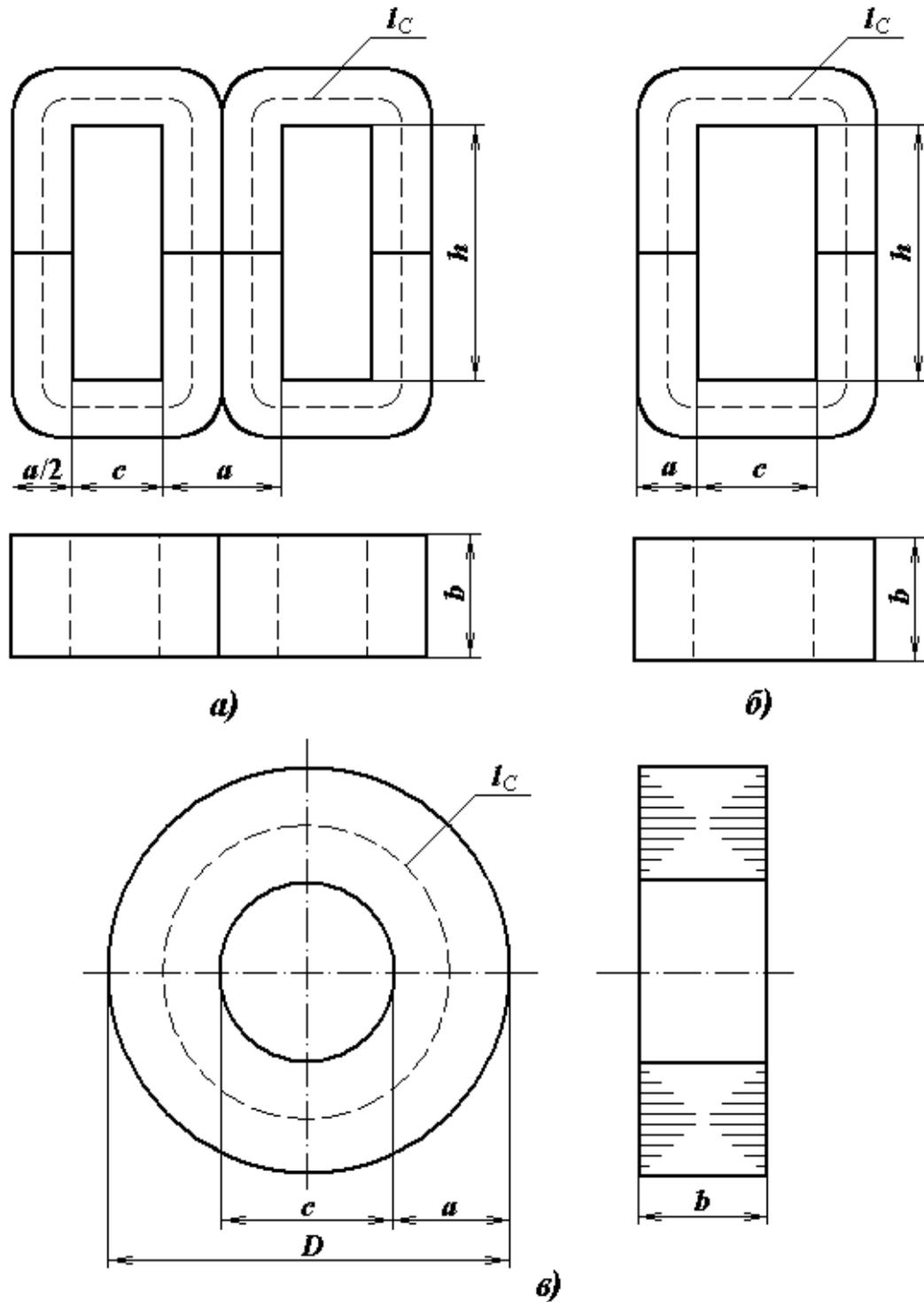


Рисунок 2.3 – Конструкции броневого (а), стержневого (б) и тороидального (в) ленточных сердечников

Специально для ТММ разработано и выпускается промышленностью страны достаточно большое количество унифицированных рядов (типов) ленточных сердечников, изготовленных из электротехнических сталей, типы и размеры которых установлены ГОСТ 22050-76. Между собою ряды сердечников разделяются по назначению, а их геометрические размеры оптимизированы по различным технико-экономическим показателям. В однофазных ТММ наиболее широкое применение получили следующие *ряды сердечников*.

ШЛ – броневые ленточные сердечники. Рекомендованы для низковольтных ТММ, оптимальных по массе, мощностью от 0,04 до 950 В·А на частоте 50 Гц и от 3 В·А до 2,7 кВ·А на частоте 400 Гц.

ПЛ – стержневые ленточные сердечники. Рекомендованы для низковольтных ТММ, оптимальных по массе, мощностью от 0,06 до 2,5 кВ·А на частоте 50 Гц и от 4 В·А до 7 кВ·А на частоте 400 Гц.

ОЛ – тороидальные ленточные сердечники, оптимальные по массе. Могут быть использованы для реализации ТММ на частоте 50 Гц (мощностью от 5 мВ·А до 0,7 кВ·А) и на частоте 400 Гц (мощностью от 0,3 В·А до 2,2 кВ·А). Однако следует иметь ввиду, что использование тороидальных сердечников предпочтительнее в ТММ повышенной частоты, где наиболее полно проявляются их преимущества перед броневыми и стержневыми конструкциями.

ШЛМ – броневые ленточные сердечники с уменьшенным отношением площади окна обмотки к площади сечения сердечника Q_o/Q_c . Применяются в низковольтных трансформаторах наименьшей массы и стоимости на частоте 50 Гц при мощностях порядка от 40 мВ·А до 110 В·А.

ПЛМ – стержневые ленточные сердечники с уменьшенным отношением площади окна обмотки к площади сечения сердечника Q_o/Q_c – продолжение ряда ШЛМ. Применяются в низковольтных трансформаторах наименьшей массы и стоимости на частоте 50 Гц при мощностях порядка от 50 до 500 В·А.

ШЛР – броневые ленточные сердечники с геометрическими размерами, обеспечивающими наименьшую стоимость трансформаторов (с уменьшенной шириной окна обмотки c), рассчитанных на допустимое падение напряжения в обмотках. Рекомендованы для маломощных ТММ промышленной частоты (на мощности ориентировочно от 0,5 до 60 В·А).

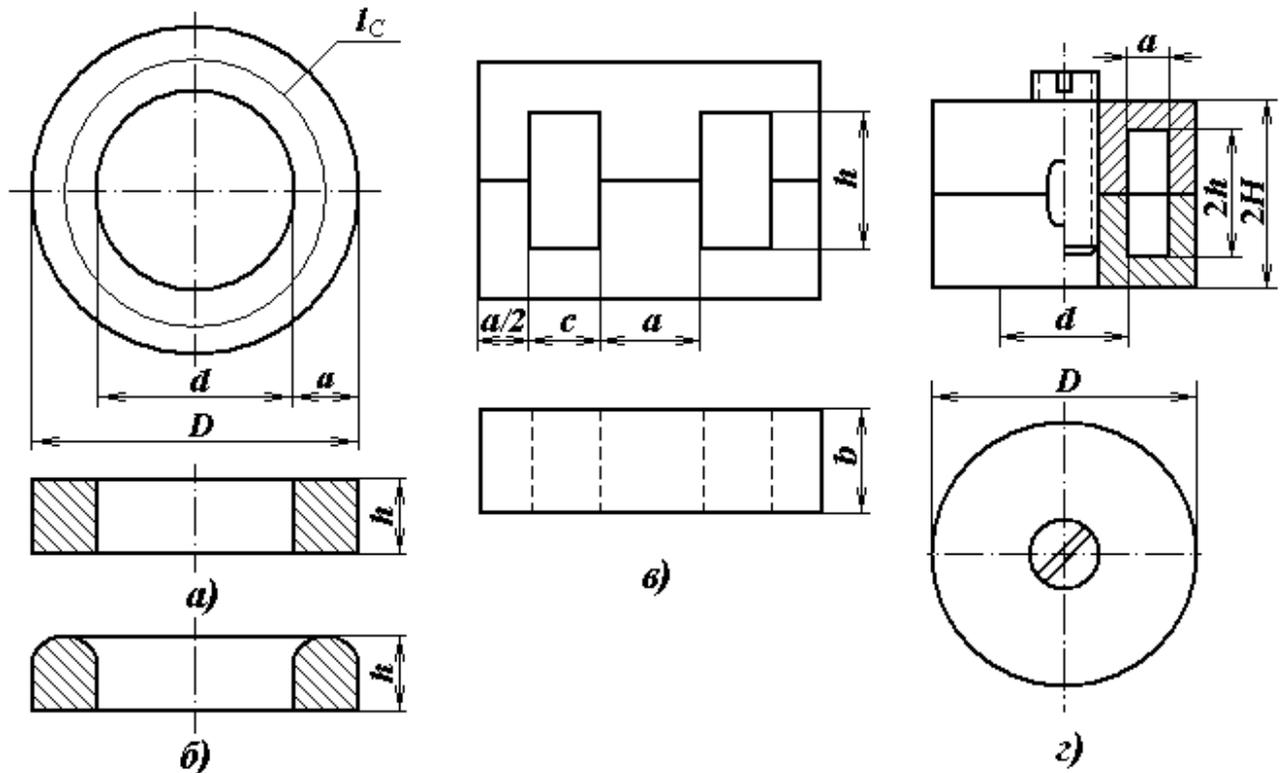
ПЛР – стержневые ленточные сердечники с геометрическими размерами, обеспечивающими наименьшую стоимость трансформаторов (с уменьшенной шириной окна обмотки c), рассчитанных на допустимый перегрев обмоток. Рекомендованы для ТММ промышленной частоты мощностью порядка от 1 до 500 В·А.

ШЛО – броневые ленточные сердечники с увеличенным окном обмотки. Рекомендуются для применения в низковольтных трансформаторах,

оптимальных по массе, объему и стоимости, на частотах от 1000 до 5000 Гц и в высоковольтных трансформаторах на частоте от 50 до 5000 Гц.

ШЛП – броневые ленточные сердечники с увеличенным отношением ширины ленты к толщине навивки b/a . Рекомендуются для применения в низковольтных трансформаторах, оптимальных по объему на частотах от 400 до 1000 Гц.

В области высоких частот (десятки и сотни кГц), в частности, в источниках вторичного электропитания с преобразованием частоты, наиболее широкое применение нашли тороидальные трансформаторы с кольцевыми магнитопроводами из никелевых сплавов, магнитомягких ферритов и магнитодиэлектриков. Основные конструктивные характеристики ленточных кольцевых магнитопроводов из никелевых сплавов определены ГОСТ 24011–80. Обозначаются они так же, как и тороидальные сердечники из электротехнических сталей. Основные конструктивные характеристики кольцевых сердечников из марганцево-цинковых ферритов нетермостабильных марок (рисунок 2.4, а) регламентированы ГОСТ 14208 – 77, а из прессованного альсифера (рисунок 2.4, б) – по ГОСТ 8763 – 77. Условное обозначение типоразмеров кольцевых сердечника состоит из буквы К (кольцевой) и цифр, обозначающих размеры внешнего и внутреннего диаметров и высоты магнитопровода, например К32×16×12.



a – кольцевой из феррита; *б* – кольцевой из магнитодиэлектрика; *в* – Ш-образный из феррита; *г* – броневого из феррита или магнитодиэлектрика

Рисунок 2.4 – Конструкции прессованных сердечников

Наряду с кольцевыми сердечниками в высокочастотных ТММ возможно использование разъемных Ш-образных сердечников из ферритов (ГОСТ 18614 – 79) и броневых чашечных сердечников из ферритов (ГОСТ 19197 – 73) и карбонильного магнетодиэлектрика (ГОСТ 10983 – 75) (см. рисунок 2.4, в, з).

Выбор конкурентных типов и рядов сердечников определяется, прежде всего, частотой питающего напряжения, ограничениями по технико-экономическим показателям, габаритной мощностью и назначением ТП.

Для облегчения выбора конкурентных типов и рядов сердечников можно воспользоваться таблицей 2.1, составленной на основании анализа результатов исследований Р.Х.Бальяна [4, с.484, подраздел 14.2] и собственного опыта. В правой колонке таблицы в порядке предпочтительности приведены типовые ряды сердечников, позволяющие выбрать из них наиболее конкурентные 2-4 ряда.

Таблица 2.1 – Рекомендуемые ряды предпочтительных типов конструкций ТММ и типовых сердечников

Частота, Гц	Габаритная мощность, Вт	Оптимизир уемый ТЭП	Рекоменду емые типы ТММ	Рекомендуемые ряды сердечников
50	Малые ТММ, $P_r \leq 25$	Масса	БТ, СТ	ШЛМ, ШЛ, ШЛР, ПЛ, ПЛР
		Габариты	БТ, СТ	ШЛМ, ШЛ, ШЛР, ПЛ, ПЛР
		Стоимость	БТ, СТ	ШЛМ, ШЛР, ШЛ, ПЛР, ПЛ
	Средние ТММ, $P_r = 25-150$	Масса	СТ, БТ	ПЛМ, ШЛМ, ПЛ, ШЛ, ПЛР
		Габариты	СТ, БТ	ПЛМ, ШЛМ, ПЛ, ШЛ, ПЛР
		Стоимость	СТ, БТ	ПЛР, ШЛР, ПЛМ, ШЛМ, ШЛ
	Большие ТММ, $P_r > 150$	Масса	СТ, ТТ, БТ	ПЛМ, ПЛ, ПЛР, ОЛ, ШЛ, ШЛМ
		Габариты	СТ, ТТ, БТ	ПЛМ, ПЛ, ПЛР, ОЛ, ШЛМ, ШЛ
		Стоимость	СТ, БТ, ТТ	ПЛР, ПЛМ, ПЛ, ШЛМ, ШЛ
400	Малые ТММ, $P_r \leq 40$	Масса	ТТ, СТ, БТ	ОЛ, ПЛ, ШЛ
		Габариты	ТТ, БТ, СТ	ОЛ, ШЛ, ПЛ
		Стоимость	БТ, СТ, ТТ	ШЛ, ПЛ, ОЛ
	Средние ТММ, $P_r = 40-250$	Масса	СТ, ТТ, БТ	ПЛ, ОЛ, ШЛ
		Габариты	СТ, БТ, ТТ	ПЛ, ШЛ, ОЛ
		Стоимость	БТ, СТ, ТТ	ШЛ, ПЛ, ОЛ
	Большие ТММ, $P_r > 250$	Масса	СТ, БТ, ТТ	ПЛ, ШЛ, ОЛ
		Габариты		
		Стоимость		

Для ТП промышленной частоты ($f = 50$ Гц) при оптимизации по массе и габаритам в области малых мощностей ($P_r < 25$ Вт) лучшие показатели имеют броневые ленточные сердечники (ЛС). Несколько худшие

массогабаритные показатели у стержневых сердечников. Причем, чем больше мощность ТП, тем меньше преимущество броневых ЛС перед стержневыми. В области средних и больших мощностей стержневые ЛС становится предпочтительнее броневых. ТТ на ленточных сердечниках ОЛ для промышленной сети (50 Гц, 220 В) имеют большое количество витков первичной обмотки и существенно проигрывают БТ и СТ в технологичности и габаритном объеме, хотя в работе [4, с.438] в области малых и средних мощностей предпочтение отдается ТТ. Очевидно, их следует рассматривать в качестве конкурентных лишь в том случае, если требование минимальной массы является определяющим.

При оптимизации по стоимости для ТП промышленной частоты в области малых мощностей безусловное предпочтение отдается броневым ЛС. Вторыми в ряду стоят стержневые ЛС. В области средних мощностей оптимальными по стоимости могут быть как броневые, так и стержневые конструкции, а в области больших мощностей преимущество имеют только стержневые конструкции. ТТ на ленточных сердечниках в данном случае выпадают из списка конкурентных как самые нетехнологичные конструкции.

При частоте 400 Гц предпочтение отдается рядам ленточных сердечников ШЛ, ПЛ, ОЛ, разработанных для ТММ наименьшей массы. В зависимости от габаритной мощности и минимизируемого ТЭП меняются лишь их приоритеты (см. таблицу 2.1).

В области повышенных частот (от 1 кГц и более) предпочтение отдается ТТ на тороидальных ленточных сердечниках, изготовленных из холоднокатаных текстурованных электротехнических сталей, железоникелевых и железо-кобальтовых сплавов или на кольцевых прессованных сердечниках из магнитомягких ферритов и магнитодиэлектриков (см. рисунок 2.4, а,б). При этом конкуренцию ленточным сердечникам ряда ОЛ могут составить ЛС ряда ШЛО, но последние не нашли широкого применения.

Более подробные сведения о сердечниках можно найти в [2-4, 9, 13].

2.4 Выбор и обоснование ферромагнитного материала сердечника

При выборе типа и марки материала сердечника необходимо учитывать частоту питающего напряжения, назначение ТП и ограничения по технико-экономическим показателям. Основными требованиями, предъявляемыми к ферромагнитным материалам для сердечников ТП, являются: высокая индукция насыщения, низкие удельные потери, высокая магнитная проницаемость, недефицитность и относительно низкая стоимость.

В области низких и средних частот (от 50 Гц до нескольких кГц) наиболее полно этим требованиям соответствуют **электротехнические стали** – это технически чистое железо, легированное кремнием.

Классификация и маркировка электротехнических сталей, изготавливаемых в виде рулонов, листов и ленты, устанавливается ГОСТ 21427.0 – 75. В обозначении марок сталей установлена следующая кодировка:

• **1-я цифра** – класс по структурному состоянию и вид прокатки: (**1** – горячекатаная изотропная, **2** – холоднокатаная изотропная, **3** – холоднокатаная анизотропная с ребристой текстурой, **5** – холоднокатаная изотропная с плоской кубической текстурой);

• **2-я цифра** – содержание кремния (**0** – с содержанием кремния до 0,4 % – нелегированная, **1** – 0,4...0,8 %; **2** – 0,8...1,8 %; **3** – 1,8...2,8 %; **4** – 2,8...3,8 %; **5** – 3,8...4,8 %).;

• **3-я цифра** – группа по основной нормируемой характеристике – удельным потерям (**0** – при магнитной индукции $B = 1,7$ Тл и частоте $f = 50$ Гц; **1** – при $B = 1,5$ Тл и $f = 50$ Гц; **2** – при $B = 1$ Тл и $f = 400$ Гц; **4** – при $B = 0,5$ Тл и $f = 3000$ Гц);

• **4-я цифра** – порядковый номер типа стали.

Три первые цифры марки стали вместе обозначают *тип стали*, например, 141, 151, 341, 342, и т.д.

Отечественной промышленностью выпускается достаточно большое количество типов сталей [7-9]. Для изготовления магнитопроводов для ТММ *промышленной частоты* (50 Гц) рекомендуется использовать стали типов 141, 151, 341, то есть *горячекатаные изотропные стали* марок 1411-1413, 1511-1514 ГОСТ 21427.3-75 и *холоднокатаные анизотропные (текстурованные) стали* марок 3411-3415 ГОСТ 21427.4-78 с толщиной листа/ленты 0,35 мм. Основные технические характеристики этих сталей приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Рекомендуемые марки электротехнических сталей для ТММ промышленной частоты 50 Гц

Марка материала в	Вид и толщина материала, мм	Удельные потери при индукции 1 Тл и частоте 50 Гц, $p'_{1/50}$, Вт/кг	Макс. рабочая индукция, B_s , Тл, при напряженности 2500 А/м
1411	Лист 0,35	1,6	1,46
1412		1,4	1,46
1413		1,35	1,48
1511	Лист 0,35	1,35	1,46
1512		1,2	1,45
1513		1,05	1,44
1514		0,9	1,44
3411	Лента 0,35	0,8	1,75
3412		0,7	1,85
3413		0,6	1,85
3414		0,5	1,88
3415		0,46	1,90

В настоящее время в ТММ наиболее широко используются холоднокатаные анизотропные (текстурованные) стали, которые имеют в направлении прокатки более высокую допустимую магнитную индукцию, что позволяет *уменьшать габариты и массу сердечников*, а, следовательно, и трансформатора в целом. В свою очередь, с увеличением содержания кремния улучшаются магнитные свойства стали – повышается магнитная проницаемость, уменьшаются удельные потери. Сравнительный анализ магнитных свойств горячекатаных сталей типа 141 и 151 и холоднокатаных сталей типа 341 показывает, что последние имеют существенно бóльшую индукцию насыщения и гораздо меньшие удельные потери. Более того, даже при ограничениях по *стоимости* ТММ с ленточными сердечниками в большинстве случаев оказываются дешевле шихтованных, так как более дорогая стоимость холоднокатаных сталей окупается с лихвой уменьшением массы сердечника и катушки и повышением технологичности сборки трансформаторов.

Для ТММ повышенной частоты 400 Гц и выше наиболее рационально использовать холоднокатаные текстурованные стали марок 3421-3425 ГОСТ 21427.4-78 с толщиной ленты 0,15 мм, которые обладают высокой допустимой рабочей индукцией, малыми удельными потерями и невысокой стоимостью. Основные магнитные свойства этих сталей приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Рекомендуемые марки магнитных материалов для ТММ повышенной частоты

Частота, <i>Гц</i>	Марка материала <i>В</i>	Толщина ленты, <i>мм</i>	Удельные потери, <i>Вт/кг</i>		Макс. рабочая индук- ция, <i>B_s, Тл</i> , при напряженности 2500 <i>А/м</i>
			<i>p' 1/400</i>	<i>p' 1,5/400</i>	
400	3421	0,15	10,0	23	1,70
	3422		9,0	20	1,75
	3423		8,0	19	1,82
	3424		8,0	18	
	3425		7,5	17	
1000... 5000	3421	0,08; 0,05	10	22	1,70
	3422		8,5	19	1,75
	3423		7,5	17	1,82
	3424		7,5	16	
	3425		7,0	15	
	49К2ФА	0,10	11	25	2,20
		0,05	7,5	17	2,10
50Н	0,10	<i>p' 1/1000 = 19</i>		1,50	

		0,05	$p'_{1/1000} = 15$	
--	--	------	--------------------	--

В области повышенных частот (1...5 кГц) электротехническим сталям могут составить конкуренцию железо-никелевые и железо-кобальтовые сплавы (пермаллой и пермендюры). В таблице 2.3 приведены характеристики железо-кобальтового сплава марки 49К2ФА ГОСТ 10160-75 и железо-никелевого сплава 50Н ГОСТ 10160-75, электромагнитные свойства которых наиболее полно отвечают приведенным выше требованиям к ферромагнитным материалам ТММ. Однако они слишком дороги (на 1...2 порядка дороже электротехнических сталей) и дефицитны. К тому же, свойства пермаллоев очень чувствительны к механическим воздействиям. Поэтому в трансформаторах питания сплавы используются только в спецаппаратуре при очень жестких ограничениях по массогабаритным показателям, когда электротехнические стали не удовлетворяют требованиям ТЗ.

Марка стали и толщина магнитного материала (ленты) выбираются в зависимости частоты питающего напряжения. Чем больше порядковый номер типа стали, тем больше индукция насыщения и меньше удельные потери и чем меньше толщина ленты, тем меньше удельные потери. Однако, необходимо учитывать то, что цена сталей увеличивается с увеличением порядкового номера типа стали и существенно увеличивается с уменьшением толщины ленты. Например, в 1970-ые годы сталь 3411- 0,35 мм стоила около 0,6 руб/кг, а сталь 3414 - 0,35 мм – около 0,8 руб/кг; сталь 3421 толщиной 0,15 мм стоила около 2 руб/кг, а та же сталь толщиной 0,08 мм – около 3 руб/кг [4, 8].

Высокочастотные ТП ($f > 5$ кГц) реализуются, как правило, на кольцевых пресованных сердечниках (рисунок 2.4) из ферритов и магнитодиэлектриков. Значительно реже используются Ш-образные, П-образные или броневые сердечники.

Ферриты относятся к полупроводникам и имеют высокое удельное сопротивление – в 50 и более раз выше, чем у электротехнических сталей, что позволяет использовать их в сильных высокочастотных полях (до сотен кГц). Для ТММ используются преимущественно сердечники из никель-цинковых и марганцово-цинковых ферритов общего применения марок: 400НН, 600НН, 1000НН, 2000НН ГОСТ 14208-77 и 1000НМ, 1500НМ, 2000НМ, 3000НМ ГОСТ 16541-76. Они имеют достаточно высокую магнитную проницаемость ($\mu_H \approx 400-3000$), недорогие и недефицитные, но у них очень низкая допустимая индукция ($B_S = 0,25...0,38$ Тл при $H = 800$ А/м) [7, 13]. Никель-цинковые ферриты по сравнению с марганцово-цинковыми имеют лучшие свойства – у них на порядок меньше тангенс угла потерь, выше удельное объемное сопротивление, слабая чувствительность к механическим воздействиям. Применение термостабильных марганцово-цинковых ферритов

марок 4000НМС, 3000НМС, 2500НМС1, 2500НМС2 ГОСТ 17141-76 позволяет существенно (до 10...15 %) уменьшить массогабаритные показатели ТММ по сравнению с ферритами общего применения за счет повышения рабочей индукции B_s до 0,4...0,5 Тл и повысить температурный диапазон до 135 °С [13, с.27]. Существенным недостатком ферритов являются снижение индукции насыщения B_s при повышении температуры и частоты. Из ферритов изготавливают кольцевые сердечники прямоугольного сечения (типа К) (см. рисунок 2.4, а) с размерами $D = 4...65$ мм, $d = 2,5...40$ мм, $h = 1,2...12$ мм.

Из **магнитодиэлектриков** предпочтение следует отдавать Мопермаллоям (прессованный порошкообразный пермаллой – прессперм) марок: П-60, П-100, П-120, П-160 и П-250, для которых характерным является достаточно высокая допустимая рабочая индукция ($B_{max} = 0,52...0,75$ Тл при $H = 8000$ А/м), но у них магнитная проницаемость примерно на порядок ниже, чем у ферритов. К тому же и частотный диапазон ограничен ($f_{max} \approx 30...300$ кГц). Возможно также использование кольцевых и броневого сердечников из альсифера марок ТЧ-60, ТЧ-90 ГОСТ 8763-77 ($B_{max} = 0,42...0,50$ Тл при $H = 8000$ А/м). На основе магнитодиэлектриков выпускаются кольцевые сердечники прямоугольного сечения (типа К) и полукруглого сечения (типа КП) (см. рисунок 2.4, а,б) с размерами $D = 10...75$ мм, $d = 6...46$ мм, $h = 3...16,8$ мм.

Более подробные сведения о свойствах магнитных материалов и рекомендации по их применению можно найти в справочниках [6-8 и 13].

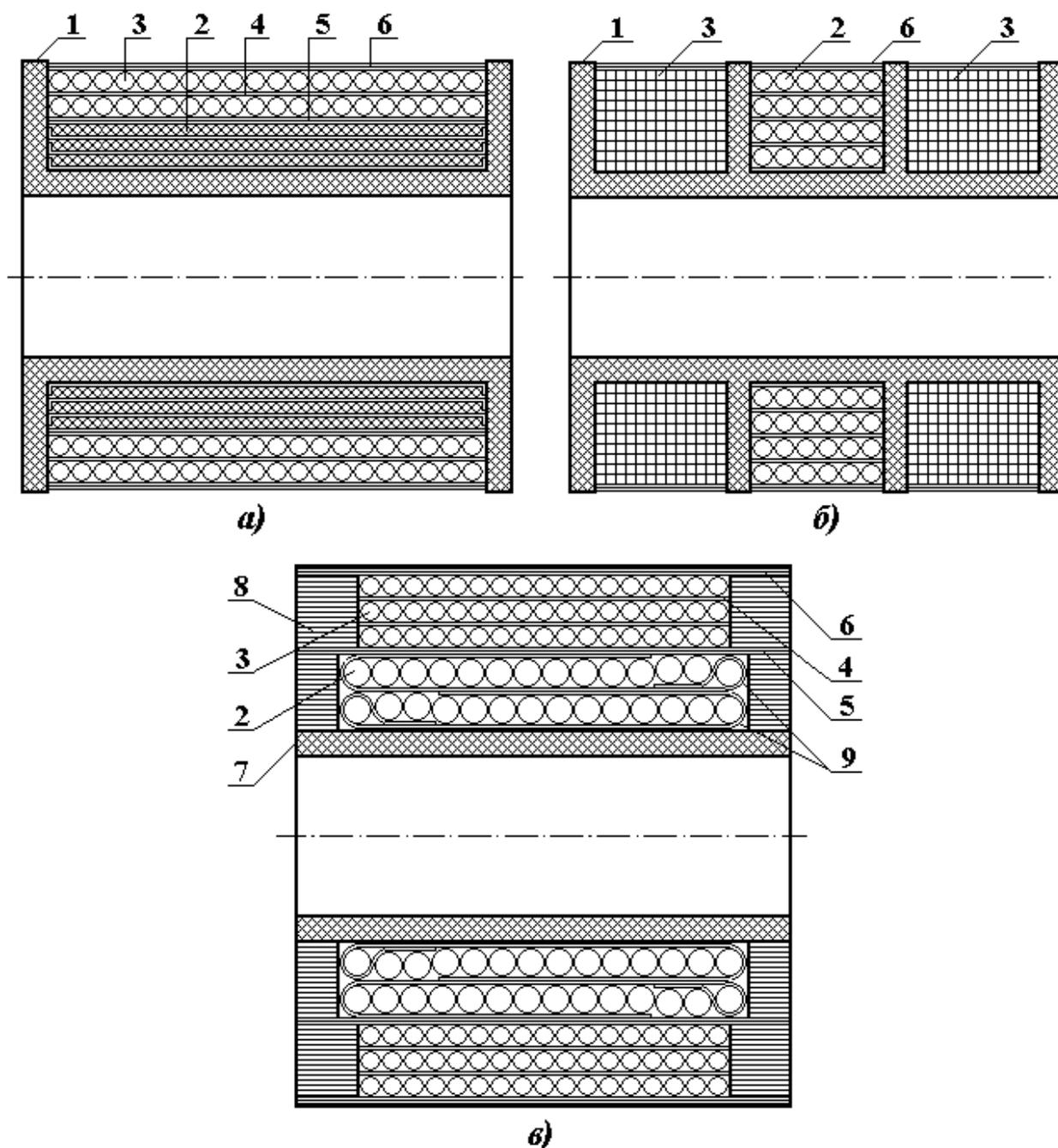
2.5 Выбор и обоснование конструкции катушки, типа намотки и материала каркаса

Катушки трансформаторов представляют собой совокупность обмоток с выводами и системой изоляции, размещенных на каркасе, гильзе или непосредственно на сердечнике. По конструкции катушки разделяют на *цилиндрические* и *тороидальные*. Цилиндрические катушки применяются в броневого и стержневых конструкциях трансформаторов (см. рисунок 2.1, а и б). В свою очередь, цилиндрические катушки могут быть *каркасные* – обмотки мотаются на каркас со щечками, *бескаркасные* – обмотки мотаются на гильзу и *секционированные* – обмотки разделяются на несколько секций, изолированных друг от друга (рисунок 2.5).

Намотка обмоток на каркас (гильзу) может быть выполнена либо *рядовым способом*, *виток к витку*, либо *внавал* – витки укладываются в произвольном порядке. Рядовая намотка позволяет получить большой коэффициент заполнения окна обмоткой. В низковольтных броневого и стержневых ТП преимущественное применение получила рядовая намотка виток витку на каркас или на гильзу (рисунок 2.5).

Бескаркасная намотка (намотка обмоток на гильзу) (см. рисунок 2.5, в) весьма трудоемкая и нетехнологичная, так как необходимо закреплять крайние витки каждого слоя обмоток (см. позицию 9) и выполнять изоляционный буртик по торцам катушки (см. позицию 8), что практически исключает автоматизацию намотки и значительно увеличивает время изготовления катушки. К тому же снижается механическая прочность катушки, так как возможно выпадение крайних витков. Достоинство бескаркасной катушки – существенно облегчается процесс пропитки обмоток. Бескаркасную намотку рекомендуется применять при проектировании высоковольтных ТП. Она позволяет проще решать вопросы изоляции обмоток между собою и с сердечником.

Каркасная катушка (см. рисунок 2.5, а) имеет лучшее качество и более надежная, а также более технологична и позволяет получить больший коэффициент заполнения окна обмоткой по сравнению с бескаркасной. Следовательно, применение каркасных катушек позволяет минимизировать массу, габариты и стоимость ТП.



1 – каркас; 2 – первичная обмотка; 3 – вторичная обмотка; 4 – межслоевая изоляция; 5 – межобмоточная изоляция; 6 – наружная изоляция; 7 – гильза; 8 – изоляционный буртик; 9 – закрепление крайних витков

Рисунок 2.5 – Конструкции каркасной (а), секционированной (б) и бескаркасной (в) катушек

В последнее время (особенно за рубежом) широко применяются **секционированные катушки** (рисунок 2.5, б). Они более оптимальны для автоматизированного производства компонентов и обеспечивают снижение выхода катушек из строя из-за продавливания изоляции проводов первичной обмотки при намотке вторичной проводом большего диаметра [9].

Секционирование обмоток рекомендуется применять также при проектировании высоковольтных ТП с целью уменьшения напряжения между слоями, что позволяет существенно проще решать вопросы изоляции обмоток. На рисунке 2.5, б первичная обмотка 2 расположена на центральной секции, а вторичная (высоковольтная) разделена на две секции 3.

Еще одной разновидностью конструкций катушек является *галетная*. В них обмотки выполняются в виде плоских катушек – галет, каждая из которых представляет собой законченный конструктивный элемент с выводами и собственной изоляцией. Галетные катушки представляют собой разновидность секционированной катушки, каждая секция которой выполняется автономно. При сборке трансформатора катушка собирается из галет путем нанизывания их на kern сердечника. Затем выводы галет соединяются между собою, образуя обмотки с необходимым числом витков. Очевидно, что такая конструкция трансформатора наиболее технологичная, но весьма далека от оптимальной по массогабаритным показателям. Она может быть рекомендована для бытовой или другой техники, при отсутствии ограничений по массе и габаритному объему.

В *тороидальных ТП* обмотки мотаются непосредственно на сердечник (см. рисунок 2.1, в), заключенный в обойму, либо изолированный волокнистой или пленочной изоляцией. При этом, с целью уменьшения полей рассеяния магнитного потока, рекомендуется распределять обмотки равномерно по всему периметру сердечника, даже если число витков в обмотке очень мало.

Дополнительные сведения о катушках можно найти в [2-4 и 9].

Материалы каркасов должны выбираться в соответствии с заданными условиями эксплуатации. Они должны соответствовать требованиям ТЗ: по нагревостойкости и морозостойкости, по влагостойкости и устойчивости к агрессивной среде, по механическим воздействиям и электрической прочности. Кроме того, они должны быть технологичными в изготовлении, и, по возможности, недефицитными и недорогими. Наиболее полно этим требованиям соответствуют ***терморезактивные пластмассы (реактопласты)*** и некоторые ***термопласты***. В настоящее время каркасы, гильзы и обоймы изготавливают преимущественно из трудно воспламеняющейся пластмассы методом горячего прессования или горячего литья под давлением.

При ***горячем прессовании*** используются пресс-материалы в виде порошков, гранул, крошки, волоконитов или другого вида исходный материалов из ***терморезактивных пластмасс***. Реактопласты представляют собой смеси терморезактивных смол (связывающих материалов), различных наполнителей, отвердителей, смазывающих веществ и других специальных добавок. При нагревании реактопласты сначала переходят в вязкотекучее состояние, что используется для формования изделий. Затем в результате необратимых химических процессов (полимеризации терморезактивных смол)

реактопласты переходят в неплавкое и нерастворимое состояние. После прессования изделие подвергается температурной обработке, как правило, длительной и сложной. Поэтому технология изготовления изделий из реактопластов методом горячего прессования является весьма трудоемкий, дорогостоящий и, зачастую, неэкологичный. Однако, использование высокопрочных материалов позволяет повысить механическую прочность, теплостойкость, тропикостойкость ТП и другие важные свойства каркасов, а также уменьшить толщину корпусной изоляции и, тем самым, несколько увеличить коэффициент заполнения окна обмоткой и снизить массогабаритные показатели трансформатора. Поэтому реактопласты нашли применение в основном в спецаппаратуре, когда массогабаритные показатели и надежность выдвигаются на первый план.

При *горячем литье под давлением* используются гранулы из *термопластичных* пластмасс или пресс-порошок из *терморективных* литьевых пластмасс. Литье под давлением из термопластов – процесс технологичный, легко поддается автоматизации и экологически достаточно чистый. Однако, отсутствие высокотемпературных, механически прочных, недорогих и недефицитных термопластичных материалов существенно сужает их область применения, которая ограничивается относительно легкими условиями эксплуатации при крупносерийном и массовом производстве. При более жестких условиях эксплуатации, когда нет ограничений по стоимости, для изготовления каркасов предпочтительнее использовать *литьевые реактопласты*. В отличие от других реактопластов литьевые, как правило, в процессе изготовления не требуют длительной термообработки, что существенно упрощает технологию.

В приложении А приведены основные свойства пластмасс, рекомендуемых для изготовления каркасов, гильз и обойм. Более подробно свойства, области применения и технология переработки рекомендованных и других марок пластмасс представлены в справочнике [6].

2.6 Выбор и обоснование проводникового материала и марки обмоточных проводов

Обмоточные провода изготавливаются из *меди* или из *алюминия*. Медные провода, по сравнению с алюминиевыми, обладают меньшим удельным сопротивлением ($\rho_{Cu} = 1,75 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$; $\rho_{Al} = 2,6 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$), существенно большей механической прочностью и высокой технологичностью в электромонтаже. Но удельная плотность меди в три раза больше, чем у алюминия ($\gamma_{Cu} = 8,9 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$; $\gamma_{Al} = 2,7 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$). К тому же медь более дорогая и дефицитная.

Но, несмотря на указанные выше недостатки, в ТММ преимущественное применение получили медные обмоточные провода. В трансформаторах, предназначенных для спецтехники, при оптимизации по массогабаритным

показателям использование медных проводов имеет очевидное преимущество. Использование же алюминиевых обмоточных проводов ограничено, главным образом из-за их нетехнологичности и низкой механической прочности, бытовой РЭА при минимизации по стоимости.

Однако, в трансформаторах малой мощности даже при оптимизации по стоимости предпочтительными оказываются медные провода. Во-первых, алюминиевые провода тонкого сечения очень непрочные, что приводит при намотке катушек к нарушению витковой изоляции и частым обрывам провода и, как следствие, к большому проценту брака при изготовлении катушек. Во-вторых, из-за того, что удельное сопротивление алюминия в 1,6 раза больше, чем у меди, приходится выбирать алюминиевые провода большего сечения. Следовательно, при прочих равных условиях, необходимо выбирать сердечник с большей площадью окна обмотки, то есть больший типоразмер. В-третьих, из-за малой механической прочности алюминия, при намотке нельзя устанавливать большое натяжение провода. Это приводит к значительному уменьшению коэффициента заполнения окна обмоткой и, соответственно, к увеличению типоразмера сердечника.

Таким образом, при использовании алюминиевых проводов, приходится выбирать сердечники большего типоразмера, а, следовательно, увеличивать их массу и стоимость. Если учесть еще и меньшую технологичность изготовления катушек с алюминиевыми проводами, что также увеличивает их стоимость, то преимущество ТММ с медными обмоточными проводами оказываются в большинстве случаев дешевле трансформаторов с алюминиевыми проводами. Поэтому применение алюминиевых проводов в ТММ должно быть в каждом конкретном случае обосновано числовыми расчетами.

Для обмоток ТММ с небольшими токами рекомендуется использовать медный провод круглого сечения, а при больших токах (более 10 А) предпочтение следует отдавать проводам прямоугольного сечения, которые имеют больший коэффициент заполнения окна обмоткой.

Чтобы исключить межвитковые замыкания, обмоточные провода изолируются. В трансформаторах преимущественное применение получили обмоточные провода с тонкой эмалевой изоляцией, что позволяет существенно увеличить коэффициент заполнения окна обмоткой и, соответственно, уменьшить типоразмер сердечника. Так как витковая изоляция наиболее чувствительна к температуре, то все обмоточные провода делятся на классы нагревостойкости.

Обмоточные провода с эмалевой изоляцией, разработанные до 1987 г., сохраняют свою прежнюю систему условных обозначений и деление по классам нагревостойкости. Марка провода обозначается по типу изоляционного материала, например: ПЭЛ – провод медный, изолированный лаком на масляной основе; ПЭВ – провод медный, изолированный лаком ВЛ-931; ПЭТ-155 – провод медный, изолированный эмалевым лаком на

полиэфиримидной основе и т.д. В обозначениях алюминиевых проводов добавляется буква «А», например: ПЭЛА, ПЭВА, ПЭМА и т.д. Согласно ГОСТ 8865-70 обмоточные провода делятся на 7 классов нагревостойкости, как изоляционные материалы (см. подраздел 2.7).

В ТММ наиболее широкое применение нашли медные провода круглого сечения марок:

- ПЭВ-1, ПЭВ-2, ПЭМ-1, ПЭМ-2 (ГОСТ 7262-78) – провод эмалированный (ПЭ), поливинилацеталевый (винифлекс – В) или поливинилформалевый (метальвин – М) с однослойной и двухслойной изоляцией, класс нагревостойкости – А (до 105 °С), диаметры проводов (без изоляции) – 0,05-2,44 мм. Провода марки ПЭМ более стойкие к трансформаторному маслу;

- ПЭВТЛ-1, ПЭВТЛ-2 (ТУ 16.505.446-77) – провод эмалированный, изолированный одним или двумя слоями полиуретанового лака, класс нагревостойкости – Е (до 120 °С), диаметры проводов – 0,06-1,56 мм. Особенность этих проводов – можно облуживать без зачистки изоляции;

- ПЭТВ (ТУ 16.505.001-80) – обмоточный провод на основе полиэтилентерефтолатного лака, класс нагревостойкости – В (до 130 °С), диаметры проводов – 0,06-2,44 мм. Недостаток этих проводов – пониженная стойкость к «тепловым ударам»;

- ПЭТ-155 (ГОСТ 21428-75) – обмоточный провод на основе полиэфиримидного лака, класс нагревостойкости – F (до 155 °С), диаметры проводов – 0,06-2,63 мм. Недостаток этих проводов – пониженная механическая прочность изоляции;

- ПЭФ-155 (ТУ 16.505.673-76) – обмоточный провод на основе полиэфирциануратимидного лака, класс нагревостойкости – F (до 155 °С), диаметры проводов – 0,06-1,60 мм. Не имеет недостатка провода ПЭТ-155;

- ПЭТ-200 (ТУ 16.505.937-76) – обмоточный провод на основе полиамидимидового лака, класс нагревостойкости – H, C (до 200 °С), диаметры проводов – 0,06-2,50 мм. Обладает хорошими электрическими и физико-механическими свойствами;

- ПСД и ПСДК (ГОСТ 7019-71) – провод со стекловолоконистой изоляцией, класс нагревостойкости – F и H (до 155 и 180 °С), диаметры проводов – 0,31-4,8 мм;

- ПЭЛШО (ГОСТ 16507-70) – провод эмалированный с волокнистой (шелковой) изоляцией, класс нагревостойкости – А (до 105 °С при наличии пропитки), диаметры проводов (без изоляции) – 0,05-1,56 мм.

- ПЭТВЛО (ТУ 16.505.357-78) – провод эмалированный с волокнистой (лавсановой) изоляцией, класс нагревостойкости – В (до 130 °С), диаметры проводов (без изоляции) – 0,20-1,32 мм.

На обмоточные провода с эмалевой изоляцией, разработанные после 1987 г., в соответствии с ГОСТ 26615-85 введена новая, буквенно-цифровая система обозначений и все провода подразделяются на классы:

- **по типу эмалевой изоляции:** поливинилацеталевая (винифлекс - *В*, металвин - *М*); полиуретановая - *У*; полиэфирная - *Э*; полиимидная - *И*; полиамидимидная - *АИ*; полиэфиримидная - *ЭИ*; полиэфирциануратимидная фреоностойкая - *Ф*;

- **по форме сечения:** круглые (без буквы), прямоугольные - *П*;

- **по толщине изоляции:** тип 1 - *1*, тип 2 (без цифры);

- **по конструктивному выполнению изоляции:** однослойная - (без буквы), двухслойная - *Д*, трёхслойная - *Т*, четырёхслойная - *Ч*, с термопластическим покрытием, склеивающимся под воздействием температуры, - *К*;

- **по температурному индексу** (нагревостойкости) в градусах Цельсия ($^{\circ}\text{C}$) делятся на 8 классов: **105, 120, 130, 155, 180, 200, 220**, свыше **220**;

- **по материалу проволоки:** медная - (без буквы), медная безжелезистая - *БЖ*, медная никелированная - *МН*, алюминиевая мягкая - *А*, алюминиевая твёрдая - *АТ*.

Деление обмоточных проводов по температурному индексу означает, что данные провода должны надёжно работать при указанной температуре не менее 20 тысяч часов. При увеличении рабочей температуры сверх установленной на 10°C приводит к сокращению их срока службы в два раза.

Пример нового обозначения обмоточного провода согласно ГОСТ 26615-85: провод ПЭАИ1-200 0,500 – провод эмалированный (ПЭ); с полиамидимидной изоляцией (АИ); из медной проволоки (без обозначения); круглого сечения (без обозначения); с толщиной изоляции по типу 1 (**1**) (по типу 2 цифра опускается); с температурным индексом 200°C (200) и номинальным диаметром проволоки 0,5 мм (0,500).

Марка провода выбирается по максимальной рабочей температуре обмотки согласно классу нагревостойкости с учетом условий эксплуатации, назначения, срока службы ТП и ограничений, предусмотренных в ТЗ. Так, для бытовой РЭА при оптимизации по стоимости следует выбирать наиболее дешевые марки проводов с одинарной изоляцией (ПЭВ-1, ПЭМ-1, Тип1 и др.) с минимальным запасом по сроку службы ТП. Для бортовой, судовой и другой спецаппаратуры, работающей в жестких условиях эксплуатации, необходимо выбирать наиболее надежные провода с двойной изоляцией (ПЭВ-2, ПЭМ-2, ПЭВТЛ-2, Тип2 и др.) и с некоторым запасом по температурному режиму.

В приложении Б приведены номинальные значения диаметров медной проволоки (диаметр провода без изоляции), площади сечения проволоки и диаметры проводов в изоляции для эмалевых проводов, разработанных до 1987 г., и для проводов по ГОСТ 26615-85. Более подробные справочные данные и сведения о свойствах обмоточных проводов, а также рекомендации

по их выбору можно найти в справочниках [7-9] и в соответствующей технической литературе по проектированию разрабатываемых устройств [2-4].

2.7 Выбор и обоснование электроизоляционных материалов

Электроизоляционные материалы в моточных изделиях применяются для изоляции токоведущих элементов (обмоток, выводов). В трансформаторах питания выделяют четыре основных вида изоляции: корпусную, межслоевую, межобмоточную и наружную. **Корпусная изоляция** предназначена для электрической изоляции обмоточных проводов катушки от магнитопровода. В броневых, стержневых и трехфазных трансформаторах корпусная изоляция выполняется в виде каркаса или гильзы с изоляционным буртиком (см. рисунок 2.5). В троидальных трансформаторах сердечник изолируется с помощью обоймы или нескольких слоев ленточного изоляционного материала, наложенного непосредственно на сердечник.

Межслоевая изоляция используется для предотвращения контакта между слоями обмотки при рядовой намотке катушки. Особенно опасны контакты крайних витков смежных слоев, так как между ними будет иметь место наибольшее напряжение, что может привести к их замыканию. В каркасных катушках для предотвращения западания крайних витков изоляционная лента берется с некоторым запасом по ширине намотки (по высоте намотки катушки h_k), а края ленты бахрамируются, чтобы обеспечить свободный переход ее к щечкам каркаса. Межслоевая изоляция обязательна, если напряжение между слоями обмотки 50 В и более. Кроме предотвращения замыкания между слоями, межслоевая изоляция используется для выравнивания слоев. Поэтому должна иметь достаточную механическую прочность, чтобы не сминаться в процессе намотки. Выполняется межслоевая изоляция, обычно в один слой, с помощью ленточных изоляционных материалов – электроизоляционные бумаги, стеклоткань, лакоткань, пленочные материалы и т.д.

Межобмоточная изоляция укладывается между соседними обмотками катушки и служит для электрической изоляции смежных обмоток. Учитывая важность, межобмоточная изоляция выполняется в два и более слоев из высококачественных изоляционных материалов. Кроме высоких изоляционных свойств материал межобмоточной изоляции должен обладать хорошей механической прочностью, чтобы не допустить продавливание изоляции предыдущей обмотки из более тонкого провода более толстым проводом последующей обмотки, например, между первичной и вторичной обмотками понижающего трансформатора. Межобмоточная изоляция обычно выполняется из тонкого электрокартона, кабельной бумаги, лакоткани, стеклолакоткани и др. механически жестких ленточных изоляционных материалов.

Наружная изоляция накладывается на наружную поверхность последней обмотки и предназначена для предотвращения замыкания ее при возможных контактах с металлическими элементами конструкции, а также для защиты изоляции обмотки от случайных механических воздействий. Выполняется наружная изоляция, как правило, несколькими слоями из механически прочных ленточных изоляционных материалов: лакоткани, стеклолакоткани, тонкого электрокартона, кабельной бумаги, стеклоткани при наличии пропитки и др. материалов.

Электроизоляционные материалы наиболее критичны к рабочей температуре и по этому показателю согласно ГОСТ 8865-70 делятся на семь классов нагревостойкости, обозначенных латинскими буквами:

- Y - до 90 °C – волокнистые материалы из целлюлозы, хлопка и натурального шелка, не пропитанные специальными электроизоляционными веществами;
- A - до 105 °C – те же материалы, пропитанные;
- E - до 120 °C – синтетические материалы, пленки, волокна;
- B - до 130 °C – материалы на основе слюды, асбеста, стекловолокна с органическими связующими и пропитывающими составами;
- F - до 155 °C – те же материалы с синтетическими связующими и пропитывающими составами;
- H - до 180 °C – те же материалы с кремнийорганическими связующими и пропитывающими составами;
- C - свыше 180 °C – слюда, керамические материалы, фарфор, стекло, кварц, применяемые без связующих составов или с неорганическими и элементоорганическими составами.

Ниже приведены **краткие характеристики электроизоляционных материалов**, наиболее широко используемых в моточных изделиях РЭС.

Бумага конденсаторная КОН-2 (ГОСТ 1908-82) выпускается толщиной: 4, 5, 6, 7, 8, 10, 12, 15, 22, 30 мкм. Класс нагревостойкости *A* при наличии пропитки. Используется в качестве межслоевой изоляции.

Бумага телефонная КТ-04, КТ-05 (ГОСТ 3553-80) выпускается толщиной 40 и 50 мкм. Класс нагревостойкости *A* при наличии пропитки. Используется в качестве межслоевой изоляции.

Бумага намоточная ЭН (ГОСТ 1931-80) выпускается толщиной 50 и 70 мкм. Класс нагревостойкости *A-B* при наличии соответствующей пропитки. Используется в качестве межслоевой и межобмоточной изоляции.

Бумага пропиточная ЭИП (ГОСТ 3441-80) выпускается толщиной 90, 110 и 130 мкм. Класс нагревостойкости *A-B* при наличии соответствующей пропитки. Используется в качестве межслоевой изоляции.

Бумага кабельная К-080, К-120, К170 (ГОСТ 23456-83) выпускается толщиной 80, 120 и 170 мкм. Класс нагревостойкости *A* при наличии

пропитки. Используется в качестве межслоевой, межобмоточной и наружной изоляции.

Электрокартон электроизоляционный марки ЭВ и ЭВТ (ГОСТ 2824-75) выпускается в рулонах толщиной 0,1; 0,15; 0,2; 0,25; 0,3; 0,35; 0,4; 0,5 мм. Класс нагревостойкости А при наличии пропитки. Используется в качестве межобмоточной и наружной изоляции (тонкий), а также в качестве клиньев для закрепления катушек на керне сердечника.

Стеклоткань (ГОСТ 8481-78) выпускается толщиной 60, 80 и 100 мкм, класс нагревостойкости F без пропитки и H при наличии соответствующей пропитки.

Лакоткань электроизоляционная (ГОСТ 2214-78) по нагревостойкости соответствует классу А (до +105°C). Применяются марки:

- ЛХМ – на основе хлопчатобумажной ткани, пропитанной масляным лаком. Выпускается толщиной 0,15; 0,17; 0,2; 0,24; 0,3 мм;

- ЛШМ – на основе шелковой ткани, пропитанной масляным лаком. Выпускается толщиной 0,08; 0,1; 0,12; 0,15 мм;

- ЛКМ – на основе капроновой ткани, пропитанной масляным лаком. Выпускается толщиной 0,1; 0,12; 0,15 мм;

Стеклолакоткань электроизоляционная (ГОСТ 10156-78) соответствует классам А, Е, В, F, H (до + 180 °С). Находят применение марки:

- ЛСМ - 105/120 – пропитана масляным лаком. Выпускается толщиной 0,15; 0,17; 0,2; 0,24 мм;

- ЛСЭ - 105/130 и ЛСБ - 105/130 – пропитаны, соответственно, эскапоновым и битумномасляным лаками. Выпускаются толщиной 0,12; 0,15; 0,17; 0,2; 0,24 мм;

- ЛСП - 130/155 – пропитана полиэфирно-эпоксидным лаком. Выпускается толщиной 0,08; 0,1; 0,12; 0,15; 0,17 мм;

- ЛСК - 155/180 – пропитана кремнийорганическим лаком. Выпускается толщиной 0,05; 0,06; 0,08; 0,1; 0,12; 0,15; 0,17; 0,2 мм.

Цифры в марках стеклолакотканей означают класс нагревостойкости.

Лакоткани используются преимущественно в качестве межобмоточной и наружной изоляции.

Пленка полиэтилентерефталатная (лавсановая) марки ПЭТ-Э (ГОСТ 24234—80) используется при температуре до +155 °С в качестве межслоевой и межобмоточной изоляции.. Плёнка выпускается толщиной 6; 8; 10; 12; 15; 20; 25; 35; 50; 70; 100; 125; 175; 190 и 250 мкм. Нетоксична.

Пленка полиамидная ПМ-А (ТУ 6-19-121-79) – пленка электроизоляционная полиамидная марки А. Выпускается в виде ленты толщиной 40, 60 мкм и шириной от 50 до 200 мм. Применяется в качестве межслоевой изоляции при температуре до +220 °С.

Пленка из фторопласта-4 марки Ф-4ИН (ГОСТ 24222-80) – пленка электроизоляционная неориентированная. Выпускается в виде ленты

толщиной 0,06; 0,10; 0,20 мм и шириной от 40 до 120 мм. Применяется в качестве межслоевой изоляции при температуре до +260 °С.

При выборе марки изоляционного материала необходимо учитывать не только диапазон рабочих температур, но и впитывающую способность при наличии пропитки катушки, электрическую и механическую прочность.

Дополнительные сведения об электроизоляционных материалах и рекомендации по их выбору можно найти в технической литературе [2-4] и в справочниках [6, 8, 9].

2.8 Выбор и обоснование способа и материалов защиты катушки и трансформатора

В процессе эксплуатации трансформаторы, как правило, подвергаются негативным воздействиям окружающей среды: высокой влажности, большому перепаду температур и перепаду атмосферного давления, воздействию агрессивных веществ и грибковых образований и т.д.

Для защиты катушки и металлических элементов трансформатора от влаги и агрессивной среды нашли преимущественное применение пропитка, обволакивание и защитно-декоративные покрытия. Способ и материалы защиты выбираются исходя из условий эксплуатации и назначения устройств с учетом требований к электрической прочности и сроку службы.

В катушке наиболее критичными к влаге и агрессивной среде являются изоляционные материалы. Поэтому при достаточно высокой влажности для защиты катушки широко используется пропитка лаками и компаундами. Пропиточные материалы должны иметь малую вязкость, хорошую адгезию к изоляции проводов и изоляционным материалам, входящим в катушку, но не являться растворителями изоляции. Они должны легко проникать в толщу обмоток, заполнять все воздушные промежутки и пропитывать волокнистые изоляционные материалы, придавая катушке монолитность. Тем самым катушка защищается от проникновения влаги внутрь обмоток, повышается электрическая и механическая прочность обмоток и улучшается теплоотвод от внутренних слоев катушки.

Для защиты от коррозии металлических элементов ТП (сердечника, деталей стяжки, экранов) наиболее широко применяется обволакивание, которое обычно выполняет и роль декоративного покрытия.

При нежестких условиях эксплуатации (влажность не выше критической, отсутствие агрессивной среды и т.д.) для пропитки используются недорогие пропиточные лаки, а для обволакивания – тоже недорогие покровные эмали и лаки. При эксплуатации ТП в жестких климатических условиях (очень высокая влажность, высокая температура, наличие агрессивной среды) катушки рекомендуется пропитывать компаундами, обладающими лучшими свойствами, чем лаки. Для обволакивания в этих случаях используются терморезистивные компаунды с

наполнителями, что позволяет относительно просто выполнить покрытие достаточной толщины (порядка нескольких миллиметров).

Но необходимо помнить, что пропитка и обволакивание, особенно компаундами, – трудоемкие и дорогостоящие операции. Поэтому ТП для бытовой РЭА при оптимизации по стоимости не рекомендуется ни пропитывать, ни обволакивать.

В качестве пропиточных материалов широкое применение нашли лаки и компаунды следующих марок:

- БТ-987 (ГОСТ 6244-70) – лак битумно-масляный с повышенной влагостойкостью и эластичностью. Применяется для пропитки трансформаторов и дросселей с ферритовыми и альсиферовыми сердечниками, работающих в диапазоне температур от – 60 до +105 °С;

- МЛ-92 (ГОСТ 15865-70) – лак электроизоляционный механически прочный, эластичный, с хорошей адгезией, маслостойкий. Применяется для пропитки катушек моточных изделий, работающих в диапазоне температур от – 60 до +130 °С;

- ФЛ-98 (ГОСТ 12294-76) – лак алкиднофенольный, термореактивный. Обладает хорошей цементирующей способностью, маслостоек. Применяется для пропитки катушек трансформаторов и дросселей, работающих в диапазоне температур от – 60 до +130 °С;

- ПЭ-933Л (ТУ 6-10-714-75) – лак пропиточный горячей сушки. Отличается повышенной нагревостойкостью и низким коэффициентом старения. Имеет хорошие цементирующие свойства, маслостойкий. Применяется для пропитки катушек моточных изделий, работающих в диапазоне температур от – 60 до +155 °С и в условиях тропиков;

- КО-916К (ТУ 6-02-690-76) – лак кремнийорганический электроизоляционный, модифицированный полиэфиром. Применяется для пропитки катушек моточных изделий морского и тропического исполнения, работающих в диапазоне температур от – 60 до +200 °С;

- ПК-10 (ТУ ОАБ.504.017) – компаунд метакриловый пропиточный с хорошей цементирующей способностью и с большой скоростью отверждения. Применяется для пропитки обмоток трансформаторов и дросселей, работающих в диапазоне температур от – 60 до +130 °С;

- КМ-9 (ТУ 6-09-1668-72) – компаунд электроизоляционный, метакриловый, термореактивный. Обладает высокой эластичностью, стоек к воде и ацетону. Применяется для пропитки трансформаторов и дросселей с ферритовыми сердечниками, работающих в диапазоне температур от – 60 до +155 °С.

Для защитных и защитно-декоративных покрытий трансформаторов и дросселей используются эмали, композиции и покровные лаки:

- ПФ-115 (ГОСТ 6465-76) – эмаль для окраски изделий и нанесения надписей. Выпускается различных цветов: белая (б), черная (ч), красная (к),

синяя (с), желтая (ж), светло-зеленая (св-з). Диапазон рабочих температур от – 60 до +120 °С;

- ЭП-91 (ГОСТ 15943-80) – эмаль зеленая, глянцевая, с высокой адгезией к металлам. Применяется для электроизоляционного и антикоррозионного покрытия. Диапазон рабочих температур от – 60 до +180 °С;

- ЭП-567 (ГОСТ 22369-77) – эмаль защитная, темно-зеленая. Применяется для окрашивания электротехнических изделий. Диапазон рабочих температур от – 60 до +150 °С;

- ОС-92-07 (ТУ 84-725-78) – композиция зеленая, матовая, устойчивая к грибкам. Применяется для окрашивания электротехнических изделий, работающих в условиях повышенных температур (от – 60 до +400 °С);

- ФЛ-582 (ТУ 6-10-1236-77) – лак покровный. Покрытие электроизоляционное, влагостойкое, глянцевое, твердое, механически прочное с хорошей адгезией к металлам и пластмассам. Устойчивое к периодическому воздействию минеральных масел, бензина и воды, атмосферостойкое и грибостойкое. Применяется для антикоррозионной и электроизоляционной влагозащиты деталей и узлов из различных материалов. Диапазон рабочих температур от – 60 до +150 °С;

- ЭП-730 (ГОСТ 20824-81) – лак покровный. Покрытие глянцевое, механически прочное с хорошей адгезией к металлам и пластмассам. Атмосферостойкое и грибостойкое. Применяется для антикоррозионного и электроизоляционного покрытия металлических и пластмассовых поверхностей по эмали ЭП-567. Диапазон рабочих температур от – 60 до +150 °С.

Для обволакивания катушек, трансформаторов и дросселей, предназначенных для работы в тропических условиях, в условиях высокой влажности и в агрессивной среде используется обволакивание компаундами:

- МБК-1 (ТУ 6-16-2431-80) – компаунд метакриловый электроизоляционный. Заливочный и пропиточный состав для герметизации узлов, работающих в условиях высокой влажности. Применяется для обволакивания трансформаторов и дросселей. Диапазон рабочих температур от – 60 до +125 °С;

- ЭЭС-1 (ТУ АОТ.504.032) – эпоксидный эластофицированный компаунд горячего отверждения с высокой влагостойкостью и пропитывающей способностью. Предназначен для пропитки и заливки высоковольтных трансформаторов и дросселей. Диапазон рабочих температур от – 60 до +120 °С;

- ЭП-49Д/1, ЭП-49Д/2 (ТУ 6-05-1420-75) – порошкообразные компаунды, коричневые и черные. Покрытие гладкое, ровное. Применяются для изолирования трансформаторов, дросселей и других изделий, работающих в тропических условиях и содержащих

металлические и неметаллические материалы, допускающие нагрев до (130...150)°С. Толщина покрытия от 0,15 мм и более. Режимы отверждения: для ЭП-49Д/1 – 6 ч при $t = 150 \pm 5$ °С; для ЭП-49Д/2 – 10 ч при $t = 145 \pm 5$ °С. Диапазон рабочих температур от – 60 до +130 °С;

•ЭВН-10 (ТУ ОАЮ.503.010) – порошкообразный компаунд, голубой. Покрытие гладкое, блестящее с хорошими электроизоляционными свойствами и высокой теплопроводностью. Применяются для изоляционных и защитных покрытий магнитопроводов и аппаратов с металлическими и неметаллическими деталями. Режимы отверждения: при $t = 200$ °С – 0,5 ч; при $t = 180$ °С – 1 ч; при $t = 140$ °С – 4 ч. Диапазон рабочих температур от – 60 до +130 °С.

Дополнительные рекомендации по выбору способа и материалов защиты катушки и трансформатора от воздействия влаги и агрессивной среды можно найти в литературе [3, 4].

3 РАСЧЕТ ТЭП КОНКУРЕНТНЫХ ВАРИАНТОВ И ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИИ ТРАНСФОРМАТОРА

3.1 Постановка задачи

Одной из основных задач в курсовом проектировании ставится – освоение методологии оптимального проектирования. В данном случае необходимо спроектировать трансформатор питания, оптимальным образом соответствующий требованиям ТЗ, а именно:

- должны выполняться все технические параметры и характеристики ТП в условиях эксплуатации, оговоренных в ТЗ;
- ТП должен иметь минимальные технико-экономические показатели – массу, габаритный объем, стоимость или другие показатели, по которым наложены ограничения в ТЗ;
- выполнение указанных выше требований не должно достигаться в ущерб другим показателям качества, не оговоренным в ТЗ.

Очевидно, для решения поставленной задачи необходимо было бы просчитать все возможные варианты и выбрать наиболее оптимальный. Но поскольку курсовое проектирование сильно ограничено во времени и в средствах, то необходимо качественно провести анализ ТЗ и отобрать несколько наиболее конкурентных вариантов, из которых и выбрать оптимальный.

Для решения поставленной задачи предлагается воспользоваться *следующей методикой:*

- 1) рассчитать габаритный критерий или габаритные критерии, если заданы ограничения и по падению напряжения, и по перегреву;
- 2) выбрать типоразмеры сердечников из конкурентных рядов;
- 3) рассчитать технико-экономические показатели конкурентных вариантов ТП;
- 4) провести сравнительный анализ ТЭП конкурентных вариантов и выбрать оптимальный вариант ТП.
- 5) привести справочные данные оптимального сердечника, необходимые для электрического и конструктивного расчета.

Рассмотрим подробно каждый из предложенных пунктов.

3.2 Расчет габаритных критериев конкурентных конструкций ТП

3.2.1 Расчет габаритной мощности трансформатора

Для расчета габаритных критериев необходимо знать габаритную мощность трансформатора P_T

$$P_T = 0,5 \cdot \left[\sum_{i=1}^n U_{2i} \cdot I_{2i} + \sum_{i=1}^n U_{2i} \cdot I_{2i} \cdot K_{\text{сг}} \right], \quad (3.1)$$

где U_{2i} и I_{2i} – напряжения и токи вторичных обмоток;

K_{Bi} – корректирующий коэффициент приведения i -й вторичной обмотки к первичной, зависящий от схемы выпрямления. Для мостовых схем и для схем удвоения напряжения, а также при отсутствии выпрямителя $K_{Bi} = 1$. Для однофазной схемы выпрямления со средней точкой $K_{Bi} = 0,71$. Для трёхфазной схемы выпрямления с нулевой точкой $K_{Bi} = 0,81$.

3.2.2 Расчет величины габаритного критерия по падению напряжения $Gr^{(U)}$

Если в ТЗ задано ограничение по падению напряжения, то габаритный критерий рассчитывается по формуле

$$Gr^{(U)} = \frac{P_T}{10 \cdot \delta U \cdot (K_C \cdot f \cdot B \cdot 10^{-2})^2} \cdot \frac{K_{OT}}{K_O} \cdot \frac{\rho_{20}}{1,75 \cdot 10^{-8}}, \quad (3.2)$$

где $\delta U = \Delta U / U_1$ – заданное относительное падение напряжения;

U_1 – напряжение питающей сети;

K_C – коэффициент заполнения сердечника магнитным материалом, определяется из таблицы В.1 в зависимости от толщины выбранного материала;

f – частота питающей сети;

B – рабочая индукция. Рекомендуется выбирать ее из условия $B \leq 0,9 \cdot B_S$, где B_S – предельно допустимая рабочая индукция для выбранного материала сердечника (см. таблицы 2.2 и 2.3 или справочную литературу [7-9]);

K_O / K_{OT} – рекомендуемое отношение коэффициента заполнения окна K_O при заданных условиях к коэффициенту заполнения при типовых условиях K_{OT} . Определяется по таблице В.2;

ρ_{20} – удельное сопротивление для выбранного проводникового материала при температуре $20^\circ C$ (для меди $\rho_{20} = 1,75 \cdot 10^{-8}$ Ом·м).

3.2.3 Расчет величины габаритного критерия по температуре перегрева $Gr^{(T)}$

3.2.3.1 Выбор теплового режима трансформатора

Если в ТЗ задано ограничение по перегреву, то в зависимости от типа теплового режима возможны два расчетных случая: тепловой вынужденный режим (ТВР) или тепловой естественный режим (ТЕР).

Под ТВР понимается такой тепловой режим, при котором не удается обеспечить оптимальное соотношение между потерями в сердечнике и в обмотках ν_o , то есть $\nu = P_c / P_o < \nu_o$. Значения ν_o для ТП, реализованных на нормализованных сердечниках при типовых условиях, приводятся в справочных данных. ТВР характерен, как правило, для ТММ промышленной частоты с открытыми сердечниками, т.е. для БТ и СТ.

ТЕР имеет место у ТММ с открытыми сердечниками повышенной частоты ($f \geq 400 \text{ Гц}$) и у тороидальных трансформаторов при любой частоте, так как у него сердечник закрыт обмотками. Для ТТ обычно принимают $v_0 = 1$. При ТЕР, когда $v = v_0$, в трансформаторе достигается оптимальный тепловой режим, при котором температура перегрева обмоток минимальна.

На данном этапе для выбора расчетного случая можно ограничиться приведенными выше рекомендациями: если задана промышленная частота (50 Гц), то для БТ и СТ выбирается ТВР, а для ТТ – ТЕР; если задана повышенная частота (400 Гц и более), то для любых конструкций трансформаторов выбирается ТЕР.

3.2.3.2 Расчет габаритного критерия при ТВР

При вынужденном тепловом режиме габаритный критерий рассчитывается по формуле (3.3)

$$Gr_{ТВР}^{(\tau)} = \frac{C_P P_T \sqrt{(1+v)K_H}}{K_C \cdot f \cdot B \cdot 10^{-2}} \left(\frac{\Gamma}{\tau_m} \right)^{\frac{5}{8}} \cdot \sqrt{\frac{K_{OT}}{K_O} \cdot \frac{\alpha_{0ht}}{\alpha_0} \cdot \frac{P_{20}}{1,75 \cdot 10^{-8}} \cdot \sqrt{(1+i_1)(1+\varepsilon_1)}}}, \quad (3.3)$$

где C_P – коэффициент, учитывающий отличие габаритной мощности ТММ от электромагнитной, рассчитывается по формуле (3.7);

$v = P_C/P_0$ – отношение потерь в сердечнике к потерям в обмотках, рассчитывается по формуле (3.8);

K_H – коэффициент нагрева, учитывающий увеличение удельного сопротивления проводникового материала ρ_{20} при нагреве, рассчитывается по формуле (3.10);

Γ – коэффициент неравномерности нагрева катушки. Для БТ и СТ, не подлежащих обволакиванию терморективными компаундами, значение Γ выбирается из таблицы В.5, а при необходимости обволакивания терморективными компаундами принимают $\Gamma \approx 1,25$. Для ТТ значение коэффициента Γ на начальном этапе принимается $\Gamma \approx 1,25$;

τ_m – максимально допустимый перегрев обмоток, оговоренный ТЗ;

α_0/α_{0ht} – отношение коэффициентов, пропорциональных коэффициенту теплоотдачи, для типового и реального трансформаторов. Ориентировочно определяется по таблице В.3. При пониженном атмосферном давлении отношение α_0/α_{0ht} необходимо уточнить по формуле

$$\alpha_0/\alpha_{0ht} = (\alpha_0/\alpha_{0ht})' \cdot (1 - \Delta\alpha), \quad (3.4)$$

где $(\alpha_0/\alpha_{0ht})'$ – табличное значение соотношения;

$\Delta\alpha$ – относительное уменьшение коэффициента теплоотдачи, обусловленное снижением давления окружающей среды, определяется по рисунку 3.1 или рассчитывается приближенно по формуле

$$\Delta\alpha \approx 0,5 \sqrt{H_{min}/101}. \quad (3.5)$$

Здесь H_{min} – минимальное значение атмосферного давления.

$i_1 = I_1/I_{РАБ}$ – относительный первичный ток – отношение полного первичного тока к сумме приведенных вторичных токов. Для ТВР его можно определить по рисунку 3.2, а, предварительно рассчитав параметр p_τ по формуле (3.6) [4, с.495]

$$p_\tau = 0,1 \cdot \tau_m^{0,6} \cdot (P_T / f)^{0,13} \quad (3.6)$$

$\varepsilon = j_2/j_1$ – соотношение плотности токов во вторичных обмотках к плотности тока в первичной обмотке. Рекомендуется выбирать как среднее оптимальное значение ($\varepsilon = \varepsilon_{О.СР}$) для выбранных рядов сердечников из таблиц приложения Д или из [4, приложение 7].

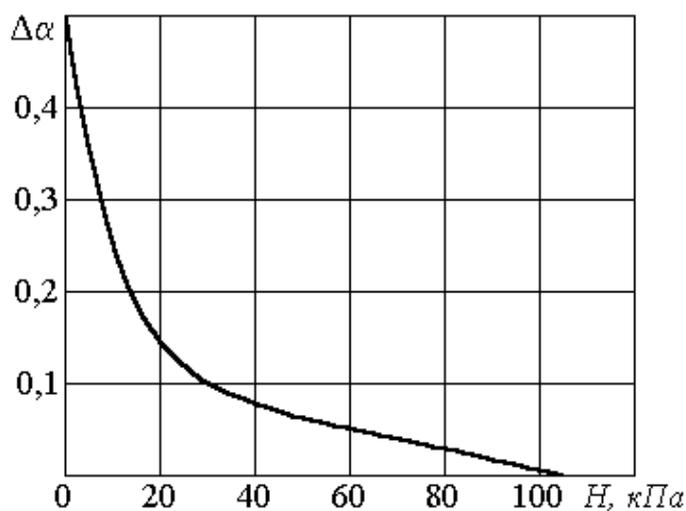


Рисунок 3.1 – Влияние атмосферного давления на теплообмен трансформатора с окружающей средой

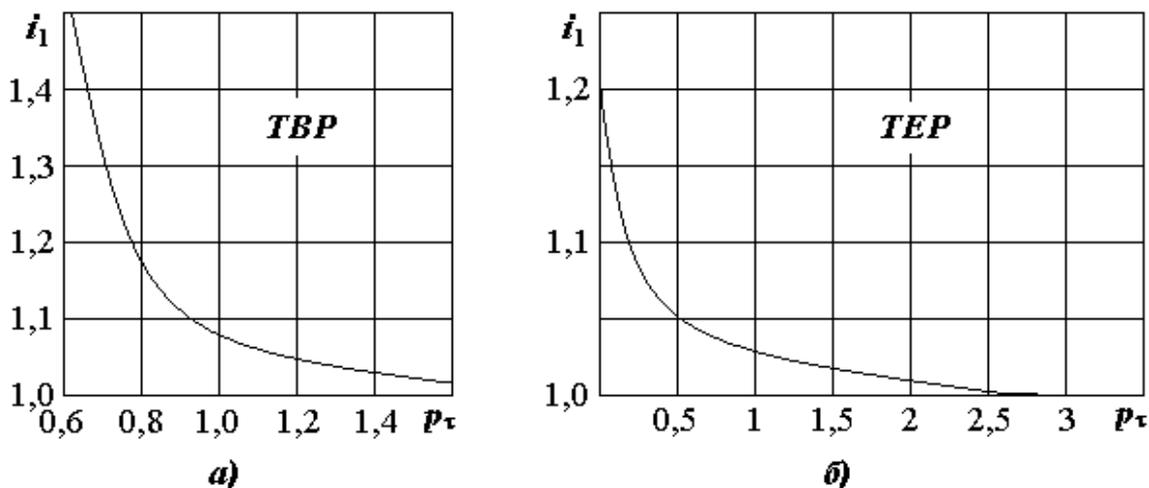


Рисунок 3.2 – Зависимости относительного первичного тока i_1 от габаритной мощности P_T , температуры перегрева τ_m и частоты f

Значение коэффициента C_P для нетиповых условий в режиме ТВР рассчитывается по формуле (3.7)

$$C_P = 1 + (C_P^* - 1) \cdot \left(\frac{\tau_m}{50}\right)^2 \cdot \sqrt{\frac{1.6 \cdot 50}{B \cdot f}} \cdot \sqrt{\frac{P_{20}}{1.75 \cdot 10^{-8}}}, \quad (3.7)$$

где C_P^* для типовых условий может быть определен по рисунку Г.2. [4, с.501]

Величину коэффициента v при ТВР ориентировочно определяют по формуле

$$v = 1.2 \cdot \frac{P_1 \cdot B^2 \cdot \sqrt{P_T}}{100 \cdot (\tau_m / 50)^2 \cdot (\alpha_0 / \alpha_{0H})^2} \cdot \frac{V_C}{V_K} \cdot \sqrt{\frac{P_{20}}{1.75 \cdot 10^{-8}} \cdot \frac{K_{OT}}{K_O}}, \quad (3.8)$$

Здесь P_1 – удельные потери в сердечнике при индукции $B = 1$ Тл рассчитываются по формуле

$$P_1 = K_T \cdot p'_1, \quad (3.9)$$

где p'_1 – удельные потери в материале сердечника. Определяются из справочных данных для выбранной марки стали при $B = 1$ Тл и заданной в ТЗ частоте напряжения (см. таблицы 2.2 и 2.3, приложение Е или в [7-9]);

K_T – коэффициент увеличения удельных потерь при изготовлении сердечника. Значение K_T определяют по таблице В.4;

V_C/V_K – отношение объемов сердечника и катушки (обмоток), находят как средние значения для выбранных рядов сердечников из таблиц приложения Д или из [4, приложение 7].

Коэффициент нагрева K_H рассчитывается по формуле

$$K_H = 1 + \alpha_T \cdot \left(t_{C.max} + \frac{\tau_m}{T} - 20 \right), \quad (3.10)$$

где α_T – температурный коэффициент увеличения удельного сопротивления материала провода (для меди $\alpha_T \approx 0,004$ 1/К);

$t_{C.max}$ – максимальная температура среды, заданная в ТЗ.

Для рядов сердечников ШЛ, ПЛ и ОЛ из таблиц приложения Д или из [4, приложение 7] необходимо определить средние значения v_0 . Если окажется, что расчетная величина v больше или равна оптимальной v_0 ($v \geq v_0$), то расчет по ТВР выбран ошибочно. Необходимо перейти к расчету габаритного критерия по ТЕР. Более строгое заключение о режиме работы ТММ можно сделать лишь в электрическом расчете по величине индукции в сердечнике B .

3.2.3.3 Расчет габаритного критерия при ТЕР

При естественном тепловом режиме габаритный критерий рассчитывается по формуле (3.11)

$$Gr_{TER}^{(v)} = \frac{C_P P_T \sqrt{K_H P_1}}{K_C \cdot f \cdot 10^{-2}} \cdot \frac{\alpha_{0H}}{\alpha_0} \left(\frac{T}{\tau_m} \right)^5 \cdot \sqrt{\frac{K_{OT}}{K_O} \cdot \frac{P_{20}}{1.75 \cdot 10^{-8}} \sqrt{(1+i_1)(1+\varepsilon \cdot i_1)}}}. \quad (3.11)$$

Значение коэффициента C_P для нетиповых условий в режиме ТЕР рассчитывается по формуле (3.12)

$$C_p = 1 + (C_p^* - 1) \cdot \sqrt{\frac{\tau_m}{50}} \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{400}{f}\right)^2} \cdot \frac{P_1}{13} \cdot \frac{P_{20}}{1,75 \cdot 10^{-8}} \quad (3.12)$$

Значение относительного первичного тока i_1 для ТЕР можно определить по рисунку 3.2, б, предварительно рассчитав параметр p_τ по формуле (3.13),

$$p_\tau = 10^{-3} \cdot P_T^{0,67} \cdot (f / \tau_m)^{1,67} \quad (3.13)$$

Определение значений остальных коэффициентов и соотношений в формулах (3.11) и (3.12) рассмотрено в предыдущем подпункте 3.2.3.2.

3.3 Выбор типоразмеров сердечников из конкурентных рядов

Типоразмеры сердечников выбираются из справочных данных для конкурентных рядов (см. Приложение Д или [4, Приложение 7]) из условий, чтобы типовые габаритные критерии были не менее расчетных, т.е.

$$Gr_T^{(v)} \geq Gr_T^{(v)} \quad , \quad Gr_T^{(c)} \geq Gr_T^{(c)} \quad \text{и} \quad Gr_T^{(c)} \geq Gr_T^{(c)} \quad (3.14)$$

Если в ТЗ заданы ограничения и по падению напряжения δU , и по перегреву τ_m , то из каждого ряда сердечников **выбирается больший типоразмер**, а меньший типоразмер сердечника отбрасывается из дальнейшего анализа.

3.4 Определение ТЭП для конкурентных типоразмеров сердечников

3.4.1 Масса сердечников G_c , катушек G_k и трансформаторов G_T для выбранных выше типоразмеров сердечников определяются из таблиц приложения Д или [4, Приложение 7] для типовых условий.

3.4.2 Габаритные размеры A , B и H (см. рисунок 2.1) **рассчитываются** по формулам:

а) для броневых конструкций

$$A = 2(a + c), \quad B = b + 2c, \quad H = a + h; \quad (3.15)$$

б) для стержневых конструкций

$$A = 2(a + c), \quad B = b + c, \quad H = 2a + h; \quad (3.16)$$

в) для тороидальной конструкции из условия равенства площадей сечения катушки внутри и снаружи сердечника следует

$$A = B = D_{TT} = \sqrt{D^2 + c^2 - d_0^2} \quad , \quad (3.17)$$

$$H = b + c - d_0. \quad (3.18)$$

В формулах (3.14) и (3.15) a , b , c и h – основные геометрические параметры броневых и стержневых сердечников (см. рисунки 2.1, а и б). В формулах (3.16) и (3.17) D и c – внешний и внутренний диаметры тороидального сердечника; b – ширина сердечника; D_{TT} и d_0 – внешний и внутренний диаметры тороидального трансформатора (см. рисунок 2.1, в).

Внутренний диаметр тороидального трансформатора, согласно рекомендациям [4, с.148], можно ориентировочно рассчитать по формуле

$$d_0 \approx \sqrt{\frac{c^2 + 2bc}{1 + 4c}} \quad (3.19)$$

3.4.3 Габаритный объем трансформаторов V_T рассчитывается по формуле

$$V_T = A \cdot B \cdot H. \quad (3.20)$$

3.4.4 Стоимость основных материалов ТП \mathcal{C}_T определяется как сумма стоимости основных материалов – сердечника \mathcal{C}_C и катушки \mathcal{C}_K

$$\mathcal{C}_T = \mathcal{C}_C + \mathcal{C}_K = G_C \cdot \mathcal{C}_C + \sum G_{O_i} \cdot \mathcal{C}_{O_i}, \quad (3.21)$$

где G_C и \mathcal{C}_C – масса сердечника и цена выбранного материала сердечника;

G_{O_i} и \mathcal{C}_{O_i} – масса обмоток и цена выбранных проводов обмоток.

Так как в настоящее время цены на все промышленные материалы неопределенные и неустойчивые (как правило, договорные), то воспользуемся справочными данными 1970-80-х годов и пересчитаем их по курсу рубля на настоящее время.

$$\mathcal{C}_C = K_{\mathcal{C}} \cdot \mathcal{C}'_C, \quad \mathcal{C}_{O_i} = K_{\mathcal{C}} \cdot \mathcal{C}'_{O_i}, \quad (3.22)$$

где \mathcal{C}'_C и \mathcal{C}'_{O_i} – цены выбранных материалов сердечника и обмоточного провода в 70-80-е годы. Их можно найти как справочные данные из [4, с. 607, таблица ПЗ.2 и с. 614, таблица ПЗ.10] или из [8, с. 350, таблица 11.33 и с. 479, таблица 14.111]. Для электротехнических сталей и обмоточных проводов, получивших наиболее широкое применение в ТММ, цены приведены в приложении Г.

Коэффициент пересчета $K_{\mathcal{C}}$ определим по формуле

$$K_{\mathcal{C}} = K_{\$,70} \cdot K_{\text{Р.Н}}, \quad (3.23)$$

где $K_{\$,70}$ – курс доллара по отношению к рублю в 1970-е годы, $K_{\$,70} = 1,3 \text{ \$/руб}$;

$K_{\text{Р.Н}}$ – курс рубля к доллару в настоящее время, $\text{руб}/\text{\$}$.

Для определения цены обмоточных проводов необходимо знать диаметр провода и массу для каждой обмотки. Диаметры проводов обмоток можно рассчитать по формуле

$$d_i = \sqrt{\frac{4 \cdot I_i}{\pi \cdot j}}, \quad (3.24)$$

где I_i – токи соответствующих обмоток;

j – средняя плотность тока j , ориентировочное значение которой можно найти из таблицы В.6 или по графикам $j(P_T)$ (рисунок 3.3), построенным по данным из [2, с.174, таблица 5.2], в зависимости от габаритной мощности и частоты сети.

Ток первичной обмотки можно определить с достаточной степенью точности как отношение габаритной мощности к напряжению сети

$$I_1 \approx P_T / U_1. \quad (3.25)$$

Массу первичной обмотки логично принять равной половине массы катушки – $G_{O1} = G_K / 2$. Вторую половину массы катушки можно распределить между вторичными обмотками пропорционально их мощностям

4 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РАСЧЁТ ТРАНСФОРМАТОРА

Электрический расчет для выбранного оптимального варианта ТП ведется по тому расчетному случаю, ограничения по которому оказались более жесткие, то есть по тому критерию, по которому был выбран оптимальный сердечник: по падению напряжения, по перегреву ТВР или по перегреву ТЕР. Рассмотрим каждый из этих трех вариантов в отдельности.

4.1 Электрический расчет ТП по падению напряжения

4.1.1 Рассчитывают потери в сердечнике P_C

$$P_C = P_1 \cdot B^2 \cdot G_C, \quad (4.1)$$

где P_1 – удельные потери в сердечнике, рассчитанные по формуле (3.9);
 B – рабочая индукция в сердечнике, выбранная в пункте 3.2.2;
 G_C – масса сердечника, берется из таблицы 3.2.

4.1.2 Определяют потери в обмотках по формуле

$$P'_O = P_G \cdot \frac{\delta U}{1 - \delta U}, \quad (4.2)$$

где P_G – габаритная мощность ТП;

δU – заданное в ТЗ допустимое падение напряжения в обмотках.

4.1.3 Определяют соотношение потерь в сердечнике и в обмотках

$$v' = \frac{P_C}{P'_O}. \quad (4.3)$$

4.1.4 Рассчитывают максимальную температуру перегрева обмоток по формуле

$$\tau'_m = \frac{(P_C + P'_O) \cdot \Gamma}{\alpha \cdot B \cdot S_O}, \quad (4.4)$$

где Γ – коэффициент неравномерности нагрева обмоток трансформатора, определяется из таблицы В.5. При наличии обволакивания терморезистивными компаундами принимается $\Gamma \approx 1,2 \dots 1,3$;

α – коэффициент, пропорциональный коэффициенту теплоотдачи, рассчитывается по формуле (4.5);

B – коэффициент, учитывающий участие сердечника и шасси в охлаждении катушки, рассчитывается по формуле (4.6);

S_O – площадь охлаждения катушки, берется из таблицы 3.2.

$$\alpha = \alpha_0 \cdot \sqrt[4]{\frac{\tau_m}{50}} \cdot \sqrt[6]{\frac{0,05}{h_K}} \cdot (1 - \Delta\alpha), \quad (4.5)$$

где α_0 – коэффициент, пропорциональный коэффициенту теплоотдачи при типовых условиях, определяется из таблицы В.5. При наличии обволакивания терморезистивными компаундами значение величины α_0 уменьшается на 10%;

h_K – высота намотки катушки, на данном этапе принимается $h_K \approx h$, м;

$\Delta\alpha$ – относительное уменьшение коэффициента теплоотдачи, обусловленное снижением давления окружающей среды, определяется по рисунку 3.1 или рассчитывается приближенно по формуле (3.5).

$$B = 1 + m_1 \beta \cdot \sqrt{\frac{\nu + 0,6}{1 + 0,2 \cdot \nu \cdot \beta}}, \quad (4.6)$$

где m_1 – коэффициент, учитывающий участие шасси в охлаждении катушки, выбирается из таблицы В.5;

β – отношение площадей охлаждения сердечника и катушки, берется из таблицы 3.2.

Так как на данном этапе τ_m еще не известно, то ее величина рассчитывается методом последовательных приближений. Необходимо априори (в нулевом приближении) задаться ее величиной, например $\tau_m = 50$ К, и рассчитать по формуле (4.5) величину $\alpha^{(1)}$ в первом приближении. Затем подставить значение $\alpha^{(1)}$ в формулу (4.4) и найти τ_m в первом приближении и сравнить ее величину с ранее принятой τ_m . Если окажется, что $|\tau_m^{(1)} - \tau_m| \geq 1$ К, то расчет продолжить. В формулу (4.5) подставить величину τ_m и рассчитать $\alpha^{(2)}$ во втором приближении, по формуле (4.4) рассчитать τ_m и т.д., пока разница температуры перегрева в последнем и предпоследнем приближениях не окажется меньше 1 К.

Если, при заданном в ТЗ ограничении по температуре, расчетная величина τ_m окажется больше допустимой, то либо неправильно выбран расчетный случай, либо в расчетах допущены грубые ошибки.

4.1.5 Определяют ЭДС первичной обмотки E_1

$$E_1' = \left(1 - \frac{\delta U}{2}\right) U_1. \quad (4.7)$$

4.1.6 Рассчитывают число витков первичной обмотки

$$W_1' = \frac{E_1'}{4,44 \cdot f \cdot K_C \cdot Q_C \cdot B}. \quad (4.8)$$

4.1.6 Рассчитывают число витков вторичных обмоток

$$W_{2i}' = \frac{U_{2i} \cdot (1 + \delta U / 2)}{4,44 \cdot f \cdot K_C \cdot Q_C \cdot B}. \quad (4.9)$$

4.1.7 Определяют активную I_{0A} и реактивную I_{0P} составляющие намагничивающего тока

$$I_{0A}' = P_C / E_1', \quad (4.10)$$

$$I_{0P}' = \frac{1}{W_1'} \cdot (H_C \cdot l_C + 1,1 \cdot B \cdot \delta_C), \quad (4.11)$$

где H_C – напряженность магнитного поля сердечника при рабочей индукции B , выбранной в пункте 3.2.2. H_C определяется по характеристике намагничивания $B[H]$, построенной по справочным данным из [7-9] для выбранного материала. Для электротехнических холоднокатаных

анизотропных сталей характеристики намагничивания приведены в приложении Е;

l_C – длина средней силовой линии магнитного поля сердечника, берется из таблицы 3.2;

δ_C – величина немагнитного зазора в разрезных сердечниках, *мм*. Для броневых и стержневых разрезных ленточных сердечников рассчитывается по эмпирической формуле

$$\delta_C = 7,56 \cdot Q_C^{0,45} \quad (4.12)$$

Здесь сечение сердечника Q_C в $см^2$, а δ_C получается в *мм*.

Для тороидальных ленточных неразрезных сердечников $\delta_C = 0$.

4.1.8 Рассчитывают приведенный рабочий ток

$$I'_{PAB} = \sum_{i=1}^n \frac{W'_{2i}}{W'_1} \cdot K_{Bi} \cdot I_{2i} \quad (4.13)$$

где K_{Bi} – корректирующий коэффициент приведения i -й вторичной обмотки к первичной (см. пункт 3.2.1).

4.1.9 Рассчитывают полный ток первичной обмотки

$$I'_1 = \sqrt{(I'_{PAB} + I'_{0A})^2 + (I'_{0P})^2} \quad (4.14)$$

4.1.10 Определяют относительный ток i_1

$$i_1 = I'_1 / I'_{PAB} \quad (4.15)$$

4.1.11 Определяют плотности тока в обмотках.

4.1.11.1 Рассчитывают среднюю плотность тока в обмотках

$$j' = \sqrt{\frac{P_O}{K_O \cdot \rho_{20} \cdot K_H \cdot V_K}} \quad (4.16)$$

где K_O – коэффициент заполнения окна обмоткой для заданных условий, рассчитывается по формуле (4.17);

K_H – коэффициент нагрева, рассчитывается по формуле (3.10) при найденной в пункте 4.1.4 температуре перегрева τ_m ;

V_K – объем катушки (катушек), определяемый из таблицы 3.2.

$$K_O = (K_O / K_{OT}) \cdot K_{OT} \quad (4.17)$$

где K_O / K_{OT} – выбранное в пункте 3.2.2 отношение коэффициентов заполнения;

K_{OT} – коэффициент заполнения окна при типовых условиях, берется из таблицы 3.2.

4.1.11.2 Определяют плотность тока во вторичных обмотках

$$j'_2 = j' \cdot \sqrt{\epsilon_0} \quad (4.18)$$

где ϵ_0 – оптимальное отношение плотности токов во вторичных обмотках к плотности тока в первичной обмотке, берется из таблицы 3.2.

4.1.11.3 Определяют плотность тока в первичной обмотке

$$j'_1 = i_1 \cdot j'_2 / \epsilon_0 \quad (4.19)$$

4.1.12 Определяют сечение проводов первичной и вторичных обмоток

$$q'_{пр.р.и} = I_i / j'_i \quad (4.20)$$

4.1.13 Уточняют максимальную рабочую температуру обмоток

$$t'_{P.max} = t_{C.max} + \tau'_m, \quad (4.21)$$

где $t_{C.max}$ – максимальная температура среды, заданная в ТЗ.

4.1.14 Уточняют выбор марки обмоточных проводов в соответствии с фактическим тепловым режимом работы (см. подраздел 2.6).

4.1.15 Для выбранной марки провода из приложения Б или из справочников [7-9] находят стандартные сечения проводов $q_{ПР.i}$ для каждой обмотки, наиболее близкие к расчетным значениям $q_{ПР.P.i}$. Справочные данные о выбранных проводах рекомендуется свести в таблицу 4.1, в которой необходимо привести: марку провода, ГОСТ или ТУ; значения сечений проводов расчетные $q_{ПР.P.i}$ и стандартные $q_{ПР.i}$; диаметры выбранных проводов без изоляции d_i и с изоляцией $d_{ИЗ.i}$.

Таблица 4.1 – Справочные данные обмоточных проводов

Номер обмотки	Марка провода, ГОСТ или ТУ	$q_{ПР.P}, мм^2$	$q_{ПР}, мм^2$	$d, мм$	$d_{ИЗ}, мм$
1					
...					
i					

4.2 Электрический расчет ТП по температуре перегрева при вынужденном тепловом режиме (ТВР)

4.2.1 Рассчитывают потери в сердечнике P_C по формуле (4.1).

4.2.2 Рассчитывают максимально допустимые потери в трансформаторе при заданной температуре перегрева τ_m обмоток по формуле

$$(P_C + P_O)' = \alpha \cdot B \cdot S_O \cdot \frac{\tau_m}{\Gamma}, \quad (4.22)$$

где α – коэффициент, пропорциональный коэффициенту теплоотдачи, рассчитывается по формуле (4.5);

B – коэффициент, учитывающий участие сердечника и шасси в охлаждении катушки, рассчитывается по формуле (4.6);

S_O – площадь охлаждения катушки, берется из таблицы 3.2.

Γ – коэффициент неравномерности нагрева обмоток трансформатора, определяется из таблицы В.5. При наличии обволакивания терморезистивными компаундами принимается $\Gamma \approx 1,2 \dots 1,3$;

4.2.3 Определяют потери в обмотках по формуле

$$P_O' = (P_C + P_O)' - P_C. \quad (4.23)$$

4.2.4 Определяют соотношение потерь в сердечнике и в обмотках

$$v' = \frac{P_C}{P_O'}. \quad (4.24)$$

Сравнивают полученное значение v' с оптимальной величиной v_O для выбранного сердечника в режиме ТЕР (см. приложение Д). Если $v' \geq v_O$, то

тепловой режим (ТВР) выбран неверно. Необходимо перейти на расчет по ТЕР. Либо в предыдущих расчетах допущены грубые ошибки.

4.2.5 Определяют падение напряжения $\delta U'_P$

$$\delta U'_P = \frac{P'_O}{P_T + P'_O} , \quad (4.25)$$

где P_T – габаритная мощность ТП.

Сравнивают полученное значение $\delta U'_P$ с заданным в ТЗ δU . Если $\delta U'_P < \delta U$, то дальнейший расчет ведется при $\delta U = \delta U'_P$. Если $\delta U'_P > \delta U$, то дальнейший расчет ведется при заданном в ТЗ падении напряжения δU .

4.2.6 Далее электрический расчет ТП производится по приведенной выше методике – пункты 4.1.5–4.1.15, кроме пунктов 4.1.13 и 4.1.4.

Кроме того, плотность тока в первичной обмотке (подпункт 4.1.11.3) рассчитывают по формуле (4.26)

$$j'_1 = j'_2 / \epsilon_0 . \quad (4.26)$$

4.3 Электрический расчет ТП по температуре перегрева при естественном тепловом режиме (ТЕР)

4.3.1 Рассчитывают максимально допустимые потери в трансформаторе ($P_C + P_O$) при заданной температуре перегрева τ_m обмоток по формуле (4.22).

4.3.2. Рассчитывают оптимальную величину рабочей индукции в сердечнике по формуле

$$B = \sqrt{\frac{\nu}{\nu + 1} \cdot \frac{(P_C + P_O)}{P_1 \cdot G_C}} , \quad (4.27)$$

где ν – соотношение потерь в сердечнике и в обмотках определяется по формуле (4.28);

P_1 – удельные потери в сердечнике, рассчитанные по формуле (3.9);

G_C – масса сердечника, кг, берется из таблицы 3.2.

$$\nu = \frac{P_C}{P_1 \cdot G_C} , \quad (4.28)$$

где β – отношение площадей охлаждения сердечника и катушки, берется из таблицы 3.2.

4.3.3 Рассчитывают потери в сердечнике P_C по формуле (4.1) при полученной величине рабочей индукции B .

4.3.4 Определяют потери в обмотках по формуле (4.23)

4.3.5 Рассчитывают падение напряжения $\delta U'_P$ по формуле (4.25).

Сравнивают полученное значение $\delta U'_P$ с заданным в ТЗ δU . Если $\delta U'_P < \delta U$, то дальнейший расчет ведется при $\delta U = \delta U'_P$. Если $\delta U'_P > \delta U$, то дальнейший расчет ведется при заданном в ТЗ падении напряжения δU .

4.2.6 Далее электрический расчет ТП производится по приведенной выше методике – пункты 4.1.5–4.1.15, кроме пунктов 4.1.13 и 4.1.4, а плотность тока в первичной обмотке рассчитывают по формуле (4.26).

5 КОНСТРУКТИВНЫЙ РАСЧЕТ ТРАНСФОРМАТОРА

5.1 Постановка задачи

Конструктивный расчет ТММ включает в себя уточнение конструктивных решений, принятых ранее в разделе 2, и расчет размещения обмоток в окне сердечника. Методика расчета размещения обмоток в окне сердечника определяется конструкцией сердечника и катушки трансформатора. В данном методическом пособии рассматриваются методики конструктивного расчета броневых, стержневых и тороидальных ТП, конструкции которых представлены на рисунке 2.1. В основу предлагаемой методики положены работы [2 и 4]. Конструктивный расчет тороидального ТП существенно отличается от расчета броневых и стержневых трансформаторов, поэтому методики их расчета представлены отдельно.

5.2 Конструктивный расчет броневых и стержневых ТММ

5.2.1 Уточнение конструкции катушки

Уточняется конструкция катушки – каркасная, бескаркасная (гильзовая) или секционированная (см. подраздел 2.5) и выбирается окончательно тип намотки обмоток – рядовая виток к витку или внавал (без соблюдения порядовки).

5.2.2 Уточнение выбора изоляционных материалов

При расчете ТП по падению напряжения после расчета максимальной рабочей температуры $t_{p,max}$ (см. пункт 4.1.13) следует уточнить:

- марку материала и технологию изготовления каркаса (гильзы), выбранные ранее в подразделе 2.5;
- марки материалов межслоевой, межобмоточной и наружной изоляции, выбранных в пункте 2.7.

При расчете по перегреву уточнение изоляционных материалов, как правило, носит формальный характер, то есть выбранные в разделе 2 материалы оставляют без изменения.

5.2.3 Определение испытательных напряжений

Определяют амплитудные значения рабочего напряжения на обмотках ТП U_{mi} . При синусоидальном напряжении

$$U_{mi} = \sqrt{2} \cdot U_i, \quad (5.1)$$

где U_i – действующие значения напряжений на обмотках, указанные в ТЗ.

и стержневого двухкатушечного (б) трансформатора

На рисунках 5.1 введены следующие условные обозначения:

c, h – ширина и высота окна сердечника.

h_K – высота намотки катушки;

C_{O1}, C_{O2} – толщина намотки первичной и вторичной обмоток;

C_K – толщина намотки катушки;

ΔC_K – технологический зазор между катушкой и сердечником для бронированного ТП и между катушками для стержневого ТП;

Δ_K – толщина каркаса (гильзы);

$\Delta h/2$ – толщина щечек каркаса;

Δ_{O1} – толщина изоляции, наложенной на каркас (гильзу) между каркасом и первым слоем первичной обмотки – подложка;

$\Delta_{СЛ.1}, \Delta_{СЛ.2}$ – толщина межслоевой изоляции первичной и вторичной обмоток;

Δ_{12} – толщина межобмоточной изоляции (между первичной и вторичной обмотками);

$\Delta_{НАР}$ – толщина наружной изоляции;

$\Delta_{КОР}$ – толщина корпусной изоляции;

$\delta_{ТЗ}$ – технологический зазор между каркасом и сердечником.

5.2.4.2 Определяют толщину корпусной изоляции каркаса (гильзы) $\Delta_{КОР}$

$$\Delta_{КОР} = \Delta_K + \delta_{ТЗ} + \Delta_{O1}, \quad (5.2)$$

где Δ_K – толщина каркаса (гильзы);

$\delta_{ТЗ}$ – величина технологического зазора между каркасом и сердечником;

Δ_{O1} – толщина подложки – изоляции, наложенной на каркас (гильзу).

Для *прессованных* каркасов и гильз из терморезистивных материалов величина Δ_K определяется по рисунку 5.2.

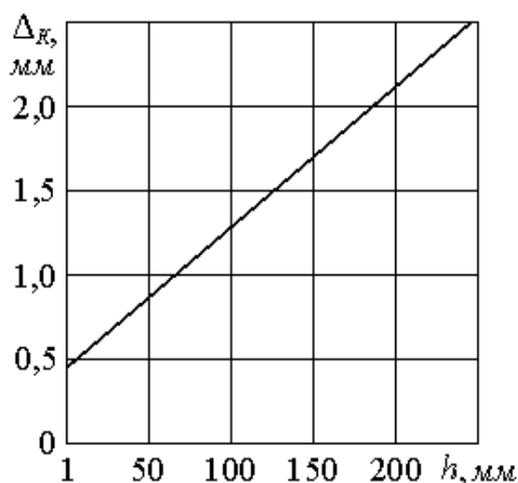


Рисунок 5.2 – Зависимость толщины каркаса от высоты окна обмотки

Для *литых* каркасов из термопластичных пластмасс для увеличения механической прочности толщину каркаса следует *увеличить* в 1,5-2 раза.

Величина технологического зазора $\Delta_{ТЗ}$ выбирается в зависимости от технологии сборки и назначения ТП. Обычно принимается $\delta_{ТЗ} \approx 0,2..0,4$ мм и зависит от габаритных размеров каркаса – чем больше габариты каркаса, тем больше $\delta_{ТЗ}$ [4, с.198].

Для предотвращения нарушения изоляции обмоточного провода в процессе намотки на каркас (гильзу) накладывается обычно 1-2 слоя бумаги толщиной по 0,1 мм. Наиболее часто для этой цели используется намоточная, пропиточная или кабельная бумага [4, с.198]. Таким образом, толщину подложки можно принять $\Delta_{01} = 0,1..0,2$ мм. (2 слоя межслоевой или межобмоточной изоляции).

5.2.4.3 Толщину щечек для прессованных и литых каркасов рекомендуется принимать равной толщине каркаса [4, с.198]

$$\Delta h/2 = \Delta_K. \quad (5.3)$$

Для бескаркасных (гильзовых) катушек зазор между торцом катушки и сердечником – изоляционный буртик $\Delta h/2$ зависит от максимальной величины испытательного напряжения и определяется по таблице 5.3.

Таблица 5.3 – Величина зазора между торцом катушки и сердечником

$U_{исп}, В$	≤ 700	1000	1500	2000	2500	3500
$\Delta h/2, мм$	2	2	2,5	3,5	4,5	6

5.2.4.4 Определяют высоту намотки катушки h_K :
для каркасных катушек по формуле (5.4)

$$h_K = h - 2 \cdot \Delta_{КОР}; \quad (5.4)$$

для бескаркасных катушек по формуле (5.5)

$$h_K = h - 2 \cdot (\Delta h/2), \quad (5.5)$$

где h – высота окна сердечника.

5.2.5 Расчет размещения обмоток в окне сердечника

5.2.5.1 Определяется порядок намотки обмоток на катушку.

Намотку обмоток на катушку рекомендуется осуществлять в следующем порядке. Сначала на каркас (гильзу) накладывается 1-2 слоя изоляции для того, чтобы исключить возможное повреждение изоляции обмоточного провода о жесткие ребра каркаса. Затем выполняется намотка первичной обмотки. После наложения необходимой межобмоточной изоляции **укладываются вторичные обмотки в порядке по убывающей мощности.** То есть сначала мотается обмотка с наибольшей мощностью, а последней – с

наименьшей мощностью. Это позволяет увеличить потокосцепление магнитного поля первичной обмотки с витками вторичных обмоток и уменьшить поля рассеяния.

5.2.5.2 Рассчитывают число витков обмоток в одном слое для каждой обмотки по формуле

$$W_{\text{сл.}i} = \frac{h_K}{K_{\text{НЕП.}i} \cdot d_{\text{ИЗ.}i}}, \quad (5.6)$$

где $K_{\text{НЕП.}i}$ – коэффициент неплотности намотки (укладки) провода i -ой обмотки в осевом направлении, определяется по рисунку 5.3 [2, с.103];

$d_{\text{ИЗ.}i}$ – диаметр провода i -ой обмотки в изоляции (см. таблицу 4.1).

Число витков в слое округляется до целого числа **в меньшую сторону**.

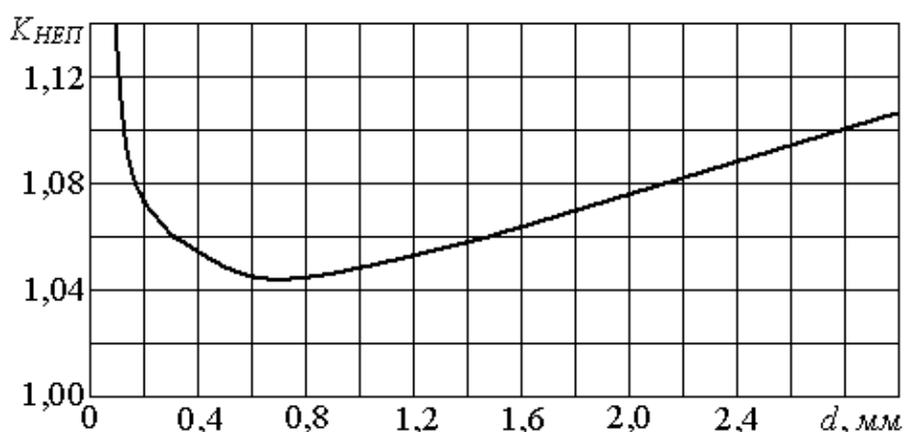


Рисунок 5.3 – Зависимость коэффициента неплотности намотки в осевом направлении от диаметра провода

5.2.5.3 Определяют число слоёв каждой обмотки.

В броневых трансформаторах обмотки размещается на одной катушке, а число слоёв i -ой обмотки рассчитывается по формуле (5.7)

$$n_{\text{сл.}i} = W_i / W_{\text{сл.}i}. \quad (5.7)$$

В стержневых трансформаторах обмотки размещается симметрично на двух катушках, что позволяет свести к минимуму уровень внешних магнитных полей и повысить электромагнитную совместимость ТП с другими радиокомпонентами устройства. Поэтому для стержневых ТП число слоёв рассчитывается по формуле (5.8)

$$n_{\text{сл.}i} = W_i / 2W_{\text{сл.}i}. \quad (5.8)$$

В том случае, когда трансформатор имеет пару или более одинаковых вторичных обмоток, то они попарно размещаются на различных катушках, а расчет числа слоёв в них проводится по формуле (5.7).

Число слоёв в обмотках округляется до целого числа **в большую сторону**, так как последний, даже неполный, слой определяет габаритный размер.

5.2.5.4 Определяют толщину межслоевой изоляции для каждой обмотки.

При рядовой намотке виток к витку толщина межслоевой изоляции $\Delta_{сл.i}$ выбирается не только из условий электрической, но и из условий механической прочности по рисунку 5.4 [4, с.196]. После этого уточняется марка межслоевой изоляции и выбирается **стандартная толщина материала** при округлении в сторону увеличения.

Если диаметр провода не более 0,5 мм, то межслоевую изоляцию можно прокладывать через несколько слоев. Но при этом разность напряжений между крайними рядами не должна превышать 150 В. Однако для спецаппаратуры при высоких требованиях к надежности ТП межслоевую изоляцию прокладывают через каждый слой обмотки. При диаметрах провода более 0,5 мм межслоевая изоляция в любом случае должна прокладываться через каждый слой [2, с.102]. Если провода диаметром более 1,3 мм, то в качестве межслоевой изоляции рекомендуется прокладывать два слоя изоляционного материала с общей толщиной не менее 0,15 мм.

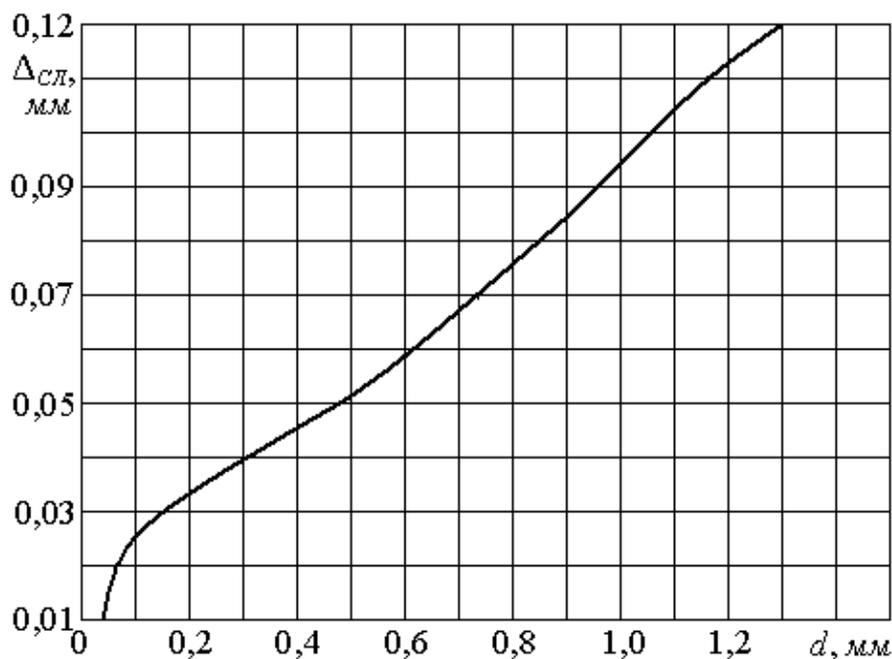


Рисунок 5.4 – Зависимость толщины межслоевой изоляции от диаметра провода

5.2.5.5 Наружная изоляция выбирается в зависимости от назначения ТП и наличия или отсутствия пропитки. При нежестких условиях эксплуатации обычно используется кабельная бумага как при наличии, так и при отсутствии пропитки. Лакоткань или стеклолакоткань применяется лишь при отсутствии пропитки, так как эти материалы негигроскопичны. При жестких условиях эксплуатации и при наличии пропитки и обволакивания рекомендуется использовать стеклоткань. Она хорошо пропитывается и цементирует поверхность катушки.

Толщина наружной изоляции $\Delta_{НАР}$ выбирается из условий электрической и механической прочности. Обычно используется 2-3 слоя выбранного материала или комбинации двух материалов с общей толщиной $\Delta_{НАР} = 0,16..0,30$ мм.

5.2.5.6 Рассчитывают радиальную толщину обмоток C_{O_i}

$$C_{O_i} = [d_{ИЗ.i} \cdot n_{СЛ.i} + \Delta_{СЛ.i} \cdot (n_{СЛ.i} - 1)] \cdot K_{РАЗБ.i}, \quad (5.9)$$

где $K_{РАЗБ.i}$ – коэффициент разбухания i -ой обмотки в радиальном направлении, находится из рисунка 5.4.

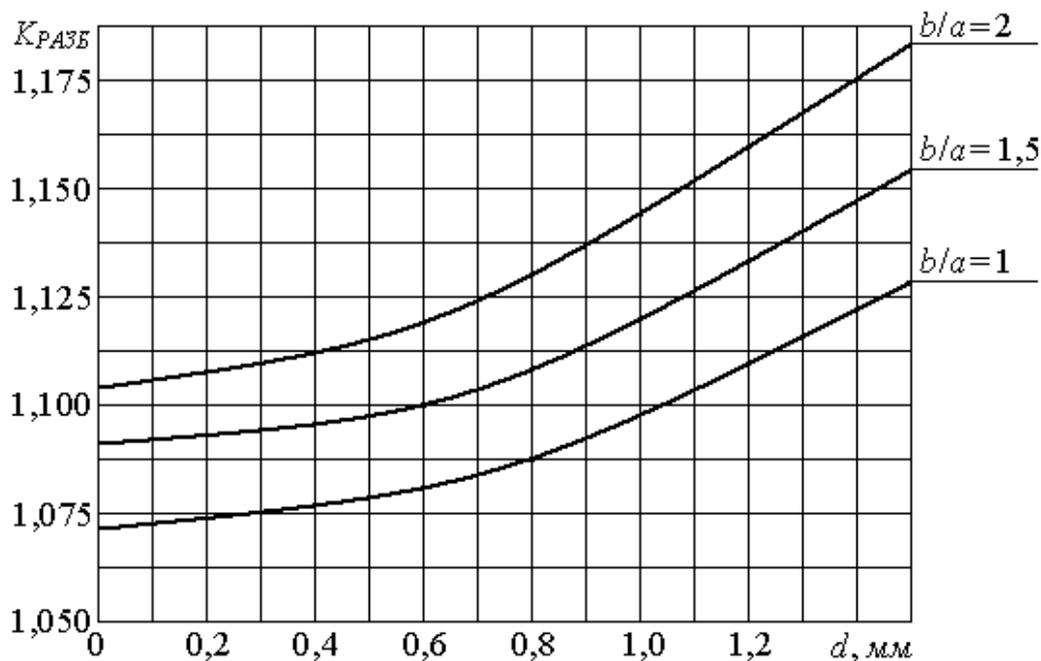


Рисунок 5.4 – Зависимость коэффициента разбухания обмотки в радиальном направлении от диаметра провода

Коэффициент разбухания обусловлен выпучиванием и неплотностью укладки провода в радиальном направлении и зависит как от диаметра провода, так и от соотношения параметров каркаса $x = b/a$. Чем больше соотношение b/a и диаметр провода d , тем больше будет стрела изгиба провода в окне сердечника, то есть тем менее плотно будет провод прилегать к каркасу (гильзе).

5.2.5.7 Определяют полную толщину катушки в окне сердечника C_K

$$C_K = \Delta_{КОР} + C_{O1} + \Delta_{12} + C_{O2} + \Delta_{23} + \dots + C_{On} + \Delta_{НАР}, \quad (5.10)$$

где $\Delta_{КОР}$, $\Delta_{НАР}$ – толщина корпусной и наружной изоляции катушки;

Δ_{12} , Δ_{23} , ... – толщины изоляции между обмотками W_1 и W_2 , W_2 и W_3 и т.д.

5.2.5.8 Определяют величину технологического зазора ΔC_K :

для броневого ТП (см. рисунок 5.1, а) между катушкой и сердечником по формуле (5.11)

$$\Delta C_K = c - C_K; \quad (5.11)$$

для стержневого ТП (см. рисунок 5.1, а) между катушками по формуле (5.12)

$$\Delta C_K = c - 2C_K, \quad (5.12)$$

где c – ширина окна сердечника.

Оптимальным считается зазор $\Delta C_K = 0,5..1,0$ мм [2, с.107]. Если $\Delta C_K < 0,5$ мм, то при укладке катушек в окно сердечника могут возникнуть затруднения. Если $\Delta C_K > 1$ мм, то это указывает на неоптимальный выбор коэффициента заполнения окна обмоткой K_O (занижен), либо на ошибки в предыдущих расчетах. Р.Х. Бальян за оптимальную величину принимает $\Delta C_K = 0,7$ мм [4, с.148], что вполне согласуется с рекомендациями авторов работы [2].

5.3 Конструктивный расчет тороидального трансформатора

5.3.1 Особенности конструкции и выбор методики расчета ТТ

Упрощенная конструкция двухобмоточного тороидального трансформатора (ТТ) приведена на рисунке 5.5.

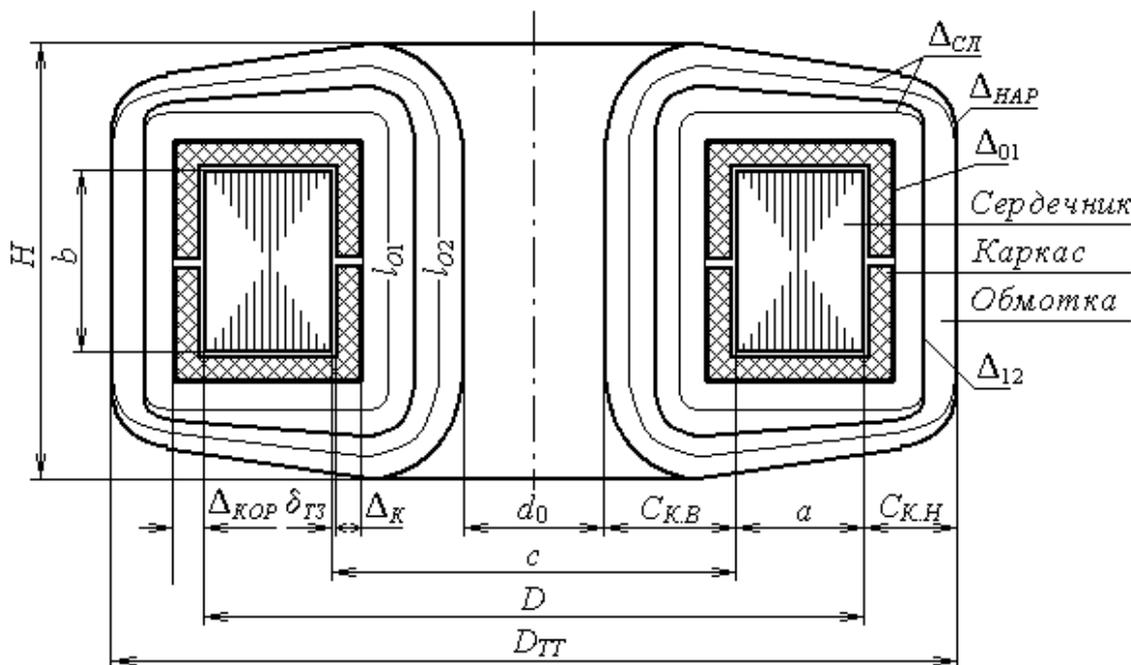


Рисунок 5.5 – Размещение обмоток в окне сердечника ТТ

На рисунке 5.5 введены следующие условные обозначения:

a, b – толщина и ширина сердечника;

c, D – внутренний и наружный диаметры тороидального сердечника;

d_0 – диаметр технологического отверстия;

$C_{К.В.}, C_{К.Н.}$ – внутренняя и наружная радиальная толщина намотки катушки;

$D_{ТТ}, H$ – наружный диаметр и высота тороидального трансформатора;

l_{O1}, l_{O2} – длина среднего витка первичной и вторичной обмоток.

$\delta_{ТЗ}$ – технологический зазор между каркасом и сердечником;

Δ_K – толщина каркаса;

$\Delta_{КОР}$ – толщина корпусной изоляции;

$\Delta_{СЛ}$ – толщина межслоевой изоляции;

Δ_{O1} – толщина изоляции, наложенной на каркас – подложка;

Δ_{12} – толщина межобмоточной изоляции (между первой и второй обмотками);

$\Delta_{НАР}$ – толщина наружной изоляции.

Конструкция катушки ТТ состоит из каркаса, обмоток и изоляционных материалов. Каркас может быть изготовлен из пластмассы путем горячего прессования или литья под давлением, как и каркасы для броневых и стержневых трансформаторов. В этом случае он представляет собой обойму, состоящую из двух одинаковых половинок (изображен на рисунке 5.5). В этом случае толщина каркаса Δ_K и величина технологического зазора $\delta_{ТЗ}$ определяются аналогично, как и для броневых трансформаторов. Кроме того, корпусная изоляция ТТ может быть выполнена путем навивки изоляционной ленты на сердечник с половинным перекрытием с последующей пропиткой лаком или компаундом. Для этой цели используется, лента из стеклоткани, батиста или из других изоляционных материалов. При этом на торцевые части сердечника обычно накладываются кольца из электрокартона толщиной 0,2 мм [3, с.109].

Обмотки в ТТ рекомендуется размещать равномерно по всему периметру сердечника, что позволяет свести к минимуму поля рассеяния и внешние магнитные поля.

Конструктивный расчет размещения обмоток в окне сердечника тороидальных трансформаторов значительно сложнее, чем броневых и стержневых ТП. Это обусловлено, прежде всего, сложностью конструкции катушки. Методики расчета размещения обмоток на сердечнике приведены в работах [2, с.108-113] и [4, с.196-197]. Они основаны на определении числа слоев обмоток с внутренней (в окне) и с наружной стороны сердечника. В результате методики получились весьма сложные, трудоемкие и непрозрачные. Все это затрудняет текущий контроль результатов в процессе расчета, а, следовательно, чревато многочисленными ошибками, особенно у неопытных разработчиков, каковыми являются студенты.

В данном методическом пособии предлагается методика, основанная на последовательном расчете размещения обмоток на тороидальном сердечнике по рядам согласно выбранной последовательности намотки. Межслоевая изоляция в низковольтных тороидальных ТП, как правило, не используется, так как витковая изоляция обмоточных проводов позволяет обеспечить необходимую электрическую прочность [2, с. 109]. Поэтому для упрощения расчетов межслоевую изоляцию учитывать не будем, а толщину корпусной,

межобмоточной и наружной изоляции с наружной стороны и внутри тора будем считать равными.

С учетом выше сказанного, а также того, что в настоящее время при проектировании повсеместно используется вычислительная техника, предлагается весьма простая методика конструктивного расчета ТТ, основанная на последовательном расчете числа витков в слое и простом подсчете числа слоев.

Распределение обмотки с внутренней стороны (в окне) сердечника и снаружи существенно отличается. По внутренней стороне сердечника обмотка укладывается плотно виток к витку, а по наружной стороне – с шагом. Поэтому и расчетные соотношения для расчета размещения обмотки изнутри и снаружи сердечника различные.

На основании рассмотренных выше особенностей конструкции ТТ предлагается следующая методика конструктивного расчета тороидального трансформатора.

5.3.2 Выбор конструкции каркаса и уточнение выбора изоляционных материалов

Выбирается конструкция корпусной изоляции – каркасная или выполненная путем навивки на сердечник изоляционной ленты (бескаркасная). Если выбрана каркасная конструкция, то уточняют марку материала и технологию изготовления каркаса, выбранные ранее в подразделе 2.5. Если корпусная изоляция будет выполняться навивкой ленты, то выбирается марка и толщина изоляционной ленты и колец (шайб), накладываемых на торцы сердечника.

Уточняются или выбираются марки материалов межслоевой, межобмоточной и наружной изоляции.

При расчете по перегреву уточнение изоляционных материалов, как правило, носит формальный характер, то есть выбранные в разделе 2 материалы оставляют без изменения.

5.3.3 Определение испытательных напряжений

Определяют значения испытательных напряжений на обмотках ТТ $U_{исп.i}$ согласно методике, приведенной в пункте 5.2.3.

5.3.4 Определение толщины корпусной изоляции

Если выбрана каркасная конструкция катушки, то толщина корпусной изоляции $\Delta_{КОР}$ и значения толщины каркаса Δ_K , технологического зазора между каркасом и сердечником $\delta_{ТЗ}$ и толщины подложки Δ_{01} определяются по методике, рассмотренной в подпункте 5.2.4.2.

При выборе бескаркасной конструкции катушки корпусная изоляция выполняется путем намотки на сердечник нескольких слоев ленточной изоляции. При этом на торцевые поверхности сердечников накладываются кольцевые прокладки, изготавливаемые из электрокартона или из пластмассы. Толщина корпусной изоляции $\Delta_{КОР}$ таких катушек будет определяться толщиной и количеством слоев выбранной изоляционной ленты и толщиной колец, накладываемых на торцевые поверхности сердечников. При этом толщина корпусной изоляции внутри, снаружи и по торцам сердечника будет различна.

5.3.5 Расчет размещения первичной обмотки в окне сердечника

5.3.5.1 Число витков в n -ом слое первичной (первой) обмотки $W_{СЛ.В.1n}$ определяется последовательно, начиная с первого слоя $W_{СЛ.11}$

$$W_{СЛ.В.1n} = \frac{\pi[d_{В.0} - (2n-1)d_{ИЗ.1}K_{В.1}]}{d_{ИЗ.1}K_{У.1}}, \quad (5.13)$$

где $d_{В.0}$ – диаметр окна обмотки после наложения корпусной изоляции;

K_B и K_U – коэффициенты выпучивания и неплотности укладки провода, определяются приближенно из таблицы 5.4.

$$d_{В.0} = c - 2\Delta_{КОР}, \quad (5.14)$$

где $\Delta_{КОР}$ – толщина корпусной изоляции рассчитывается по формуле

$$\Delta_{КОР} = \Delta_K + \delta_{ТЗ} + \Delta_{01В}. \quad (5.15)$$

Здесь Δ_K – толщина каркаса, зависит от конструкции и материала каркаса, а также от величины испытательного напряжения;

$\delta_{ТЗ}$ – технологический зазор между каркасом и сердечником, зависит от конструкции и материала каркаса – составляет от нуля (при наложении изоляционной ленты на сердечник) до нескольких десятых долей миллиметра;

Δ_{01} – толщина изоляции, наложенной на каркас между каркасом и первым слоем обмотки. Обычно на каркас накладывается 1 слой с половинным перекрытием по ширине ленты [2, 109], то есть будет составлять две толщины изоляционной ленты – $\Delta_{01} = 2 \cdot \Delta_{ИЗ.01}$.

Следовательно, число витков в первом слое ($n = 1$) первичной будет равно

$$W_{СЛ.В.11} = \frac{\pi[d_{В.0} - d_{ИЗ.1}K_{В.1}]}{d_{ИЗ.1}K_{У.1}},$$

Во втором слое ($n = 2$)

$$W_{СЛ.В.12} = \frac{\pi[d_{В.0} - 3d_{ИЗ.1}K_{В.1}]}{d_{ИЗ.1}K_{У.1}} \quad \text{и т.д.}$$

Таблица 5.4 – Ориентировочные значения коэффициентов выпучивания и укладки проводов

$D_{ИЗ}, мм$	Менее 0,12	0,12...0,3	0,31...0,8	0,81...1,56
K_V	1,25	1,2	1,15	1,1
K_B	1,1	1,15	1,2	1,25

5.3.5.2 После расчета числа витков в каждом n -ом слое определяется оставшееся число витков обмотки

$$W_{OCT.B.1n} = W_1 - \sum W_{СЛ.B.1n} . \quad (5.16)$$

Процесс расчета продолжается до тех пор, пока выполняется условие

$$W_{OCT.B.1n} \geq 0. \quad (5.17)$$

5.3.5.3 При этом число внутренних слоев первичной обмотки будет равно

$$n_{СЛ.B.1} = n, \quad (5.18)$$

а число витков в последнем слое будет равно

$$W_{OCT.B.1(n-1)} = W_1 - \sum_1^{n-1} W_{СЛ.B.1(n-1)} . \quad (5.19)$$

5.3.5.4 Определяется толщина межобмоточной изоляции между первой (первичной) второй (первой вторичной) обмотками Δ_{12} . Так как изоляция обмотки внутри тора (в окне сердечника) осуществляется с перекрытием в полширины ленты, то

$$\Delta_{12} = 2m_{ИЗ.12} \cdot \Delta_{ИЗ.12}, \quad (5.20)$$

где $m_{ИЗ.12}$ – число слоев межобмоточной изоляции;

$\Delta_{ИЗ.12}$ – толщина ленты межобмоточной изоляции.

В общем случае толщина межобмоточной изоляции определяется величиной испытательного напряжения и маркой выбранного изоляционного материала. В низковольтных трансформаторах межобмоточная изоляция обычно накладывается в 2 слоя с половинным перекрытием по ширине ленты, а толщина ленты $\Delta_{ИЗ.12}$ выбирается, исходя из величины испытательного напряжения, определенного в пункте 5.3.3.

5.3.5.5 Определяется внутренний диаметр тора $d_{B.1}$ после наложения межслоевой изоляции на первичную обмотку

$$d_{B.1} = d - 2\Delta_{КОР} - 2 \cdot n_{СЛ.B.1} \cdot d_{ИЗ.1} \cdot K_B - 2\Delta_{12}. \quad (5.21)$$

5.3.6 Расчет размещения в окне сердечника вторичных обмоток

Расчет размещения в окне сердечника вторичных обмоток проводится по рассмотренной выше методике.

5.3.6.1 Рассчитывают числа витков в n -ых слоях во второй (первой вторичной) обмотке

$$W_{СЛ.B.2n} = \frac{\pi[d_{B.1} - (2n-1)d_{ИЗ.2}K_{B.2}]}{d_{ИЗ.2}K_{V.2}} . \quad (5.22)$$

5.3.6.2 В каждом цикле определяется оставшееся число витков обмотки

$$W_{OCT.B.2n} = W_2 - \Sigma W_{СЛ.B.2n} . \quad (5.23)$$

Процесс расчета продолжается до тех пор, пока выполняется условие

$$W_{OCT.B.2n} \geq 0. \quad (5.24)$$

5.3.6.3 Определяется число слоев второй обмотки

$$n_{СЛ.B.2} = n. \quad (5.25)$$

и число витков в последнем слое вторичной обмотки

$$W_{OCT.B.2(n-1)} = W_2 - \sum_1^{n-1} W_{СЛ.B.2(n-1)} . \quad (5.26)$$

5.3.6.4 Определяется толщина межобмоточной изоляции Δ_{23} .

$$\Delta_{23} = 2m_{ИЗ.2} \cdot \Delta_{ИЗ.2}. \quad (5.27)$$

5.3.6.5 Определяется внутренний диаметр тора $d_{ВН.2}$ после наложения межслоевой изоляции на вторую обмотку

$$d_{B.2} = d_{B.1} - 2 \cdot n_{СЛ.B.2} \cdot d_{ИЗ.2} \cdot K_{B.2} - 2\Delta_{23}. \quad (5.28)$$

5.3.6.6 Аналогично по приведенной методике рассчитывается размещение в окне сердечника остальных вторичных обмоток трансформатора.

5.3.6.7 На заключительном этапе после укладки последней обмотки рассчитывается толщина наружной изоляции $\Delta_{НАР}$

$$\Delta_{НАР} = 2m_{ИЗ.Н} \cdot \Delta_{ИЗ.Н}, \quad (5.29)$$

где $m_{ИЗ.Н}$ – число слоев наружной изоляции;

$\Delta_{ИЗ.Н}$ – толщина ленты наружной изоляции.

В низковольтных трансформаторах наружная изоляция накладывается обычно в 2-3 слоя с перекрытием в полширины ленты, то есть $m_{ИЗ.Н} = 2-3$, а толщина ленты $\Delta_{ИЗ.Н}$ выбирается, исходя из величины испытательного напряжения и из условий механической прочности. Она, как правило, толще и прочнее межобмоточной изоляции.

5.3.7 Расчет диаметра технологического отверстия

5.3.7.1 Диаметр технологического отверстия рассчитывается после укладки последней обмотки и наложения наружной изоляции по формуле

$$d_0 = d_{B.i} = d_{B,i-1} - 2 \cdot n_{СЛ.B.i} \cdot d_{ИЗ.i} \cdot K_{B.i} - 2\Delta_{НАР}, \quad (5.30)$$

где $d_{B,i-1}$ – внутренний диаметр тора после укладки предпоследней обмотки;

$n_{СЛ.B.i}$, $d_{ИЗ.i}$, $K_{B.i}$ – число слоев, диаметр провода в изоляции и коэффициент выпучивания последней i -ой обмотки.

5.3.7.2 Допустимый диаметр технологического отверстия $\delta_{ТТ}$ должен быть на 1-2 мм больше проходного диаметра намоточного станка [2, с.112]. В отсутствии информации о технических характеристиках намоточного станка он может быть рассчитан ориентировочно по формуле (5.57) из [4, с.148]

$$\delta_{ТТ} = \sqrt{\frac{c^2 + 2bc}{1 + 4c}} . \quad (5.31)$$

5.3.7.3 Проверяются условия

$$d_0 - \delta_{TT} \geq 1 \text{ мм.} \quad (5.32)$$

$$\frac{d_0 - \delta_{TT}}{\delta_{TT}} \leq \varepsilon_{TT} \quad , \quad (5.33)$$

где ε_{TT} – допустимый запас по технологическому отверстию. Эта величина выбирается исходя из требований к ТЭП. При жестких требованиях к ТЭП она не превышает 5...10 %, то есть $\varepsilon_{TT} = 0,05...0,10$.

Если условия (5.32) и (5.33) выполняются, то расчет продолжается.

Если условие (5.32) не выполняется, то уменьшается соотношение K_O/K_{OT} (уменьшается коэффициент заполнения окна обмоткой K_O , так как $K_{OT} = K_{OK} = \text{const}$) и весь расчет ТП повторяется, начиная с раздела 3.

Если условие (5.32) выполняется, а условие (5.33) не выполняется, то соотношение K_O/K_{OT} увеличивается (увеличивается коэффициент заполнения K_O) и весь расчет ТП повторяется, начиная с раздела 3.

Таким образом осуществляется оптимизация ТЭП трансформатора – выбирается минимальный типоразмер сердечника и определяются оптимальные значения плотностей тока в обмотках, то есть выбираются оптимальные значения диаметров первичной и вторичных обмоток.

5.3.8 Расчет размещения обмоток на наружной стороне сердечника

Очевидно, что число слоев обмоток с наружной стороны будет существенно меньше, так как внешний диаметр сердечника значительно больше внутреннего.

5.3.8.1 Число витков в j -ом наружном слое первичной (первой) обмотки рассчитывается по формуле

$$W_{СЛ.Н.1j} = \frac{\pi [D_{H.0} + 2(j-1)d_{ИЗ.1}K_{B.1}]}{d_{ИЗ.1}K_{V.1}} \quad , \quad (5.34)$$

где $D_{H.0}$ – наружный диаметр сердечника с корпусной изоляцией

$$D_{H.0} = D + 2\Delta_{КОР}, \quad (5.35)$$

5.3.8.2 В процессе расчета числа витков в каждом цикле проверяется условие

$$W_1 \geq \Sigma W_{СЛ.Н.1j}. \quad (5.36)$$

5.3.8.3 Если условие (5.36) не выполняется, то расчет завершается. При этом число наружных слоев обмотки будет равно

$$n_{СЛ.Н.1} = j. \quad (5.37)$$

5.3.8.4 Определяется внешний диаметр тора $D_{H.1}$ после наложения межслоевой изоляции на первичную обмотку

$$D_{H.1} = D_{H.0} + 2 \cdot n_{СЛ.Н.1} \cdot d_{ИЗ.1} \cdot K_{B.1} + 2\Delta_{I2}. \quad (5.38)$$

5.3.8.5 Аналогично проводится расчет числа слоев вторичных обмоток

$$W_{СЛ.Н.ij} = \frac{\pi[D_{H.(i-1)} + 2(j-1)d_{ИЗ.i}K_{B.i}]}{d_{ИЗ.i}K_{Y.i}} \quad (5.39)$$

5.3.8.6 В каждом цикле проверяются условия

$$W_i \geq \Sigma W_{СЛ.Н.ij} \quad (5.40)$$

5.3.8.7 Если условие (5.40) не выполняется, то определяется число наружных слоев i -ой обмотки как равное числу циклов

$$n_{СЛ.Н.i} = j. \quad (5.41)$$

5.3.8.8 Определяется внешний диаметр тора $D_{H.i}$ после наложения межслоевой изоляции на очередную обмотку

$$D_{H.i} = D_{H.(i-1)} + 2 \cdot n_{СЛ.Н.i} \cdot d_{ИЗ.i} \cdot K_{B.i} + 2\Delta_{i,(i+1)}, \quad (5.42)$$

5.3.8.9 После размещения на сердечнике последней обмотки и наложения наружной изоляции $\Delta_{H,НАР} \approx \Delta_{B,НАР}$ рассчитывается наружный диаметр ТТ

$$D_{ТТ} = D_{НАР} = D_{НАР.N} - 2\Delta_{N,(N+1)} + 2\Delta_{H,НАР}. \quad (5.43)$$

Здесь индекс N – число обмоток в трансформаторе ($i = N$).

5.3.9 Расчет длины среднего витка обмоток

5.3.9.1 Длину среднего витка первичной (первой) обмотки можно рассчитать по следующей формуле

$$l_{O1} = 2 \left[b + 2 \Delta_{КОР} + \sqrt{(a + 2 \Delta_{КОР})^2 + (R_{B.1} - R_{H.1})^2} \right] + \pi(R_{B.1} + R_{H.1}), \quad (5.44)$$

где $R_{B.1} = n_{СЛ.В.1} \cdot d_{ИЗ.1} \cdot K_{B.1} / 2$; $R_{H.1} = n_{СЛ.Н.1} \cdot d_{ИЗ.1} \cdot K_{B.1} / 2$. (5.45)

5.3.9.2 Длина среднего витка последующих (вторичных) обмоток будет равна

$$l_{Oi} = 2 \left[b + 2 \Delta_{КОР} + \sqrt{(a + 2 \Delta_{КОР})^2 + (R_{B.i} - R_{H.i})^2} \right] + \pi(R_{B.i} + R_{H.i}), \quad (5.46)$$

где $R_{B.i} = R_{B.(i-1)} + \Sigma \Delta_{(i-1),i} + n_{СЛ.В.i} \cdot d_{ИЗ.i} \cdot K_{B.i} / 2$; (5.47)

$$R_{H.i} = R_{H.(i-1)} + \Sigma \Delta_{(i-1),i} + n_{СЛ.Н.i} \cdot d_{ИЗ.i} \cdot K_{B.i} / 2. \quad (5.48)$$

5.3.10 Расчет геометрических параметров трансформатора

Определяются внутренняя $C_{К.В}$ и наружная $C_{К.Н}$ радиальная толщина намотки катушки

$$C_{К.В} = (c - d_0) / 2, \quad C_{К.Н} = (D_{ТТ} - D) / 2. \quad (5.49)$$

Высота намотки катушки – высота трансформатора будет равна

$$H = b + 2 \cdot C_{К.В}. \quad (5.50)$$

Габаритный объем трансформатора

$$V_T = D_{ТТ}^2 \cdot H. \quad (5.51)$$

5.4 Расчет толщины влагозащитного покрытия

При жестких условиях эксплуатации (высокая влажность, агрессивная среда, наличие грибковых образований) рекомендуется для дополнительной защиты изоляции и обмоток применять обволакивание катушки или всего

трансформатора терморезистивными компаундами. Поэтому в заключение конструктивного расчета необходимо окончательно определиться с выбором материалов пропитки катушки и обволакивания и рассчитать необходимую толщину обволакивания.

Толщину влагозащитного покрытия можно рассчитать по методике, предложенной в работе [11].

$$\Delta_{\text{ПОКР}} = \sqrt{\frac{\tau \cdot D_{\text{ДИФ}}}{-\ln \frac{P_3 - P_{\text{КР}}}{2(P_3 - P_0)}}}, \quad (5.52)$$

где $\Delta_{\text{ПОКР}}$ – толщина влагозащитного покрытия, см;

τ – срок службы дросселя, ч;

$D_{\text{ДИФ}}$ – коэффициент диффузии материала покрытия, см²/ч, является справочной величиной. Для некоторых материалов значения коэффициентов диффузии приведены в работе [11];

P_3 – парциальное давление водяных паров при максимальной влажности, заданной в ТЗ, мм рт.ст (Па);

$P_{\text{КР}}$ – критическое значение парциального давления водяных паров внутри покрытия, мм рт.ст (Па). Для точечных изделий в качестве критических условий принимаем: относительную влажность $ОВ = 90\%$ при температуре $t = 30\text{ }^\circ\text{C}$;

P_0 – парциальное давление водяных паров в условиях консервации, мм рт.ст (Па). Для точечных изделий в качестве условий консервации принимаем: относительную влажность $ОВ = 5\%$ при температуре $t = 20\text{ }^\circ\text{C}$.

Значения парциальных давлений водяных паров в конкретных условиях P_i определяются по формуле

$$P_i = P \cdot ОВ_i / 100\%, \quad (5.34)$$

где P – парциальное давление насыщенных водяных паров при определенной температуре, определяется по таблице 5.5;

$ОВ_i$ – относительная влажность, при которой определяется парциальное давление, % (максимальная влажность по условиям эксплуатации).

Таблица 5.5 – Значения парциальных давлений насыщенных водяных паров P при различных температурах t

$t, \text{ }^\circ\text{C}$	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
$P, \text{ мм рт.ст.}$	6,54	9,20 5	12,2 7	17,0 6	23,7 6	31,8 3	42,1 8	55,3 4	71,9 0	92,56

6 УТОЧНЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПАРАМЕТРОВ И РАСЧЕТ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

6.1 Уточнение электромагнитных параметров трансформатора

6.1.1 Находят сопротивления обмоток по формуле

$$r'_i = \rho_{20} \cdot K_H \cdot \frac{W'_i \cdot l_{O_i}}{Q_{ПР.i}} \quad (6.1)$$

где W_i – число витков i -ой обмотки;

l_{O_i} – длина среднего витка i -ой обмотки;

$q_{ПР.i}$ – сечение провода i -ой обмотки;

Длина среднего витка i -ой обмотки для броневых и стержневых трансформаторов рассчитывается по формуле

$$l_{O_i} = 2 \cdot (a + b + 2 \cdot \Delta_{КОР}) + 2 \cdot \pi \cdot R_i \quad (6.2)$$

где R_i – расстояние от корпусной изоляции катушки до середины i -й обмотки. Так, например:

для первичной обмотки (W_1) $R_1 = C_{O1}/2$;

для первой вторичной обмотки (W_2) $R_2 = C_{O1} + \Delta_{12} + C_{O2}/2$;

для второй вторичной обмотки (W_3) $R_3 = C_{O1} + \Delta_{12} + C_{O2} + \Delta_{23} + C_{O3}/2$ и

т.д.

Здесь C_{O1} , C_{O2} , C_{O3} и т.д. – радиальная толщина намотки соответствующих обмоток; Δ_{12} , Δ_{23} – толщина межобмоточной изоляции между соответствующими обмотками.

Для тороидальных трансформаторов длину среднего витка i -ой обмотки рассчитывают согласно методике, приведенной в пункте 5.3.9.

6.1.2 Уточняют величину ЭДС E_1 по формуле

$$E_1 = U_1 - (I'_{PAE} + I'_{0A}) \cdot r'_1 \quad (6.3)$$

6.1.3 Уточняют число витков обмоток:

для первичной обмотки

$$W_1 = W'_1 \cdot \frac{E_1}{E'_1} \quad (6.4)$$

для вторичных обмоток

$$W_{2i} = \frac{W'_{2i} \cdot U_{2i}}{(E'_1 \cdot W'_{2i} / W'_1) - I_{2i} \cdot r'_{2i}} \quad (6.5)$$

После уточнения числа витков всех обмоток округляется до целого числа. Если число витков некоторых обмоток небольшое по сравнению с другими обмотками, то допускается округление до 1/2 витка. Округлять числа витков желательно в одну сторону, что позволяет уменьшить ошибку в коэффициентах трансформации по каждой вторичной обмотке.

6.1.4 Уточняют сопротивления первичной и вторичных обмоток

$$r_1 = r_1' \cdot \frac{W_1}{W_1'} \quad , \quad r_{2i} = r_{2i}' \cdot \frac{W_{2i}}{W_{2i}'} \quad (6.6)$$

6.1.5 Уточняются токи первичной обмотки:

$$I_{РАБ} = \sum_{i=1}^n K_{Bi} \cdot I_{2i} \cdot \frac{W_{2i}}{W_1} \quad , \quad (6.7)$$

$$I_{0A} = F_C / E_1 \quad , \quad (6.8)$$

$$I_{0P} = I_{0P}' \cdot \frac{W_1}{W_1'} \quad , \quad (6.9)$$

$$I_1 = \sqrt{(I_{РАБ} + I_{0A})^2 + (I_{0P})^2} \quad . \quad (6.10)$$

6.1.6 Определяют потери в обмотках:

потери от активного тока

$$P_{OA} = (I_{РАБ} + I_{0A})^2 \cdot r_1 + \sum_1^n I_{2i}^2 \cdot r_{2i} \quad ; \quad (6.11)$$

полные активные потери

$$P_O = P_{OA} + I_{0P}^2 \cdot r_1 \quad . \quad (6.12)$$

6.1.7 Уточняется рабочая индукция в сердечнике

$$B = \frac{E_1}{4.44 f \cdot W_1 \cdot Q_C \cdot K_C} \quad . \quad (6.13)$$

6.1.8 Уточняются активные потери в сердечнике по формуле (4.1).

6.1.9 Уточняют соотношение потерь в сердечнике и в обмотках

$$\nu = P_C / P_O \quad . \quad (6.14)$$

6.1.10 Уточняют расчетный параметр B (см. формулу (4.6))

$$B = 1 + m_1 \beta \cdot \sqrt{\frac{\nu + 0,6}{1 + 0,2 \cdot \nu \cdot \beta}} \quad . \quad (6.15)$$

6.1.11 Уточняют коэффициент Γ .

Для броневых и стержневых ТП, исполняемых в виде сухих открытых конструкций, не имеющих специальных защитных покрытий типа обволакивания компаундами, капсулирования и т.п., коэффициент Γ выбирается из таблицы В.5.

При наличии обволакивания термореактивными компаундами значение коэффициента Γ принимают равным $\Gamma \approx 1,2 \dots 1,3$ в зависимости от толщины защитного покрытия.

Для тороидальных трансформаторов значение коэффициента Γ на заключительном этапе уточняется по формуле

$$\Gamma = 1 + \frac{\alpha}{\lambda} C_K \frac{\nu + 0,5}{\nu + 1} \quad , \quad (6.16)$$

где λ - эквивалентный коэффициент теплопроводности катушки. При наличии обволакивания термореактивными компаундами значение коэффициента λ принимают равным $\lambda \approx (0,03 \dots 0,06) \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ в зависимости от толщины защитного покрытия.

6.1.12 Определяют максимальный перегрев обмоток трансформатора по формуле

$$\tau_m = \frac{(P_C + P_O) \cdot \Gamma}{\alpha \cdot B \cdot S_0} \quad , \quad (6.17)$$

Здесь коэффициент α рассчитывается по формуле (6.17)

$$\alpha = \alpha_0 \cdot \sqrt[4]{\frac{\tau'_m}{50}} \cdot \sqrt[6]{\frac{0,05}{h_K}} \cdot (1 - \Delta\alpha) \quad , \quad (6.18)$$

где τ'_m – предварительное значение максимальной температуры перегрева. При расчете по падению напряжения равно значению τ'_m , полученное в пункте 4.1.4. При расчете по перегреву τ'_m принимается равной температуре перегрева, заданной в ТЗ;

h_K – высота катушки, м;

$\Delta\alpha$ – относительное уменьшение коэффициента теплоотдачи (см. пункт 4.1.4).

6.1.13 Рассчитывается фактическое падение напряжения δU_P

$$\delta U_P = \frac{P_{OA}}{P_T + P_{OA}} \quad , \quad (6.19)$$

где P_T – габаритная мощность ТП.

6.1.14 Проводится сравнение расчетных значений τ_m и δU_P с заданными в ТЗ. Если расчетные значения больше заданных в ТЗ, то либо допущена ошибка в расчетах, либо в разделе 3 выбран заниженный типоразмер сердечника. В таком случае необходимо исправить допущенные ошибки и продолжить расчет.

6.1.15 Определяют ток холостого хода

$$I_{XX} = \sqrt{I_{0A}^2 + I_{0P.XX}^2} \quad , \quad (6.20)$$

где $I_{0P.XX}$ – величина реактивной составляющей тока намагничивания при отсутствии нагрузки, рассчитывается по формуле (4.11) при индукции холостого хода

$$B_{XX} = B \cdot \frac{U_1}{E_1} \quad . \quad (6.21)$$

6.2 Расчет технико-экономических показателей трансформатора

6.2.1 Определяется масса обмоточных проводов G_K

$$G_K = \gamma_O \cdot \sum_{i=1}^N l_{Oi} \cdot W_i \cdot q_{ПР.i} \quad , \quad (6.22)$$

где γ_O – удельная плотность материала обмоток;

l_{Oi} – длина среднего витка i -ой обмотки;

W_i – число витков i -ой обмотки;

$q_{ПР.i}$ – сечение стандартного провода i -ой обмотки (см. таблицу 4.1).

6.2.2 Определяется масса основных материалов трансформатора

$$G_T = G_C + G_K \quad , \quad (6.23)$$

где G_C – масса выбранного оптимального типоразмера сердечника (см. таблицу 3.2).

6.2.3 Рассчитывается стоимость обмоточных проводов Π_K

$$\Pi_K = \gamma_O \cdot \sum_{i=1}^N l_{O_i} \cdot W_i \cdot Q_{IP,i} \cdot u_{0i} \quad , \quad (6.24)$$

6.2.4 Рассчитывается стоимость материала сердечника Π_C

$$\Pi_C = G_C \cdot u_C, \quad (6.25)$$

В формулах (6.24) и (6.25) γ_O – удельная плотность материала проводов; $u_{IP,i}$ и u_C – цены обмоточного провода i -ой обмотки и материала сердечника – справочные величины (см. пункт 3.4.4).

6.2.5 Определяется стоимость основных материалов трансформатора Π_T

$$\Pi_T = \Pi_C + \Pi_K. \quad (6.26)$$

6.2.6 Определяют габаритные размеры трансформатора по формулам:

а) для броневых трансформаторов

$$A = 2(a + c), \quad B = b + 2C_K, \quad H = a + h; \quad (6.27)$$

б) для стержневых трансформаторов

$$A = 2(a + C_K) + c, \quad B = b + 2C_K, \quad H = 2a + h; \quad (6.28)$$

в) для тороидальных трансформаторов параметры

$$A = B = D_{TT}, \quad (6.29)$$

$$H = b + 2 \cdot C_{K,B}, \quad (6.30)$$

где D_{TT} – наружный диаметр ТТ рассчитывается по формуле (5.43) (см. пункт 5.3.8);

$C_{K,B}$ – внутренняя радиальная толщина намотки катушки ТТ рассчитывается по формуле (5.49) (см. пункт 5.3.10).

6.2.7 Габаритный объем V_T всех типов трансформаторов рассчитывается по формуле

$$V_T = A \cdot B \cdot H. \quad (6.31)$$

ОСНОВНАЯ РЕКОМЕНДОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- 1 Кузевных Н.И. Перспективная элементная база РЭС. Ч.2. Функциональные устройства РЭС: Учебное пособие для студентов специальности 210201 “Проектирование и технология РЭС”. – Томск: ТУСУР, 2007. – 205 с.
- 2 Белопольский И.И. и др. Расчет трансформаторов и дросселей малой мощности. – М.: Энергия, 1973. – 400 с.
- 3 Каретникова Е.И. и др. Трансформаторы питания и дроссели фильтров РЭА. – М.: Сов. радио, 1973. – 180 с.
- 4 Бальян Р.Х. Трансформаторы для радиоэлектроники. – М.: Сов. радио, 1971. – 720 с.
- 5 Майер А.К. Трансформатор питания: Методические указания по выполнению курсового проекта. – Томск: Ротапринт ТИАСУР, 1990. – 83 с.
- 6 Справочник по электротехническим материалам / Под ред. Ю.В. Корицкого и др. Т.2. – М.: Энергоатамиздат, 1987. – 464 с.
- 7 Справочник по электротехническим материалам / Под ред. Ю.В. Корицкого и др. Т.3. – Л.: Энергоатамиздат, 1988. – 728 с.
- 8 Электротехнический справочник / Под ред. профессоров МЭИ. Т.1. – М.: Энергия, 1980. – 520 с.
- 9 Масленников М.Ю., Соболев Е.А. и др. Справочник разработчика и конструктора РЭА. Кн.1 и 2. – М.: Энергоатомиздат, 1993. – 299 с.
- 10 Кузевных Н.И. Курсовое проектирование: Методическое пособие для студентов специальности 210201. – Томск: ТУСУР, 2007. – 37 с.
- 11 Козлов В.Г. Практикум по тепломассообмену в РЭА. – Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1980. – 74 с.
- 12 Гольдштейн Е.И., Майер А.К. Индуктивно-емкостные сглаживающие фильтры. – Томск: Изд-во ТГУ, 1982. – 222 с.
- 13 Расчет электромагнитных элементов источников вторичного электропитания / А.Н. Горский, Ю.С. Русин и др. – М.: Радио и связь, 1988. – 176 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А
(справочное)

ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА ПЛАСТМАСС ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КАРКАСОВ, ГИЛЬЗ И ОБОЙМ

Таблица А.1 – Основные свойства термопластов

Марка материала, ГОСТ, ТУ	Основные свойства	Интервал рабочих температур. Класс нагревостойкости	Методы переработки
Поликарбонат модифицированный: ПК-М-1, ПК-М-2, ТУ 6-05-211-985-82	Высокие изоляционные свойства. Повышенные диэлектрические свойства и ударная вязкость, нагревостойкость. У ПК-М-1 – тропикостойкость ТС, у ПК-М-2 – самозатухание	–100...+140 °С. Кл. Е	Литье под давлением
Фторопласт-2М: А,Ж, ТУ 6-05-1781-84	Высокие изоляционные свойства, эластичность, атмосферостойкость, тропикостойкость Т	–60...+145 °С. Кл. В	Литье под давлением, экструзия, прессование
Фторопласт-3: А,Б,В, ГОСТ-13744-76	Высокие изоляционные свойства, химо-, водо-, дуго- и трекинговостойкость. Тропикостойкость Т	–195...+130 °С. Кл. В	
Фторопласт-3М: А,Б, ТУ 6-05-1812-77	Высокие изоляционные свойства, дуго- и трекинговостойкость. Негорюч. Тропикостойкость Т	–195...+130 °С. Кл. В	
Полиамид стеклонаполненный: ПА6-210-ДС, ПА6-211-ДС,	Высокие изоляционные свойства. Повышенные прочностные и диэлектрические свойства, нагревостойкость	–50...+120 °С. Кл. А	Литье под давлением, экструзия
ПА66-ДС, ПА610-ДС, ГОСТ 17648-83		–50...+150 °С. Кл. Е	

ПА610-Л-СВ30, ОСТ 6-05-408-85		-50...+120 °С. Кл. А	
----------------------------------	--	-------------------------	--

Окончание таблицы А.1

Марка материала, ГОСТ, ТУ	Основные свойства	Интервал рабочих температур. Класс нагревостойкости	Методы переработки
<u>Композиции полифенилоксида:</u> арилак 100, ТУ 6-05-231-319-82;	Высокие изоляционные и диэлектрические свойства. Хорошие прочностные свойства, нагревостойкость	-60...+120 °С. Кл. А	Литье под давлением, экструзия
арилак 101, ТУ 6-05-231-323-83;			
арилак 2101, ТУ 6-05-231-321-83;			
арилак 2102Э, 2102Э, ТУ 6-05-231-307-85			
Полиалканимид АИ-1Г, ТУ 6-05-211-1330-83	Высокие изоляционные и хорошие диэлектрические свойства. Повышенные нагревостойкость, водо-, химостойкость	-60...+130 °С. Кл. Е	Литье под давлением, экструзия
Полиалканимид стеклонаполненный АИ-ЭК-1, ТУ 6-05-211-1158-81	Высокие изоляционные свойства. Повышенные по сравнению с АИ-1Г прочность при растяжении, нагревостойкость, износостойкость	-60...+150 °С. Кл. F	
Полиарилат: ДВ-101, ТУ 6-05-211-369-76;	Высокие изоляционные и диэлектрические свойства, ударная вязкость, нагрево-,	-100...+150 °С. Кл. F	Литье под давлением,

ДВ-105, ДВ-106, ТУ 6-05-211-422-80	химостойкость.	-100...+165 °С. Кл. F	экструзия
---------------------------------------	----------------	--------------------------	-----------

Таблица А.2 – Основные свойства реактопластов

Марка материала, ГОСТ, ТУ	Основные свойства	Интервал рабочих температур. Класс нагревостойкости	Исходный материал, цвет	Методы переработки
<u>Фенопласты электроизоляционные:</u> Э1-340-02 (К-211-2), ГОСТ 5689-79	Удовлетворительные прочностные, высокие изоляционные и хорошие диэлектрические свойства, снижающиеся во влажной атмосфере	-60...+110 °С. Кл. А	Пресс-порошок, коричневый	Прямое или литьевое прессование
Э15-121-02, ГОСТ 5689-79	Повышенные прочностные и диэлектрические свойства. Высокие изоляционные свойства		Пресс-порошок, черный	
Э25-914-17, ТУ 6-05-031-490-77	Высокие прочностные, изоляционные и диэлектрические свойства, водостойкость. Тропикостойкость Т		Пресс-порошок, коричневый	Прямое прессование
<u>Фенопласты ударопрочные:</u> АГ-4В, АГ-4В-10,	Высокие прочностные и изоляционные свойства, нагрево-, химо-, водостойкость. Тропикостойкость Т	-196...+200 °С. Кл. В	Стекловолокнит, желтый	Прямое или литьевое прессование
АГ-4С, АГ-4НС, ГОСТ 20437-75;	Высокие прочностные и изоляционные свойства, водо-, нагревостойкость. Тропикостойкость Т		Стеклолента, желтый	термообработка
СГ-160-Р-2Ц-2, СГ-320-Р-2Ц-2, СГ-1280-Р-2Ц-2, ТУ 6-11-287-78	Высокие прочностные и изоляционные свойства. Хорошие диэлектрические свойства	-60...+200 °С. Кл. В	Гранулы длиной 10-20 мм, желтый	Прямое или литьевое прессование
П-3-1, ТУ 84-571-75	Повышенные прочностные и изоляционные свойства. Удовлетворительные диэлектрические	-60...+130 °С. Кл. В	Стекловолокнистая масса	Прессование, термообработка

свойства		отка		
Продолжение таблицы А.2				
Марка материала, ГОСТ, ТУ	Основные свойства	Интервал рабочих температур. Класс нагревостойкости	Исходный материал, цвет	Методы переработки
<u>Фенопласты литьевые:</u> Э24-122-02, ТУ 6-05-1892-80;	Высокие диэлектрические и изоляционные свойства, водостойкость. Устойчив к вибрации и ударным нагрузкам	-60...+100 °С. Кл. А	Пресс-порошок, черный	Литье под давлением
Э28-0118-81, ТУ 6-05-1892-80;	Высокие изоляционные и повышенные прочностные и диэлектрические свойства. Высокая нагрево- и водостойкость	-60...+200 °С. Кл. В	Пресс-порошок, голубой-зеленый	
ВГС-18, ТУ 6-11-15-8-76	Высокие изоляционные и повышенные прочностные и диэлектрические свойства. Тропикостойкость ТС	-60...+200 °С. Кл. В	Стекловолокно, нит, коричневый	Литье под давлением, термообработка
<u>Пресс-материалы диаллилфталатные:</u> ДАФ-С2, ТУ 11 БУО.023.009ТУ-83;	Высокие изоляционные и хорошие прочностные и диэлектрические свойства, сохраняющиеся при длительной эксплуатации. Тропикостойкость Т	-60...+180 °С. Кл. F	Гранулы	Прямое и литьевое прессование, термообработка
ДАФ-СЛ, ТУ 11 БУО.023.059ТУ-82;	Хорошие прочностные и высокие изоляционные и диэлектрические свойства, нагревостойкость	-60...+200 °С. Кл. F	Гранулы, коричневый	Литье под давлением, термообработка
ДАФ-ДЛ, ТУ 11	Высокие изоляционные и	-60...+170 °С.	Гранулы,	Литье под

БУО.023.018ТУ-82;	диэлектрические и хорошие прочностные свойства. Повышенная стабильность размеров	Кл. F	темно-коричневый	давлением
-------------------	--	-------	------------------	-----------

Окончание таблицы А.2

Марка материала, ГОСТ, ТУ	Основные свойства	Интервал рабочих температур. Класс нагревостойкости	Исходный материал, цвет	Методы переработки
<u>Пресс-материалы диаллилизифталатные:</u> ДАИФ-С1, ДАИФ-С2А, ДАИФ-С2Г, ТУ 11 БУО.023.008ТУ-83;	Высокие изоляционные и хорошие прочностные и диэлектрические свойства, сохраняющиеся при длительной эксплуатации. Тропикостойкость Т	-60...+200 °С. Кл. F	Жгуты или комки неопределенной формы, оранжевый	Прямое и литьевое прессование, термообработка
ДАИФ-СЛ, ТУ 11 БУО.023.071ТУ-79;	Повышенные прочностные и диэлектрические свойства, нагрево- и водостойкость. Тропикостойкость Т	-60...+200 °С. Кл. F	Гранулы, темно-коричневый	Литьевое прессование, термообработка
ДФП, ТУ 11 БУО.023.057ТУ-83	Повышенные прочностные свойства и электрическая прочность. Более технологичный	-60...+125 °С. Кл. В	Пресс-порошок, розовый	Прямое прессование
<u>Пресс-материалы кремнийорганические:</u> ПКО-1-1-1 (КФ-9), ОСТ 6-05-445-79;	Высокие изоляционные свойства. Повышенные дуго-, нагревостойкость. Стабильность диэлектрических свойств. Тропикостойкость Т	-60...+250 °С. Кл. Н	Крупнозернистый порошок, кремовый	Прямое и литьевое прессование, термообработка
ПКО-1-1-2 (КФ-9П), ОСТ 6-05-445-79;	Отличается от ПКО-1-1-1 повышенной ударной вязкостью. Тропикостойкость Т		Плоские кусочки,	термообработка

			кремовый	
ПКО-1-1-3 (КФ-10), ОСТ 6-05-445-79;	Высокие изоляционные свойства. Повышенные дуго-, нагревостойкость. Тропикостойкость Т		Гранулы или волокна	

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

(справочное)

ОБМОТОЧНЫЕ МЕДНЫЕ ПРОВОДА С ЭМАЛЕВОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ

Таблица Б.1 – Параметры проводов, разработанных до 1987 г.

Диаметр провода без изоляции, мм	Сечение провода по меди, мм ²	Диаметр провода с изоляцией, мм		Диаметр провода без изоляции, мм	Сечение провода по меди, мм ²	Диаметр провода с изоляцией, мм	
		ПЭВ-1 ПЭМ-1, ПЭВТЛ-1	ПЭВ-2, ПЭТВ, ПЭТ-155, ПЭВТЛ-2			ПЭВ-1 ПЭМ-1, ПЭВТЛ-1	ПЭВ-2, ПЭТВ, ПЭТ-155, ПЭВТЛ-2
0,06	0,00283	0,085	0,09	0,67	0,353	0,72	0,75
0,07	0,00385	0,095	0,10	0,69	0,374	0,74	0,77
0,08	0,00503	0,105	0,11	0,72	0,407	0,77	0,80
0,09	0,00636	0,115	0,12	0,74	0,430	0,80	0,83
0,10	0,00785	0,125	0,13	0,77	0,466	0,83	0,86
0,11	0,0095	0,135	0,14	0,80	0,503	0,86	0,89
0,12	0,0113	0,145	0,15	0,83	0,541	0,89	0,92
0,13	0,0133	0,155	0,16	0,86	0,581	0,92	0,95
0,14	0,0154	0,165	0,17	0,90	0,636	0,96	0,99
0,15	0,0177	0,18	0,19	0,93	0,679	0,99	1,02
0,16	0,0201	0,19	0,20	0,96	0,724	1,02	1,05
0,17	0,0227	0,20	0,21	1,00	0,785	1,08	1,11
0,18	0,0255	0,21	0,22	1,04	0,850	1,12	1,15
0,19	0,0284	0,22	0,23	1,08	0,916	1,16	1,19
0,20	0,0314	0,23	0,24	1,12	0,985	1,20	1,23
0,21	0,0346	0,24	0,25	1,16	1,057	1,24	1,27
0,23	0,0416	0,27	0,28	1,20	1,131	1,28	1,31
0,25	0,0491	0,29	0,30	1,25	1,227	1,33	1,36
0,27	0,0573	0,31	0,32	1,30	1,327	1,38	1,41
0,29	0,0661	0,33	0,34	1,35	1,431	1,43	1,46
0,31	0,0755	0,35	0,36	1,40	1,539	1,48	1,51
0,33	0,0855	0,37	0,38	1,45	1,651	1,53	1,56
0,35	0,0962	0,39	0,41	1,50	1,767	1,58	1,61
0,38	0,113	0,42	0,44	1,56	1,911	1,64	1,67
0,41	0,132	0,45	0,47	1,62	2,061	1,70	1,73
0,44	0,152	0,48	0,50	1,68	2,217	1,76	1,79
0,47	0,174	0,51	0,53	1,74	2,378	1,82	1,85
0,49	0,189	0,53	0,55	1,81	2,573	1,90	1,93
0,51	0,204	0,56	0,58	1,88	2,776	1,97	2,00
0,53	0,221	0,58	0,60	1,95	2,987	2,04	2,07
0,55	0,238	0,60	0,62	2,02	3,205	2,11	2,14
0,57	0,255	0,62	0,64	2,10	3,464	2,20	2,23
0,59	0,273	0,64	0,66	2,26	4,012	2,36	2,39
0,62	0,302	0,67	0,69	2,44	4,676	2,54	2,57
0,64	0,322	0,69	0,72				

Таблица Б.2 – Параметры проводов по ГОСТ 26615-85

Диаметр провода без изоляции, мм	Сечение провода по меди, мм ²	Максимальные диаметры проводов с изоляцией, мм		Диаметр провода без изоляции, мм	Сечение провода по меди, мм ²	Максимальные диаметры проводов с изоляцией, мм	
		Тип 1	Тип 2			Тип 1	Тип 2
0,020	0,000314	0,025	0,027	0,38	0,1134	0,421	0,441
0,025	0,000491	0,031	0,034	0,40	0,1257	0,442	0,462
(0,03)	0,000707	(0,037)	(0,040)	0,425	0,1419	0,469	0,489
0,032	0,000804	0,040	0,043	0,45	0,1590	0,495	0,516
(0,035)	0,000953	(0,044)	(0,047)	0,475	0,1772	0,521	0,543
0,040	0,001257	0,050	0,054	0,50	0,1963	0,548	0,569
(0,045)	0,001582	(0,056)	(0,061)	0,53	0,2206	0,579	0,601
0,050	0,001963	0,062	0,068	0,56	0,2463	0,611	0,632
(0,06)	0,002827	(0,074)	(0,081)	0,60	0,2827	0,653	0,676
0,063	0,003117	0,078	0,085	0,63	0,3117	0,684	0,706
0,071	0,003959	0,088	0,095	0,67	0,3526	0,726	0,749
0,080	0,005027	0,098	0,105	0,71	0,3959	0,767	0,790
0,090	0,006362	0,110	0,117	0,75	0,4418	0,809	0,832
0,100	0,007854	0,121	0,129	0,80	0,5027	0,861	0,885
0,112	0,009852	0,134	0,143	0,85	0,5675	0,913	0,937
(0,12)	0,01131	(0,143)	(0,153)	0,90	0,6362	0,965	0,990
0,125	0,01227	0,149	0,159	0,95	0,7088	1,017	1,041
(0,13)	0,01327	(0,155)	(0,165)	1,00	0,7854	1,068	1,093
0,140	0,01539	0,166	0,176	1,06	0,8825	1,130	1,155
0,150	0,01767	0,176	0,187	1,12	0,9852	1,192	1,217
0,160	0,02011	0,187	0,199	1,18	1,0936	1,254	1,279
0,170	0,02270	0,198	0,210	1,25	1,2272	1,325	1,351
0,180	0,02545	0,209	0,222	1,32	1,3685	1,397	1,423
0,190	0,02835	0,220	0,234	1,40	1,5394	1,479	1,506
0,200	0,03142	0,230	0,245	1,50	1,7671	1,581	1,608
0,210	0,03464	0,243	0,258	1,60	2,0106	1,683	1,711
0,224	0,03941	0,256	0,272	1,70	2,2698	1,785	1,813
0,250	0,04909	0,284	0,302	1,80	2,5447	1,888	1,916
0,265	0,05515	0,300	0,319	1,90	2,8353	1,990	2,018
0,280	0,06158	0,315	0,334	2,00	3,1459	2,092	2,120
0,300	0,07069	0,337	0,355	2,12	3,5299	2,214	2,243
0,315	0,07793	0,352	0,371	2,24	3,9408	2,336	2,366
0,335	0,08814	0,374	0,393	2,36	4,3744	2,459	2,488
0,355	0,09898	0,395	0,414	2,50	4,9087	2,601	2,631

Примечание: Применение проводов, отмеченных скобками, должно быть технически обосновано.

ПРИЛОЖЕНИЕ В
(справочное)
РАСЧЕТНЫЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ

Таблица В.1 – Коэффициенты заполнения сердечников K_c

Тип сердечника	Вид изоляции	Значение K_c при толщине материала в мм				
		0,35	0,15-0,2	0,08-0,1	0,05	0,02
Пластинчатый	Лаковая	0,93	0,85	0,75	–	–
Ленточный	Эмалевая	0,93	0,90	0,85	0,75	0,62

Таблица В.2 – Соотношение коэффициентов заполнения окна K_o/K_{ot} при различных факторах отличия от типовых условий

Фактор отличия	K_o/K_{ot}
Провода с волокнистой изоляции	0,7...0,85
Сердечники наименьшей стоимости	0,8...0,9
Число обмоток больше шести	0,8...0,9
Бескаркасные катушки	0,9...0,95
Малое число обмоток, отсутствие анодных обмоток	1,05...1,15
Пленочная изоляция, отработанная технология	1,05...1,15
Фольговые обмотки	1,5...2

Таблица В.3 – Соотношение коэффициентов α_o/α_{oh} при различных факторах отличия от типовых условий

Фактор отличия	α_o/α_{oh}
Обмотки не пропитаны или их больше шести	0,85 – 0,9
Пропитка обмоток компаундами	1,05 – 1,15
Другой перегрев ($\tau_m \neq 50 K$)	$\sqrt[4]{\tau_m/50}$

$$\sqrt[4]{\tau_m/50} / \sqrt[4]{\tau_{chr}}$$

$$\sqrt[4]{\tau_m/50}$$

Таблица В.4 – Коэффициенты увеличения потерь в сердечниках K_T

Типы сердечников	Материал сердечника		Значения K_T при частоте, Гц			
	Вид	Толщина, мм	50	400	2000	10000
Ленточные замкнутые и пластинчатые	Стали и сплавы	0,15 – 0,35	1,15	1,2	–	–
		0,05	–	1,25	1,35	1,4
Ленточные разрезанные	Стали 3411-3415	0,15 – 0,35	1,3	1,4	1,5	1,6
		0,05	–	1,5	1,6	1,7

Примечание к таблице В.4: Значения K_T даны для сердечников средних размеров. Для меньших сердечников они возрастают в 1,2...1,3 раза, а для больших – несколько уменьшается.

Таблица В.5 – Значения коэффициентов для расчета перегрева катушек при типовых условиях

Тип ТММ	Катушки хорошо пропитаны			Катушки не пропитаны			m_1 при хорошем контакте сердечника с шасси
	α_0 , $\frac{Вт}{м^2 \cdot К}$	λ , $\frac{Вт}{м \cdot К}$	Γ	α_0 , $\frac{Вт}{м^2 \cdot К}$	λ , $\frac{Вт}{м \cdot К}$	Γ	
Малые БТ	10,5	0,2	1,04	9	0,1	1,08	1,6
Остальные БТ	10,5	0,2	1,05	9	0,1	1,10	1,3
СТ	12	0,2	1,03	10	0,1	1,06	1,3
ТТ	14	0,2	(см.п.5)	14	0,1	(см.п.5)	1,0

Примечания к таблице В.5: [4, с.249]

1 Значения α_0 , λ , Γ даны для ТММ сухой открытой конструкции. При наличии обволакивания термореактивными компаундами значения: α_0 ниже примерно на 10%; λ снижается до величины $\lambda \approx (0,03...0,06) \frac{Вт}{м \cdot К}$ в зависимости от толщины покрытия; коэффициент $\Gamma \approx 1,2...1,3$.

2 При отсутствии теплового контакта с теплоотводящим шасси для всех типов ТММ $m_1 = 1$.

3 В условиях пониженного атмосферного давления значения коэффициента α_0 падают согласно ориентировочной зависимости $\alpha_0 \approx \alpha_0' \frac{1 + \sqrt{H_{min}/101}}{2}$, где α_0' – типовое (табличное) значение α_0 , H_{min} – минимальное значение давления, $кПа$, заданное в ТЗ.

4 При наличии обдува ТММ значения α_0 существенно растут.

5 Для ТТ значение коэффициента Γ на начальном этапе принимается $\Gamma \approx 1,25$, а на заключительном этапе уточняется по формуле

$$\Gamma = 1 + \frac{\alpha}{\lambda} C_K \frac{\sqrt{v+0,5}}{\sqrt{v+1}}$$

Таблица В.6 – Рекомендуемые плотности токов j в обмотках ТП с ленточными магнитопроводами (при толщине ленты Δ_L , мм)

Конструкция магнитопровода	f , $Гц$	Плотность тока j , $А/мм^2$ при P_T , $Вт$				
		5-15	15-50	50-150	150-300	300-1000
Бронева ($\Delta_L=0,35$)	50	3,8-3,5	3,5-2,7	2,7-2,4	2,4-2,3	2,3-1,8
Стержневая ($\Delta_L=0,35$)	50	7,0-5,2	5,2-3,8	3,8-3,0	3,0-2,4	2,4-1,7
Бронева ($\Delta_L=0,15$)	400	7,8-9,4	9,4-6,5	6,5-4,0	4,0-2,7	2,7-1,5
Стержневая ($\Delta_L=0,15$)	400	11-9,6	9,6-5,6	5,6-3,5	3,5-2,8	2,8-1,8

ПРИЛОЖЕНИЕ Г
(справочное)

**ЦЕНЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ СТАЛЕЙ И
ОБМОТОЧНЫХ ПРОВОДОВ**

Таблица Г.1 – Цены на электротехнические стали (в 1970-е годы)

Марка стали	Толщина, мм	Вид поставки	Цена, руб/кг
1411 – 1413	0,35 – 0,5	Лист 500×1500 – 1000×2000	0,314...0,235
1511 – 1514	0,35 – 0,5	Лист 500×1500 – 1000×2000	0,339...0,260
3411 – 3413	0,35	Лента шириной 10...240 мм	0,6...0,7
3414 – 3415	0,35	Лента шириной 10...240 мм	0,8...0,85
3421 – 3422	0,15	Лента шириной 10...240 мм	1,8...2,3
3421 – 3422	0,08	Лента шириной 10...100 мм	2,3...3,0
3423 – 3424	0,15	Лента шириной 10...240 мм	2,3...3,1
3423 – 3424	0,08	Лента шириной 10...100 мм	2,9...3,9

Примечание: Меньшие цены диапазона соответствуют большим толщинам листа, большим ширинам ленты и меньшим номерам марок стали.

Таблица Г.2 – Цены на обмоточные провода (в 1970-е годы), руб/кг

Марка провода	Диаметры проводов, мм							
	0,10	0,15	0,20	0,31	0,53	1,00	1,50	2,44
ПЭЛ	3,00	2,03	1,84	1,54	1,39	1,28	1,22	1,18
ПЭЛР-2	5,70	4,00	3,20	1,95	1,54	1,34	1,25	1,20
ПЭВ-2, ПЭМ-2	6,00	4,23	3,35	2,07	1,65	1,43	1,33	1,27
ПЭВА	22,4	13,6	9,60	4,20	2,90	1,85	1,57	1,36
ПЭВТЛ-2	8,20	5,40	4,30	2,65	2,03	1,68	1,53	–
ПЭТВ	7,70	4,80	3,80	2,25	1,78	1,53	1,42	1,36
ПСДК	–	–	–	6,65	3,80	2,25	1,82	1,58

Примечания: 1) Стоимость проводов ПЭЛР-1, ПЭВ-1, ПЭМ-1, ПЭВТЛ-1 на 1..3 % ниже, чем проводов ПЭЛР-2, ПЭВ-2, ПЭМ-2, ПЭВТЛ-2, соответственно;

2) Стоимость проводов ПСДК на 10 % дороже, чем ПСД;

3) Стоимость проводов ПЭФ-155 на 5-10 % дороже, чем ПЭТВ.

ПРИЛОЖЕНИЕ Д
(справочное)

**РАЗМЕРЫ И СПРАВОЧНЫЕ ВЕЛИЧИНЫ ДЛЯ ТИПОВЫХ РЯДОВ СЕРДЕЧНИКОВ
И ДЛЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ ПРИ ТИПОВЫХ УСЛОВИЯХ**

Таблица Д.1 – Броневые ленточные сердечники ряда ШЛ для ТММ наименьшего веса по ГОСТ 22050-76

Номер	Типо-размер $a \times b$, мм	Размеры и справочные величины для расчета ТП										
		c , мм	h , мм	l_c , см	Q_c , см ²	Q_o , см ²	S_o , см ²	V_K , см ³	G_K , г	G_c , г	$K_{ок}$	α_{oh} , Вт/(м ² ·К)
1	6 × 6.5	6	15	5	0.4	0.9	10	4	4.3	13	0.12	12
2	6 × 8				0.5			4.2	16			
3	6 × 10				0.6			4.6	20			
4	6 × 12.5				0.75			5	25			
5	8 × 8	8	20	7	0.65	1.6	18	9	15	30	0.18	11
6	8 × 10				0.8			10	36			
7	8 × 12.5				1			11	45			
8	8 × 16				1.3			12	57			
9	10 × 10	10	25	9	1	2.5	2.8	18	35	57	0.22	11
10	10 × 12.5				1.25			19	70			
11	10 × 16				1.6			21	90			
12	10 × 20				2			23	112			
13	12 × 12.5	12	30	10	1.5	3.6	40	31	70	100	0.25	10,5
14	12 × 16				1.9			34	130			
15	12 × 20				2.4			37	165			
16	12 × 25				3			40	205			

Продолжение таблицы Д.1

Но- мер	Типо- размер $a \times b$, мм	Размеры и справочные величины для расчета ТП										
		c , мм	h , мм	l_c , см	Q_c , см ²	Q_o , см ²	S_o , см ²	V_K , см ³	G_K , г, кг	G_c , г, кг	$K_{ок}$	α_{oh} , Вт/(м ² · К)
17	16 × 16	16	40	14	2.6	6.4	70	73	190	240	0.28	10
18	16 × 20				3.2			78	200	300		
19	16 × 25				4			85	220	370		
20	16 × 32				5.1			94	240	470		
21	20 × 20	20	50	17	4	10	110	145	0.39	0,46	0,3	9,5
22	20 × 25				5			455	0.40	0,58		
23	20 × 32				6.4			165	0.46	0,74		
24	20 × 40				8			185	0.50	0,92		
25	25 × 25	25	62,5	21	6,3	16	175	280	0,81	0,9	0,32	9,0
26	25 × 32				8			300	0,87	1,2		
27	25 × 40				10			325	0,95	1,5		
28	25 × 50				12,5			360	1,04	1,8		
29	32 × 32	32	80	27	10,2	26	285	585	1,8	1,9	0,34	9,0
30	32 × 40				12,8			625	1,9	2,4		
31	32 × 50				16			680	2,1	3,0		
32	32 × 64				20,4			750	2,3	3,8		
33	40 × 40	40	100	34	16	40	445	1150	3,6	3,7	0,35	8,5
34	40 × 50				20			1250	3,9	4,7		
35	40 × 64				26			1350	4,2	6,0		
36	40 × 80				32			1450	4,6	4,5		

Окончание таблицы Д.1

Параметры, одинаковые для всех групп ряда (даны в порядке расположения сердечников в группе)

Сердечник	β	$\varepsilon = \varepsilon_0$ ($\varepsilon_0 i_1$)	V_C/V_K	Для ТЕР	
				v_0	B_0
Первый	1,0	0,6	0,5	1,8	2,3
Второй	1,1	0,7	0,5	1,9	2,5
Третий	1,3	0,7	0,6	2,0	2,7
Четвертый	1,6	0,7	0,7	2,1	3,0

Примечания:

- 1 Значения k_{OK} даны для низковольтных ТММ с несколькими пропитанными обмотками из эмальпроводов.
- 2 Вес G_K подсчитан для медного провода; при алюминиевом проводе G_K меньше в 3,3 раза.
- 3 Вес G_C подсчитан при $k_C = 0,9$. Если вес G_C в пределах данной группы ряда достигает 1 кг, то начиная с этой группы и далее, значения G_C и G_K приводятся в килограммах.
- 4 Группы ШЛ32 и ШЛ40 – ограниченного применения.
- 5 Помимо ряда ШЛ для применения при частоте 1000 Гц и выше разработан дополнительный ряд ШЛО с увеличенной площадью окна обмотки Q_o . Этот ряд рекомендуется применять лишь в специально обоснованных случаях.

Таблица Д.2 – Дополнительные справочные данные к расчету БТ на сердечниках ШЛ по таблице Д.1

Типоразмер сердечника	Типовые габаритные критерии			P_T, B, j_2 при типовых условиях						
				$f = 50 \text{ Гц}, \delta U = 0,1$ или $\tau_m = 50 \text{ К}$				$f = 400 \text{ Гц}, \tau_m = 50 \text{ К}$		
	$Gr_r^{(U)}$	$Gr_r^{(TBP)}$	$Gr_r^{(TEP)}$	τ_m или δU	$P_T, \text{ В}\cdot\text{А}$	$B, \text{ Тл}$	$j_2, \text{ А/мм}^2$	$P_T, \text{ В}\cdot\text{А}$	$B, \text{ Тл}$	$j_2, \text{ А/мм}^2$
6×6,5	0,08	0,17	0,08	$\delta U = 0,1$ $\tau_m < 50 \text{ К}$	0,04	1,5	0,5	3	1,55	3,8
6×8	0,12	0,21	0,10		0,06		0,6	4		4,5
6×10	0,15	0,26	0,11		0,07		0,6	5		5,2
6×12,5	0,22	0,32	0,13		0,10		0,7	7		6,0
8×8	0,4	0,51	0,21		0,2	1,5	0,6	11	1,55	4,2
6×8	0,6	0,63	0,25		0,3		0,7	13		4,1
6×10	0,9	0,79	0,29		0,4		0,8	15		4,0
6×12,5	1,3	1,03	0,35		0,7		0,9	19		3,8
10×10	1,5	1,2	0,44		0,8	1,55	0,7	24	1,55	3,1
10×12,5	2,2	1,5	0,52		1,1		0,9	28	1,55	3,0
10×16	3,4	1,9	0,59		1,8		1,0	34	1,50	2,9
10×20	4,8	2,4	0,69		2,5		1,2	40	1,45	2,8
12×12,5	5	2,5	0,79		2,4	1,55	0,9	47	1,55	2,4
12×16	7	3,2	0,94		3,6		1,1	54	1,45	
12×20	10	4,0	1,1		5,3		1,3	63	1,35	
12×25	15	5,0	1,3		7,6		1,5	73	1,30	
16×16	21	6,8	1,8		11	1,6	1,2	115	1,35	1,9
16×20	30	8,5	2,1		17		1,4	130	1,25	
16×25	43	11	2,5		24		1,6	150	1,2	
16×32	63	14	2,9		34		2,0	180	1,1	

Окончание таблицы Д.2

Типоразмер сердечника	Типовые габаритные критерии			P_T, B, j_2 при типовых условиях						
				$f = 50 \text{ Гц}, \delta U = 0,1$ или $\tau_m = 50 \text{ К}$				$f = 400 \text{ Гц}, \tau_m = 50 \text{ К}$		
	$Gr_T^{(U)}$	$Gr_T^{(Q)}$	$Gr_T^{(T)}$	τ_m или δU	$P_T, \text{ В}\cdot\text{А}$	$B, \text{ Тл}$	$j_2,$ $\text{А}/\text{мм}^2$	$P_T, \text{ В}\cdot\text{А}$	$B, \text{ Тл}$	$j_2,$ $\text{А}/\text{мм}^2$
20×20	70	15	3,5	$\tau_m = 50 \text{ К}$ $\delta U < 0,1$	37	1,6	1,5	210	1,15	1,6
20×25	100	19	4,0		53		1,8	250	1,1	
20×32	150	24	4,8		80		2,0	290	1,0	
20×40	210	30	5,8		90		2,2	340	0,95	
25×25	220	33	6,9		105	1,6	1,8	410	1,0	1,3
25×32	330	42	8,0		130			490	0,95	1,4
25×40	480	53	9,3		165			560	0,9	1,4
25×50	680	66	11		200			650	0,85	1,4
32×32	800	79	14		0,25	1,6	1,5	0,87	0,85	1,1
32×40	1200	99	16		0,30		1,5	1,00	0,8	1,2
32×50	1700	125	19		0,37		1,4	1,17	0,75	1,2
32×64	2500	160	22		0,45		1,4	1,38	0,7	1,2
40×40	2700	175	26		0,54	1,6	1,2	1,67	0,77	1
40×50	3900	215	31		0,65		1,2	1,93	0,72	
40×64	580	275	36		0,80		1,1	2,3	0,67	
40×80	8200	350	42		0,96		1,1	2,7	0,63	

Примечания:

1 Данные рассчитаны для низковольтных т.м.м. с несколькими пропитанными обмотками из медных эмальпроводов без учета контакта с шасси.

2 Величины P_T , B , j_2 приведены для типовых условий: $\delta U = 0,1$ или $\tau_m = 50 K$, сталь холоднокатаная 3411 - 3412 (0,35 мм) при $f = 50 Гц$ и 3422 - 3423 (0,15 мм) при $f = 400 Гц$.

Таблица Д.3 – Стержневые ленточные сердечники ряда ПЛ для ТММ наименьшего веса по ГОСТ 22050-76

Номер	Типоразмер сердечника $a \times b \times h$, мм	Размеры и справочные величины для расчета ТП									
		c , мм	l_c , см	Q_c , см ²	Q_o , см ²	S_o , см ²	V_k , см ³	G_k , г	G_c , г	$K_{ок}$	α_{oh} , Вт/(м ² ·К)
1	6x12,5x8	8	5	0,8	0,65	12	3	2	28	0,07	15
2	6x12,5x10		6		0,8	14	4	3	30	0,08	15
3	6x12,5x12,5		6		1,0	17	5	4	33	0,09	14
4	6x12,5x16		7		1,3	20	6	6	37	0,10	14
5	8x12,5x12,5	10	7	1,0	1,3	21	7	8	47	0,13	14
6	8x12,5x16		8		1,6	25	9	12	51	0,14	14
7	8x12,5x20		9		2	30	11	16	57	0,15	13
8	8x12,5x25		10		2,5	36	14	21	63	0,16	13
9	10x12,5x20	12,5	10	1,25	2,5	38	16	27	80	0,2	13
10	10x12,5x25		11		3,1	45	20	36	90	0,2	13
11	10x12,5x32		12		4	55	26	48	100	0,21	12
12	10x12,5x40		14		5	67	32	61	115	0,21	12
13	12,5x16x25	16	12	2,0	4	60	33	67	165	0,23	12
14	12,5x16x32		13		5,1	73	42	90	185	0,24	12
15	12,5x16x40		15		6,4	88	52	115	205	0,24	11
16	12,5x16x60		17		8	106	65	145	230	0,25	11
17	12,5x25x32	20	14	3,1	6	90	65	150	290	0,26	12
18	12,5x25x40		16		8	115	85	210	330	0,26	11,5
19	12,5x25x50		18		10	135	105	260	380	0,27	11
20	12,5x25x60		20		12	160	125	320	420	0,27	10,5
21	16x32x40	25	18	5,1	10	150	135	350	640	0,29	11,5
22	16x32x50		20		12,5	180	170	450	710		11

23	16x32x65		23		16	220	220	590	800		10,5
24	16x32x80		26		20	270	270	740	920		10

Продолжение таблицы Д.3

Номер	Типоразмер сердечника $a \times b \times h$, мм	Размеры и справочные величины для расчета ТП									
		c , мм	l_c , см	Q_c , см ²	Q_o , см ²	S_o , см ²	V_k , см ³	G_k , кг	G_c , кг	$K_{ок}$	α_{oh} , Вт/(м ² ·К)
25	20x40x50	32	23	8,0	16	240	270	0,76	1,3	0,31	11
26	20x40x60		25		19	280	330	0,92	1,4		10,5
27	20x40x80		29		26	350	440	1,25	1,6		10
28	20x40x100		33		32	420	550	1,58	1,8		10
29	25x50x65	40	29	12,5	26	390	560	1,6	2,5	0,34	10,5
30	25x50x80		32		32	450	680	2,0	2,8		10
31	25x50x100		36		40	540	850	2,6	3,1		10
32	25x50x120		40		48	630	1020	3,1	3,5		9,5
33	32x64x80	50	36	20,5	40	600	1080	3,3	5,1	0,35	10
34	32x64x100		40		50	710	1350	4,2	5,7		10
35	32x64x130		46		65	880	1750	5,5	6,5		9,5
36	32x64x160		52		80	1060	2150	6,8	7,4		9,0
37	40x80x100	64	45	32	64	960	2200	6,9	9,9	0,35	10
38	40x80x120		49		80	1100	2600	8,4	10,8		9,5
39	40x80x160		57		100	1400	3500	11,2	12,6		9,0
40	40x80x200		65		130	1700	4400	14,1	14,3		8,5

Окончание таблицы Д.3 – Параметры, одинаковые для всех групп ряда

Сердечник	β	$\varepsilon = \varepsilon_0$ ($\varepsilon_0 i_1$)	V_c/V_k	Для ТЕР	
				v_0	B_0
Первый	0,55	0,75	0,7	1,5	1,75
Второй	0,45		0,6	1,4	1,6

Третий	0,35		0,6	1,4	1,5
Четвертый	0,30		0,5	1,3	1,4

Таблица Д.4 – Дополнительные справочные данные к расчету СТ на сердечниках ПЛ по таблице Д.3

Типоразмер сердечника	Типовые габаритные критерии			P_T, B, j_2 при типовых условиях						
				$f = 50 \text{ Гц}, \delta U = 0,1$ или $\tau_m = 50 \text{ К}$				$f = 400 \text{ Гц}, \tau_m = 50 \text{ К}$		
	$Gr_T^{(L)}$	$Gr_{T,FBP}^{(C)}$	$Gr_{T,TEP}^{(C)}$	τ_m ИЛИ δU	$P_T, \text{ В}\cdot\text{А}$	$B, \text{ Тл}$	$j_2, \text{ А/мм}^2$	$P_T, \text{ ВА}$	$B, \text{ Тл}$	$j_2, \text{ А/мм}^2$
6x12,5x8	0,11	0,2	0,10	$\delta U = 0,1$ $\tau_m < 50 \text{ К}$	0,06	1,5	0,9	4	1,55	7,3
6x12,5x10	0,16	0,3	0,13		0,08			5		7,3
6x12,5x12,5	0,23	0,4	0,15		0,11			7		7,3
6x12,5x16	0,32	0,5	0,18		0,15			10		7,3
8x12,5x12,5	0,6	0,7	0,26		0,28	1,5	1,0	14	1,55	6,9
8x12,5x16	0,8	0,9	0,31		0,38			17		6,0
8x12,5x20	1,0	1,0	0,37		0,50			20		5,2
8x12,5x25	1,4	1,2	0,42		0,67			24		4,6
10x12,5x20	2,4	1,7	0,55		1,2	1,55	1,1	34	1,55	4,2
10x12,5x25	3,0	2,1	0,65		1,5			39		3,8
10x12,5x32	4,1	2,5	0,80		2,1			47		3,3
10x12,5x40	5,0	2,9	0,95		2,5			55		3,1
12,5x16x25	9	4,2	1,2		4,6	1,55	1,4	75	1,4	3,2
12,5x16x32	11	5,1	1,5		5,8			90	1,4	3,0
12,5x16x40	16	6,0	1,7		8,0			105	1,35	2,7
12,5x16x60	20	7,1	2,0		10,0			120	1,3	2,5
12,5x25x32	28	8,8	2,3		15	1,6	1,7	140	1,25	2,6
12,5x25x40	38	11	2,9		20			170	1,2	2,4
12,5x25x50	49	13	3,2		27			200	1,2	2,2
12,5x25x60	58	15	3,6		32			220	1,15	2,1

Окончание таблицы Д.4

Типоразмер сердечника	Типовые габаритные критерии			P_T, B, j_2 при типовых условиях						
				$f = 50 \text{ Гц}, \delta U = 0,1$ или $\tau_m = 50 \text{ К}$				$f = 400 \text{ Гц}, \tau_m = 50 \text{ К}$		
	$G_T^{(U)}$	$G_T^{(B)}$	$G_T^{(j)}$	τ_m или δU	$P_T, \text{ В}\cdot\text{А}$	$B, \text{ Тл}$	$j_2,$ А/мм^2	$P_T, \text{ В}\cdot\text{А}$	$B, \text{ Тл}$	$j_2,$ А/мм^2
16x32x40	115	22	4,8	$\delta U = 0,1$ $\tau_m < 50 \text{ К}$	63	1,6	2,2	310	1,05	2,1
16x32x50	145	26	5,6		78			350	1,0	2,0
16x32x65	185	31	6,9		105			420	1,0	1,8
16x32x80	230	37	7,5		125			470	0,95	1,7
20x40x50	360	50	10	$\tau_m = 50 \text{ К}$ $\delta U < 0,1$	155	1,6	2,3	600	0,95	1,8
20x40x60	440	57	11		170		640	0,9	1,7	
20x40x80	580	70	13		210		780	0,9	1,6	
20x40x100	670	83	15		250		890	0,85	1,5	
25x50x65	1300	115	20		0,36	1,6	1,8	1,2	0,8	1,5
25x50x80	1600	130	22		0,41		1,7	1,4	0,8	1,4
25x50x100	2000	155	25		0,48		1,6	1,6	0,8	1,3
25x50x120	2400	180	28		0,53		1,5	1,7	0,75	1,2
32x64x80	4300	260	39		0,8	1,6	1,7	2,4	0,7	1,3
32x64x100	5400	300	44		0,9		1,7	2,7	0,7	1,2
32x64x130	7000	360	50		1,1		1,6	3,2	0,65	1,1
32x64x160	8600	425	58		1,2		1,5	3,6	0,65	1,1
40x80x100	$13 \cdot 10^3$	575	76		1,6	1,6	1,4	4,6	0,65	1,1
40x80x120	$17 \cdot 10^3$	660	82		1,8		1,3	5,2	0,6	1,1
40x80x160	$21 \cdot 10^3$	780	100		2,0		1,2	6,0	0,6	1,0
40x80x200	$27 \cdot 10^3$	950	120		2,5		-	7,0	0,55	0,9

Примечания см. к таблице Д.2

Таблица Д.5 – Торoidalные ленточные сердечники ряда ОЛ для ТММ наименьшего веса по ГОСТ 22050-76

Номер	Типоразмер сердечника $d(c) \times D \times b$, мм	Размеры и справочные величины для расчета ТП									
		a , мм	l_c , см	Q_c , см ²	Q_o , см ²	S_o , см ²	V_k , см ³	G_k , г	G_c , г	$K_{ок}$	$\alpha_{он}$, Вт/(м ² ·К)
1	10x16x4	3	4	0,12	0,8	9	2,4	2,2	3	0,1	19
2	10x16x5			0,15		9	2,6	2,5	4		19
3	10x16x6,5			0,20		10	2,9	2,8	5		18
4	10x16x8			0,24		11	3,3	3,1	6		18
5	12x20x5	4	5	0,2	1,1	13	4,0	4,5	7	0,12	19
6	12x20x6,5			0,26		14	4,5	5	9		18
7	12x20x8			0,32		15	5,0	5,5	11		18
8	12x20x10			0,4		17	6,0	6,5	13		17
9	16x26x6,5	5	7	0,33	2	22	9	12	14	0,15	18
10	16x26x8			0,4		24	10	14	18		17
11	16x26x10			0,5		26	11	15	22		17
12	16x26x12.5			0,63		28	12	17	27		16
13	20x32x8	6	10	0,75	3	52	30	20	25	0,16	17
14	20x32x10			0,95		55	32	20	32	0,14	17
15	20x32x12,5			1,2		58	36	19	40	0,12	16
16	20x32x16			1,5		62	40	18	52	0,10	16
17	25x40x10	7,5	10	0,75	5	52	30	50	51	0,18	17
18	25x40x12,5			0,95		55	32	50	64	0,17	16
19	25x40x16			1,2		58	36	50	82	0,15	16
20	25x40x20			1,5		62	40	50	102	0,13	16
21	32x50x16	9	13	1,45	8	90	68	125	125	0,21	16
22	32x50x20			1,8		95	78	135	155	0,19	15
23	32x50x25			2,25		100	83	135	195	0,18	15

24	32x50x32			2,9		110	93	135	250	0,16	14
----	----------	--	--	-----	--	-----	----	-----	-----	------	----

Продолжение таблицы Д.5

Номер	Типоразмер сердечника $d(c) \times D \times b$, мм	Размеры и справочные величины для расчета ТП									
		a , мм	l_c , см	Q_c , см ²	Q_o , см ²	S_o , см ²	V_K , см ³	G_K , кг	G_c , кг	$K_{ок}$	$\alpha_{он}$, Вт/(м ² ·К)
25	40x64x20	12	16	2,4	13	145	135	0,29	0,27	0,23	15
26	40x64x25			3,0		155	150	0,30	0,33	0,22	15
27	40x64x32			3,8		170	165	0,31	0,42	0,21	14
28	40x64x40			4,8		185	190	0,32	0,53	0,19	14
29	50x80x25	15	20	3,8	20	235	260	0,61	0,52	0,26	14
30	50x80x32			4,8		250	290	0,65	0,67	0,25	14
31	50x80x40			6,0		270	340	0,70	0,83	0,23	13
32	50x80x50			7,5		300	380	0,75	1,04	0,22	13
33	64x100x32	18	26	5,8	32	380	540	1,35	1,0	0,28	14
34	64x100x40			7,2		410	610	1,50	1,3	0,27	14
35	64x100x50			9,0		440	680	1,60	1,6	0,26	13
36	64x100x64			11,5		480	780	1,75	2,0	0,25	13
37	80x128x40	24	33	9,6	50	620	1100	2,8	2,1	0,29	13
38	80x128x50			12,0		660	1200	3,1	2,7	0,29	13
39	80x128x64			15,4		720	1350	3,4	3,4	0,28	12
40	80x128x80			19,2		780	1500	3,7	4,3	0,27	12

Окончание таблицы Д.5 – Параметры, одинаковые для всех групп ряда

Сердечник	$\varepsilon = \varepsilon_0 (\varepsilon_0 i_1)$	V_C/V_K
Первый	0,6	0,3
Второй	0,6	0,3
Третий	0,7	0,4

9

Четвертый	0,7	0,4
-----------	-----	-----

Таблица Д.6 – Дополнительные справочные данные к расчету ГТ на сердечниках ОЛ по таблице Д.5

Типоразмер сердечника	Типовые габаритные критерии			P_T, B, j_2 при типовых условиях							
				$f = 50 \text{ Гц}, \delta U = 0,1$ или $\tau_m = 50 \text{ К}$			$f = 400 \text{ Гц}, \tau_m = 50 \text{ К}$				
	$G_T^{(U)}$	$G_T^{(TBP)}$	$G_T^{(TEP)}$	τ_m или δU	$P_T, \text{ В}\cdot\text{А}$	$B, \text{ Тл}$	$j_2, \text{ А/мм}^2$	$P_T, \text{ В}\cdot\text{А}$	$B, \text{ Тл}$	$j_2, \text{ А/мм}^2$	
10x16x4	$9 \cdot 10^{-3}$	0,05	0,03	$\delta U = 0,1$ $\tau_m < 50 \text{ К}$	$5 \cdot 10^{-3}$	1,55	0,2	0,3	1,6	1,7	
10x16x5	0,01	0,06	0,03		$5 \cdot 10^{-3}$		0,2	0,4		1,9	
10x16x6,5	0,02	0,08	0,04		$8 \cdot 10^{-3}$		0,3	0,7		2,4	
10x16x8	0,03	0,09	0,05		0,01		0,3	0,9		2,6	
12x20x5	0,04	0,11	0,06		0,02	1,55	0,3	1,1	1,6	2,2	
12x20x6,5	0,05	0,14	0,07		0,03		0,3	1,7		2,8	
12x20x8	0,07	0,17	0,08		0,04		0,4	2,4		3,1	
12x20x10	0,09	0,21	0,09		0,05		0,4	3,4		3,6	
16x26x6,5	0,15	0,29	0,15		0,08	1,55	0,4	5	1,6	3,0	
16x26x8	0,2	0,35	0,16		0,10		0,4	7		3,4	
16x26x10	0,3	0,44	0,19		0,15		0,5	10		4,0	
16x26x12.5	0,42	0,55	0,21		0,22		0,6	15		4,6	
20x32x8	0,37	0,55	0,24		0,20	1,6	0,5	13	1,6	3,7	
20x32x10	0,46	0,63	0,25		0,25		0,5	16		4,3	
20x32x12,5	0,57	0,70	0,26		0,30		0,6	17		4,6	
20x32x16	0,60	0,74	0,27		0,32		0,7	17		4,9	
25x40x10	1,4	1,3	0,50		0,7	1,6	0,6	35	1,6	3,4	
25x40x12,5	1,9	1,6	0,57		1,1		0,7	41			1,6
25x40x16	2,5	1,9	0,62		1,4		0,8	43			1,6
25x40x20	3,0	2,1	0,65		1,7		0,9	45			1,5

Окончание таблицы Д.6

Типоразмер сердечника	Типовые габаритные критерии			P_T, B, j_2 при типовых условиях						
				$f = 50 \text{ Гц}, \delta U = 0,1$ или $\tau_m = 50 \text{ К}$				$f = 400 \text{ Гц}, \tau_m = 50 \text{ К}$		
	$G_T^{(U)}$	$G_T^{(TBP)}$	$G_T^{(TEP)}$	τ_m ИЛИ δU	$P_T, \text{ В}\cdot\text{А}$	В, Тл	$j_2,$ $\text{А}/\text{мм}^2$	$P_T, \text{ В}\cdot\text{А}$	В, Тл	$j_2,$ $\text{А}/\text{мм}^2$
32x50x16	7	3,8	1,3	$\delta U = 0,1$ $\tau_m < 50 \text{ К}$	3,7	1,6	0,8	91	1,5	2,5
32x50x20	9	4,4	1,4		5,0		0,9	93	1,45	
32x50x25	12	5,4	1,5		6,6		1,1	100	1,35	
32x50x32	17	6,4	1,6		9,0		1,3	110	1,2	
40x64x20	26	9	2,6		14	1,6	1,0	180	1,35	2,1
40x64x25	37	11	3,1		20		1,2	210	1,3	
40x64x32	50	13,5	3,3		28		1,4	230	1,15	
40x64x40	67	16,5	3,6		37		1,7	250	1,1	
50x80x25	95	22	5,4		50	1,6	1,3	390	1,2	1,7
50x80x32	135	27	6,1		75		1,6	440	1,1	
50x80x40	170	32	6,6		95		1,8	460	1,0	
50x80x50	240	38	7,1		130		2,1	500	0,95	
64x100x32	340	49	11		0,17	1,6	1,7	0,83	1,1	1,4
64x100x40	420	59	12		0,22		1,8	0,88	1,0	
64x100x50	570	71	13		0,26		1,8	0,96	0,9	
64x100x64	820	88	15		0,31		1,8	1,04	0,85	
80x128x40	1050	115	22	$\tau_m = 50 \text{ К}$ $\delta U < 0,1$	0,42	1,6	1,5	1,6	0,95	1,2
80x128x50	1600	140	26		0,52			1,8	0,85	
80x128x64	2200	175	28		0,62			2,0	0,8	
80x128x80	3000	210	31		0,70			2,2	0,7	

Примечания см. к таблице Д.2

Таблица Д.7 – Броневые ленточные сердечники ряда ШЛМ по НПО.666.001
для ТММ наименьшего веса и наименьшей стоимости (50 Гц)

Но- мер	Типоразмер сердечника $a \times b$, мм	Размеры и справочные величины для расчета ТП										
		c , мм	h , мм	l_c , см	Q_c , см ²	Q_o , см ²	S_o , см ²	V_k , см ³	G_k , г	G_c , г	$K_{ок}$	α_{oh} , Вт/(м ² · К)
1	8 × 6,5	5	13	5	0,5	0,65	8,5	2,9	2,2	18	0,08	12
2	8 × 8				0,6			3,1	2,3	22		
3	8 × 10				0,8			3,4	2,5	28		
4	8 × 12,5				1,0			3,7	2,8	36		
5	8 × 16				1,25			4,2	3,1	44		
6	10 × 8	6	18	7	0,8	1,1	14	6,0	7,0	36	0,13	11,5
7	10 × 10				1,0			6,5	7,5	45		
8	10 × 12,5				1,25			7,0	8,0	56		
9	10 × 16				1,6			7,5	9,0	72		
10	10 × 20				2,0			8,5	10,0	91		
11	12 × 10	8	23	8	1,2	1,8	23	13,0	22	70	0,19	11
12	12 × 12,5				1,5			13,5	24	90		
13	12 × 16				1,9			15,0	26	115		
14	12 × 20				2,4			16,5	28	150		
15	12 × 25				3,0			18,5	32	180		
16	16 × 12,5	9	26	10	2,0	2,3	31	21	39	135	0,21	10,5
17	16 × 16				2,6			22	42	175		
18	16 × 20				3,2			24	45	215		
19	16 × 25				4,0			27	50	270		
20	16 × 32				5,1			30	56	350		

Продолжение таблицы Д.7

Но- мер	Типоразмер сердечника $a \times b$, мм	Размеры и справочные величины для расчета ТП										
		c , мм	h , мм	l_C , см	Q_C , см ²	Q_O , см ²	S_O , см ²	V_K , см ³	G_K , кг	G_C , кг	K_{OK}	α_{Oh} , Вт/(м ² · К)
21	20×16	12	36	13	3,2	4,3	55	47	0,11	0,29	0,25	10
22	20×20				4,0			51	0,12	0,37		
23	20×25				5,0			55	0,13	0,44		
24	20×32				6,4			61	0,14	0,58		
25	20×40				8,0			68	0,15	0,73		
26	25×20	15	45	16	5,0	6,8	85	92	0,24	0,57	0,28	9,5
27	25×25				6,3			100	0,25	0,71		
28	25×32				8,0			110	0,28	0,91		
29	25×40				10,0			120	0,30	1,10		
30	25×50				12,5			135	0,34	1,40		

Окончание таблицы Д.7 – Параметры, одинаковые для всех групп ряда

Сердечник	β	$\varepsilon = \varepsilon_0$ ($\varepsilon_0 i_1$)	V_C/V_K
Первый	1,4	0,7	0,9
Второй	1,5	0,7	1,0
Третий	1,8	0,8	1,2
Четвертый	2,1	0,8	1,3
Пятый	2,4	0,8	1,5

Примечания: 1 Значения k_{OK} даны для низковольтных ТММ с пропитанными обмотками из эмальпроводов.

2 Вес G_K подсчитан для медного провода; при алюминиевом проводе G_K меньше в 3,3 раза.

3 Вес G_C подсчитан при $k_C = 0,93$.

Таблица Д.8 – Дополнительные справочные данные к расчету БТ на сердечниках ШЛМ по таблице Д.7

Типоразмер сердечника	Типовые габаритные критерии		P_T, B, j_2, p_c, p_o при типовых условиях: $f = 50 \text{ Гц}$, $\delta U = 0,1$ или $\tau_m = 50 \text{ К}$					
	$Gr_T^{(U)}$	$Gr_T^{(Q)TBP}$	τ_m или δU	$P_T, B \cdot A$	$p_c, \text{Вт}$	$p_o, \text{Вт}$	$B, \text{Тл}$	$j_2, \text{А/мм}^2$
$8 \times 6,5$	0,07	0,16	$\delta U = 0,1$ $\tau_m < 50 \text{ К}$	0,04	0,06	$3 \cdot 10^{-3}$	1,5	0,6
8×8	0,10	0,20		0,05	0,07	$5 \cdot 10^{-3}$		0,7
8×10	0,14	0,25		0,07	0,09	$7 \cdot 10^{-3}$		0,9
$8 \times 12,5$	0,20	0,31		0,10	0,11	0,010		1,0
8×16	0,29	0,40		0,15	0,14	0,014		1,2
10×8	0,33	0,44		0,18	0,12	0,02	1,55	0,8
10×10	0,48	0,55		0,26	0,15	0,03		1,0
$10 \times 12,5$	0,68	0,62		0,37	0,19	0,04		1,1
10×16	1,00	0,89		0,55	0,24	0,06		1,3
10×20	1,45	1,10		0,78	0,31	0,08		1,5
12×10	1,5	1,1		0,85	0,27	0,08	1,6	1,0
$12 \times 12,5$	2,1	1,4		1,25	0,34	0,12		1,2
12×16	3,1	1,8		1,8	0,44	0,18		1,4
12×20	4,5	2,3		2,6	0,55	0,26		1,6
12×25	6,3	2,9		3,7	0,66	0,36		1,8
$16 \times 12,5$	4,8	2,4		2,8	0,5	0,27	1,6	1,3
16×16	7,5	3,1		4,4	0,6	0,42		1,5
16×20	11	3,9		6,1	0,8	0,58		1,9
16×25	15	4,9		8,6	1,0	0,82		2,2
16×32	21	6,2		12,4	1,2	1,2		2,5

Окончание таблицы Д.8

Типоразмер сердечника	Типовые габаритные критерии		P_T, B, j_2, p_C, p_o при типовых условиях: $f = 50 \text{ Гц}$, $\delta U = 0,1$ или $\tau_m = 50 \text{ К}$					
	$G_T^{(U)}$	$G_T^{(q)}_{TBP}$	τ_m или δU	$P_T, B \cdot A$	$p_C, \text{Вт}$	$p_o, \text{Вт}$	$B, \text{Тл}$	$j_2, \text{А/мм}^2$
20×16	20	6,5	$\delta U = 0,1$ $\tau_m < 50 \text{ К}$	11	1,1	1,2	1,6	1,7
20×20	29	8,5		17	1,4	1,7		2,0
20×25	42	10,5		24	1,6	2,4		2,3
20×32	62	13,0		36	2,1	3,6		2,7
20×40	87	16,5		50	2,6	5,0		3,1
25×20	70	15	$\tau_m = 50 \text{ К}$ $\delta U < 0,1$	40	2,0	4,0	1,6	2,1
25×25	100	19		60	2,6	5,9		2,5
25×32	150	24		72	3,3	7,3		2,7
25×40	210	30		90	4,0	7,7		2,7
25×50	300	37		110	4,8	8,2		2,7

Примечания:

1 Данные рассчитаны для низковольтных т.м.м. с несколькими пропитанными обмотками из медных эмальпроводов без учета контакта с шасси.

2 Величины P_T, B, j_2, p_C, p_o приведены для типовых условий: $\delta U = 0,1$ или $\tau_m = 50 \text{ К}$, сталь холоднокатаная 3411 - 3412 (0,35 мм) при $f = 50 \text{ Гц}$.

**Таблица Д.9 – Стержневые ленточные сердечники ряда ПЛМ по НПО.666.001
для ТММ наименьшего веса и наименьшей стоимости (50 Гц)**

Но- мер	Типоразмер сердечника $a \times b \times h$, мм	Размеры и справочные величины для расчета ТП														
		c , мм	l_c , см	Q_c , см ²	Q_o , см ²	S_o , см ²	V_K , см ³	G_K , кг	G_c , кг	K_{OK}	α_{oh} , Вт/(м ² · К)					
1	22× 32 × 28	19	16	7,1	5,3	105	75	0,17	0,8	0,26	12					
2	22 × 32 × 36		18									6,8	125	95	0,22	0,9
3	22 × 32 × 46		20									8,7	150	120	0,29	1,0
4	22 × 32 × 58		22									11	185	150	0,37	1,1
5	27 × 40 × 36	24	21	11	8,7	170	150	0,37	1,6	0,29	11,5					
6	27 × 40 × 46		23									11	190	190	0,49	1,7
7	27 × 40 × 58		25									13,9	240	240	0,63	1,9
8	27 × 40 × 73		28									17,5	290	300	0,80	2,2
9	34 × 50 × 46	30	26	17	13,8	270	300	0,8	3,1	0,31	11					
10	34 × 50 × 58		29									17,4	320	380	1,0	3,4
11	34 × 50 × 73		32									21,9	380	470	1,3	3,8
12	34 × 50 × 90		35									27	450	580	1,7	4,2

Окончание таблицы Д.9 – Параметры, одинаковые для всех групп ряда

Сердечник	β	$\varepsilon = \varepsilon_0$ ($\varepsilon_0 i_1$)	V_C/V_K
Первый	1,0	0,8	1,5
Второй	0,8		1,3
Третий	0,65		1,2
Четвертый	0,55		1,1

Примечания см. к таблице Д.7

Таблица Д.10 – Дополнительные справочные данные к расчету СТ на сердечниках ПЛМ по таблице Д.9

Типоразмер сердечника	Типовые габаритные критерии		P_T, B, j_2, p_C, p_O при типовых условиях: $f = 50 \text{ Гц}$, $\delta U = 0,1$ или $\tau_m = 50 \text{ К}$					
	$G_T^{(U)}$	$G_T^{(Q)TBP}$	τ_m или δU	$P_T, B \cdot A$	$p_C, \text{Вт}$	$p_O, \text{Вт}$	$B, \text{Тл}$	$j_2, \text{А/мм}^2$
22×32×28	95	20	$\delta U = 0,1$ $\tau_m < 50 \text{ К}$	56	2,9	5,6	1,6	3,2
22×32×36	130	24		74	3,2	7,4		3,2
22×32×46	170	29		95	3,6	9,6		3,2
22×32×58	220	34		105	4	10,4		2,9
27×40×36	350	47	$\tau_m = 50 \text{ К}$ $\delta U < 0,1$	145	5,7	12,0	1,6	3,1
27×40×46	440	55		165	6,2	12,4		2,8
27×40×58	570	65		200	6,9	13,4		2,5
27×40×73	740	77		230	7,8	14,6		2,3
34×50×46	1100	105	$\tau_m = 50 \text{ К}$ $\delta U < 0,1$	310	11	16,8	1,6	2,5
34×50×58	1450	125		370	12	17,7		2,3
34×50×73	1900	145		420	14	18,4		2,1
34×50×90	2400	165		490	15	19,7		1,9

Примечания:

1 Данные рассчитаны для низковольтных т.м.м. с несколькими пропитанными обмотками из медных эмальпроводов без учета контакта с шасси.

2 Величины P_T, B, j_2, p_C, p_O приведены для типовых условий: $\delta U = 0,1$ или $\tau_m = 50 \text{ К}$, сталь холоднокатаная 3411 - 3412 (0,35 мм) при $f = 50 \text{ Гц}$.

**Таблица Д.11 – Броневые ленточные сердечники ряда ШЛР по НПО.666.001
для ТММ наименьшей стоимости (50 Гц)**

Но- мер	Типоразмер сердечника $a \times b$, мм	Размеры и справочные величины для расчета ТП										
		c , мм	h , мм	l_c , см	Q_c , см ²	Q_o , см ²	S_o , см ²	V_k , см ³	G_k , г	G_c , г	$K_{ок}$	α_{oh} , Вт/(м ² · К)
1	10 12,5	7	20	7	1,25	1,4	17	9,5	14	60	0,16	11
2	10 16				1,6			10,5	15	77		
3	10 20				2,0			11,5	17	96		
4	12 20	8	25	9	2,4	2	24	18	30	140	0,19	10,5
5	12 25				3,0			20	35	175		
6	12 32				3,8			23	40	220		
7	16 20	8	32	11	3,2	2,6	33	25	45	240	0,2	10
8	16 25				4,0			28	50	300		
9	16 32				5,1			31	55	390		
10	16 40				6,4			35	65	480		
11	20 25	10	40	13	5,0	4	51	49	100	470	0,23	10
12	20 32				6,4			54	110	600		
13	20 40				8,0			61	125	750		
14	20 50				10,0			70	145	940		

Окончание таблицы Д.11 – Параметры, одинаковые для всех групп ряда

Сердечник	β^*	$\varepsilon = \varepsilon_0$ ($\varepsilon_0 i_1$)	V_c/V_k^*
Первый	1,9	0,8	1,4
Второй	2,3		1,6
Третий	2,7		1,8
Четвертый	3,1		2,0

Примечания см. к таблице Д.7

* Кроме первой группы сердечников

Таблица Д.12 – Дополнительные справочные данные к расчету БТ на сердечниках ШЛР по таблице Д.11

Типоразмер сердечника	Типовые габаритные критерии		P_T, B, j_2, p_C, p_O при типовых условиях: $f = 50 \text{ Гц}$, $\delta U = 0,1$ или $\tau_m = 50 \text{ К}$					
	$G_T^{(U)}$	$G_T^{(Q_{ТВР})}$	τ_m или δU	$P_T, B \cdot A$	$p_C, \text{Вт}$	$p_O, \text{Вт}$	$B, \text{Тл}$	$j_2, \text{А/мм}^2$
10 : 12,5	1,0	0,9	$\delta U = 0,1$ $\tau_m < 50 \text{ К}$	0,5	0,2	0,05	1,5	1,0
10 : 16	1,5	1,2		0,8	0,3	0,07		1,2
10 : 20	2,2	1,4		1	0,3	0,11		1,3
12 : 20	5	2,4		2,4	0,5	0,24	1,5	1,4
12 : 25	7	3,0		3,3	0,6	0,33		1,7
12 : 32	10	3,9		4,8	0,7	0,47		1,9
16 : 20	11	4,2		6	0,8	0,6	1,55	2,0
16 : 25	15	5,2		8,5	1,0	0,8		2,2
16 : 32	22	6,7		12	1,3	1,2		2,6
16 : 40	31	8,3		17	1,6	1,7		2,9
20 : 25	38	10		22	1,7	2,2	1,6	2,5
20 : 32	55	12		32	2,2	3,2		2,9
20 : 40	77	15		45	2,7	4,5		3,2
20 : 50	105	19		62	3,4	6,2		3,6

Примечания:

1 Данные рассчитаны для низковольтных т.м.м. с несколькими пропитанными обмотками из медных эмальпроводов без учета контакта с шасси.

2 Величины P_T, B, j_2, p_C, p_O приведены для типовых условий: $\delta U = 0,1$ или $\tau_m = 50 \text{ К}$, сталь холоднокатаная 3411 - 3412 (0,35 мм) при $f = 50 \text{ Гц}$.

**Таблица Д.13 – Стержневые ленточные сердечники ряда ПЛР по НПО.666.001
для ТММ наименьшей стоимости (50 Гц)**

Но- мер	Типоразмер сердечника $a \times b$, мм	Размеры и справочные величины для расчета ТП										
		c , мм	h , мм	l_c , см	Q_c , см ²	Q_o , см ²	S_o , см ²	V_k , см ³	G_k , г	G_c , кг	$K_{ок}$	α_{oh} , Вт/(м ² ·К)
1	10 × 12,5	8	32	11	1,2	2,6	42	15	16	0,10	0,12	12
2	10 × 16				1,6							
3	10 × 20				2,0							
4	10 × 25				2,5							
5	12,5 × 16	10	40	14	2,0	4	66	29	45	0,19	0,17	11,5
6	12,5 × 20				2,5							
7	12,5 × 25				3,1							
8	12,5 × 32				4,0							
9	14 × 20	11,5	45	16	2,8	5,2	86	44	80	0,31	0,20	11
10	14 × 25				3,5							
11	14 × 32				4,5							
12	14 × 36				5,0							
13	16 × 20	16	60	20	3,2	9,6	140	93	210	0,46	0,25	10,5
14	16 × 25				4,0							
15	16 × 32				5,1							
16	16 × 40				6,4							
17	18 × 25	18	71	24	4,5	13	190	146	360	0,75	0,27	10,5
18	18 × 32				5,8							
19	18 × 40				7,2							
20	18 × 45				8,1							

Продолжение таблицы Д.13

Но- мер	Типоразмер сердечника $a \times b$, мм	Размеры и справочные величины для расчета ТП										
		c , мм	h , мм	l_c , см	Q_c , см ²	Q_o , см ²	S_o , см ²	V_K , см ³	G_K , кг	G_C , кг	K_{OK}	α_{oh} , Вт/(м ² ·К)
21	21 × 36	25	85	29	7,6	21	310	332	0,90	1,5	0,30	10
22	21 × 40				8,4		315	343	0,93	1,7		
23	21 × 45				9,5		325	364	0,98	1,9		
24	25 × 40	28	100	34	10,0	28	410	490	1,3	2,4	0,31	10
25	25 × 45				11,3		420	515	1,4	2,7		
26	25 × 50				12,5		430	545	1,5	3,0		
27	28 × 40	32	120	39	11,2	38	540	715	2,1	3,1	0,32	9,5
28	28 × 45				12,6		550	755	2,2	3,5		
29	28 × 50				14,0		570	790	2,3	3,9		

Окончание таблицы Д.13 – Параметры, одинаковые для всех групп ряда

Сердечник	β^*	$\varepsilon = \varepsilon_0$ ($\varepsilon_0 i_1$)	V_C/V_K^*
Первый	0,35	0,8	0,7
Второй	0,35		0,7
Третий	0,4		0,8
Четвертый	0,4		0,85

* Кроме трех первых групп

Примечания: 1 Значения k_{OK} даны для низковольтных ТММ с пропитанными обмотками из эмальпроводов.

2 Вес G_K подсчитан для медного провода; при алюминиевом проводе G_K меньше в 3,3 раза.

3 Вес G_C подсчитан при $k_C = 0,93$.

Таблица Д.14 – Дополнительные справочные данные к расчету СТ на сердечниках ПЛР по таблице Д.13

Типоразмер сердечника	Типовые габаритные критерии		P_T, B, j_2, p_c, p_o при типовых условиях: $f = 50 \text{ Гц}$, $\delta U = 0,1$ или $\tau_m = 50 \text{ К}$						
	$G_T^{(U)}$	$G_T^{(Q_{TBP})}$	τ_m или δU	$P_T, \text{В}\cdot\text{А}$	$p_c, \text{Вт}$	$p_o, \text{Вт}$	$B, \text{Тл}$	$j_2, \text{А/мм}^2$	
10 × 12,5	1,7	1,5	$\delta U = 0,1$ $\tau_m < 50 \text{ К}$	0,9	0,1	0,3	1,5	1,3	
10 × 16	2,5	1,8		1,2	0,12	0,4		1,5	1,5
10 × 20	3,4	2,3		1,8	0,17	0,5		1,5	1,7
10 × 25	4,8	2,8		2,4	0,24	0,6		1,5	1,8
12,5 × 16	7,5	3,8		3,8	0,4	0,6	1,5	1,6	
12,5 × 20	10,5	4,7		5,3	0,5	0,8		1,5	1,8
12,5 × 25	14	5,7		7,3	0,7	1,0		1,5	2,0
12,5 × 32	20	7,3		10	1	1,3		1,5	2,3
14 × 20	20	7,3		12	1,2	1,1	1,55	2,1	
14 × 25	30	9,0		16	1,6	1,3		1,55	2,4
14 × 32	45	11,5		24	2,3	1,7		1,55	2,7
14 × 36	50	12,5		27	2,7	1,9		1,55	2,8
16 × 20	50	14		29	2,9	1,7	1,6	2,0	
16 × 25	70	17		41	4,1	2,1		1,6	2,3
16 × 30	100	21		59	5,9	2,7		1,6	2,6
16 × 40	150	26		82	8,2	3,3		1,6	2,9
18 × 25	120	24	70	7	2,7	1,6	2,4		
18 × 32	180	30	105	10,4	3,5		1,6	2,8	
18 × 40	250	37	115	11	4,3		1,6	2,7	
18 × 45	300	41	130	11	4,8		1,6	2,7	

Окончание таблицы Д.14

Типоразмер сердечника	Типовые габаритные критерии		P_T, B, j_2, p_C, p_O при типовых условиях: $f = 50 \text{ Гц}$, $\delta U = 0,1$ или $\tau_m = 50 \text{ К}$					
	$G_T^{(U)}$	$G_T^{(Q_{ТВР})}$	τ_m или δU	$P_T, B \cdot A$	$p_C, \text{ Вт}$	$p_O, \text{ Вт}$	$B, \text{ Тл}$	$j_2, \text{ А/мм}^2$
21 × 36	480	58	$\tau_m = 50$ град ($U < 0,1$)	190	15	5,5	1,6	2,2
21 × 40	570	64		200		6,1		2,1
21 × 45	680	72		220		6,9		2,1
25 × 40	1000	95	$\tau_m = 50 \text{ К}$ $\delta U < 0,1$	300	18	8,5	1,6	1,9
25 × 45	250	110		340		9,6		
25 × 50	1400	120		360		11		
28 × 40	1700	135		430		11		
28 × 45	2000	155	480	13				
28 × 50	2400	170	510	14				

Примечания:

1 Данные рассчитаны для низковольтных т.м.м. с несколькими пропитанными обмотками из медных эмальпроводов без учета контакта с шасси.

2 Величины P_T, B, j_2, p_C, p_O приведены для типовых условий: $\delta U = 0,1$ или $\tau_m = 50 \text{ К}$, сталь холоднокатаная 3411 - 3412 (0,35 мм) при $f = 50 \text{ Гц}$.

3 Вместо пяти последних групп ряда ПЛР при частоте 50 Гц целесообразно применить сердечники ПЛ или ПЛМ. по табл. П12 по табл. П18.

ПРИЛОЖЕНИЕ Е

(справочное)

ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ ХОЛОДНОКАТАНЫХ АНИЗОТРОПНЫХ СТАЛЕЙ

**Таблица Е.1 – Характеристики электротехнической
холоднокатаной анизотропной стали (ГОСТ 21427.1-75)**

Марка стали	Толщина, мм	Удельные потери, Вт/кг		Магнитная индукция, Тл, при напряжённости магн. поля, А/м			
		$P_{1/50}$	$P_{1,5/50}$	100	250	500	2500
3411	0,5	1,1	2,45	1,0	1,50	1,64	1,75
	0,35	0,8	1,75				
3412	0,5	0,95	2,1	1,12	1,58	1,70	1,80
	0,35	0,7	1,5				
3413	0,5	0,8	1,75	1,12	1,58	1,70	1,85
	0,35	0,6	1,3				
3414	0,5	0,7	1,5	1,60	1,70	1,75	1,88
	0,35	0,5	1,1				
3415	0,35	0,46	1,03	1,61	1,71	1,77	1,90
	0,3	–	0,97				

**Таблица Е.2 – Характеристики ленты электротехнической
холоднокатаной анизотропной стали (ГОСТ 21427.4-78)**

Марка стали	Толщина, мм	Удельные потери, Вт/кг		Магнитная индукция, Тл, при напряжённости магнитного поля, А/м					
		$P_{1/400}$	$P_{1,5/400}$	40	80	200	400	1000	2500
3421	0,15	10	23	0,5	0,8	1,1	1,3	1,45	1,7
	0,08	10	22	0,4	0,75	1,1	1,25	1,45	1,7
	0,05	10	21	0,4	0,75	1,1	1,25	1,45	1,7
3422	0,15	9	20	0,6	0,95	1,25	1,4	1,55	1,75
	0,08	8,5	19	0,55	0,9	1,25	1,35	1,55	1,75
	0,05	8,5	19	0,55	0,9	1,25	1,35	1,55	1,75
3423	0,15	8	19	0,8	1,1	1,4	1,55	1,65	1,82
	0,08	7,5	17	0,8	1,05	1,4	1,5	1,65	1,82
	0,05	–	17	0,8	1,05	1,4	1,5	1,65	1,82
3424	0,15	8	18	0,8	1,1	1,4	1,55	1,65	1,82
	0,08	7,5	16	0,8	1,1	1,4	1,55	1,65	1,82
	0,05	–	16	0,8	1,1	1,4	1,55	1,65	1,82
3425	0,15	7,5	17	1,1	1,35	1,5	1,6	1,75	1,82

	0,08	–	15	1,05	1,3	1,5	1,65	1,75	1,82
	0,05	–	15	1,05	1,3	1,5	1,65	1,75	1,82

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

B – коэффициент, учитывающий участие сердечника и шасси в охлаждении катушки.

G – коэффициент неравномерности нагрева обмоток трансформатора.

OB – относительная влажность.

ζ_C и ζ_O – цены материалов сердечника и провода обмотки.

$\zeta_K, \zeta_C, \zeta_T$ – стоимость материалов обмоток, сердечника и трансформатора.

a, b – основные габаритные размеры броневых, стержневых и тороидальных сердечников (толщина и ширина керна).

A, B, H – габаритные размеры броневых и стержневых трансформаторов.

B – рабочая индукция в магнитопроводе.

B_S – максимально допустимая рабочая индукция в магнитном материале.

c – внутренний диаметр тороидального сердечника.

c, h – основные габаритные размеры броневых и стержневых сердечников (ширина и высота окна).

C_K – толщина намотки катушки.

$C_{K,B}, C_{K,H}$ – внутренняя и наружная толщина намотки катушки ТТ.

$C_{O,B}, C_{O,H}$ – толщина обмотки с внутренней и наружной стороны ТТ.

C_{O_i} – радиальная толщина намотки i -ой обмотки;

C_P – коэффициент, учитывающий отличие габаритной мощности ТММ от электромагнитной.

c_p – коэффициент, учитывающий отличие габаритной мощности ТММ от электромагнитной для типовых условий.

d – диаметр провода без изоляции.

$d_{B,0}$ – диаметр окна обмотки после наложения корпусной изоляции в ТТ.

$d_{B,i}$ – диаметр окна обмотки ТТ после намотки i -ой обмотки.

d_i – диаметр провода без изоляции i -ой обмотки.

$d_{из,i}$ – диаметр провода с изоляцией i -ой обмотки.

d_0 – диаметр технологического отверстия ТТ.

D – наружный диаметр тороидального сердечника.

$D_{H,0}$ – наружный диаметр тороидального сердечника после наложения корпусной изоляции.

$D_{H,i}$ – наружный диаметр ТТ после намотки i -ой обмотки.

$D_{диф}$ – коэффициент диффузии материала покрытия.

$D_{НАР} = D_{ТТ}$ – наружный диаметр тороидального дросселя.

E_1 – ЭДС первичной обмотки.

f – частота питающего напряжения трансформатора.

G_K, G_C, G_T – масса катушки, сердечника и трансформатора.

$G_{КТ}$ – масса катушки для типового трансформатора.

$G^{(t)}$ – рассчитанный габаритный критерий ТП по падению напряжения.

$G_T^{(U)}$ – типовой габаритный критерий (ТП на типовом сердечнике) по падению напряжения.

$G_{ТВР}^{(T)}$ – рассчитанный габаритный критерий ТП по температуре перегрева при ТВР.

$G_{ТВР}^{(T)}$ – типовой габаритный критерий (ТП на типовом сердечнике) по температуре перегрева при ТВР.

$G_{ТЕР}^{(T)}$ – рассчитанный габаритный критерий ТП по температуре перегрева при ТЕР.

$G_{ТЕР}^{(T)}$ – типовой габаритный критерий (ТП на типовом сердечнике) по температуре перегрева при ТЕР.

h_K – высота намотки катушки.

H – напряженность магнитного поля, высота ТТ.

H_C – напряженность магнитного поля сердечника при рабочей индукции.

H_{min} – минимальное атмосферное давление воздуха, заданное в ТЗ.

$i_1 = I_1/I_{РАБ}$ – относительный первичный ток.

$I_{РАБ}$ – приведенный рабочий ток.

I_0 – полный ток намагничивания.

I_{0A} – активная составляющая тока намагничивания.

I_{0P} – реактивная составляющая тока намагничивания.

I_1 – полный ток первичной обмотки.

I_{2i} – токи вторичных обмоток.

j – средняя плотность тока в обмотках.

j_1 – плотность тока в первичной обмотке.

J_2 – плотность тока во вторичных обмотках.

K_B и K_V – коэффициенты выпучивания и неплотности укладки провода в ТТ.

K_{Bi} – корректирующий коэффициент приведения i -й вторичной обмотки к первичной, зависящий от схемы выпрямления.

K_H – коэффициент нагрева, учитывающий увеличение сопротивления провода обмотки при нагреве.

$K_{НЕП}$ – коэффициент неплотности намотки (укладки) провода в осевом направлении.

K_O – общий коэффициент заполнения окна сердечника проводниковым материалом.

K_{OT} – коэффициент заполнения окна обмоткой для типового трансформатора.

$K_{РАЗБ}$ – коэффициент разбухания обмотки в радиальном направлении.

K_C – коэффициент заполнения сердечника магнитным материалом.

K_T – коэффициент увеличения потерь, обусловленный обработкой материала при изготовлении сердечника.

$K_{Ц}$ – коэффициент пересчета цены материалов.

$K_{$.70}$ – курс доллара по отношению к рублю в 1970-е годы.

l_{oi} – длина среднего витка i -ой обмотки.

l_C – длина средней силовой линии магнитопровода.

$m_{ИЗ}$ – число слоев изоляции (межобмоточной, наружной) в ТТ;

m_1 – коэффициент, учитывающий участие шасси в охлаждении катушки.

$n_{СЛ.i}$ – число слоев i -ой обмотки.

$n_{СЛ.В.i}, n_{СЛ.Н.i}$ – число слоев i -ой обмотки с внутренней и наружной стороны ТТ.

p'_1 – удельные потери в материале сердечника при индукции $B = 1$ Тл.

$p'_{1/400}$ – удельные потери в магнитном материале при индукции $B = 1$ Тл при частоте $f = 400$ Гц.

$p'_{1,5/400}$ – удельные потери в магнитном материале при индукции $B = 1,5$ Тл при частоте $f = 400$ Гц.

P – парциальное давление насыщенных водяных паров при определенной температуре.

P_T – габаритная мощность трансформатора.

P_3 – парциальное давление водяных паров при максимальной влажности, заданной в ТЗ

$P_{КР}$ – критическое значение парциального давления водяных паров внутри покрытия.

P_O – активные потери в обмотке.

P_C – активные потери в сердечнике.

P_0 – парциальное давление водяных паров в условиях консервации.

P_1 – удельные потери в сердечнике при индукции $B = 1$ Тл.

P_2 – мощность нагрузки.

P_{2i} – мощность i -ой вторичной обмотки.

$q_{ПР.i}$ – сечение стандартного провода i -ой обмотки.

r_i – активное сопротивление i -ой обмотки.

$R_{В.i}, R_{Н.i}$ – расстояние от корпусной изоляции катушки до середины i -й обмотки внутри и снаружи тора ТТ.

$q_{ПР}$ – сечение стандартного провода.

$q_{ПР.Р}$ – сечение провода расчетное.

Q_O – площадь окна сердечника.

Q_C – площадь сечения сердечника.

S_O, S_C – площади охлаждения обмоток и сердечника.

$t_{C.min}, t_{C.max}$ – минимальная и максимальная температура среды, заданная в ТЗ.

$U_{ИСП}$ – испытательное напряжение обмоток трансформатора.

U_i – действующие значения напряжений на обмотках.

U_{mi} – амплитудные значения рабочего напряжения на обмотках ТП.

U_1 – напряжение питающей сети трансформатора.

U_{2i} – напряжения вторичных обмоток;

V_T – габаритный объем трансформатора.

V_K – объем катушки.

V_C – объем сердечника.

$W_{ОСТ.В.in}, W_{ОСТ.Н.in}$ – остаточное число витков в $(n+1)$ -ом слое с внутренней и наружной части i -ой обмотки ТТ.

$W_{СЛ.i}$ – число витков в слое i -ой обмотки.

$W_{СЛ.В.in}$ – число витков в n -ом слое с внутренней части i -ой обмотки ТТ.

- $W_{СЛ.Н.ij}$ – число витков в j -ом слое с наружной части i -ой обмотки ТТ.
 W_i – число витков i -ой обмотки.
 W_1 – число витков первичной обмотки.
 W_{2i} – число витков i -ой вторичной обмотки.
 $x = b/a$ – отношение ширины сердечника к базовому размеру (к толщине).
 α – коэффициент, пропорциональный коэффициенту теплоотдачи.
 α_0 – коэффициент, пропорциональный коэффициенту теплоотдачи для типовых конструкций в нормальных условий эксплуатации.
 α_T – температурный коэффициент увеличения удельного сопротивления материала провода.
 α_{oh} – коэффициент, пропорциональный коэффициенту теплоотдачи для конкретных типоконструкций ТП в нормальных условий эксплуатации.
 β – отношение площадей охлаждения сердечника и катушек.
 δ_C – величина немагнитного зазора.
 δ_T – минимальная величина технологического канала в окне сердечника.
 δ_{TT} – допустимый диаметр технологического отверстия в ТТ.
 δU – допустимое падение напряжения в обмотках .
 δU_P – расчетное падение напряжения в обмотках .
 ϵ – отношение плотности токов во вторичных обмотках к плотности тока в первичной обмотке.
 ϵ_{TT} – допустимый запас по технологическому отверстию в ТТ.
 ϵ_0 – оптимальное отношение плотности токов во вторичных обмотках к плотности тока в первичной обмотке для ТЕР.
 γ_0, γ_C – плотности материалов обмотки и сердечника.
 λ - эквивалентный коэффициент теплопроводности катушки.
 ν – отношение потерь в сердечнике к потерям в обмотках.
 ν_0 – оптимальное отношение потерь в сердечнике к потерям в обмотках.
 ρ_{20} – удельное сопротивление материала обмоточного провода при 20 °С.
 τ – средний перегрев обмоток, срок службы дросселя.
 τ_m – максимальная температура перегрева обмоток.
 $\delta_{ТЗ}$ – технологический зазор между каркасом и сердечником.
 δ_{TT} – допустимый диаметр технологического отверстия в ТТ.
 $\Delta_{ИЗ}$ – толщина ленты межобмоточной или наружной изоляции в ТТ.
 Δ_K – толщина каркаса (гильзы).
 $\Delta_{КОР}$ – толщина корпусной изоляции.
 Δ_L – толщина ленты сердечника.
 $\Delta_{НАР}$ – толщина наружной изоляции.
 $\Delta_{НАР.В}, \Delta_{НАР.Н}$ – толщина наружной изоляции с внутренней и с наружной стороны обмотки ТТ.
 $\Delta_{ПОКР}$ – толщина влагозащитного покрытия.

$\Delta_{сл}$ – толщина межслоевой изоляции.

$\Delta_{тз}$ – величина технологического зазора между каркасом и сердечником.

Δ_{01} – толщина подложки – изоляции между каркасом (гильзой) и первичной обмоткой.

Δ_{12} – толщина межобмоточной изоляции (между первичной и вторичной обмотками);

$\Delta_{Ск}$ – технологический зазор между катушкой и сердечником для бронированного СД и между катушками для стержневого ТП.

$\Delta h/2$ – толщина щечек каркаса.

$\Delta\alpha$ – коэффициент, учитывающий ухудшение теплообмена трансформатора при пониженном давлении окружающей среды.

λ – эквивалентный коэффициент теплопроводности катушки.

ПРИНЯТЫЕ СОКРАЩЕНИЯ ТЕРМИНОВ

БТ – броневой трансформатор.

ИВЭП – источник вторичного электропитания.

ЛС – ленточный сердечник.

ОЛ – тороидальный ленточный сердечник.

СТ – стержневой трансформатор.

ПЛ – стержневой ленточный сердечник.

РЭА – радиоэлектронная аппаратура.

РЭС – радиоэлектронные средства.

ТВР – тепловой вынужденный режим.

ТЕР – тепловой естественный режим.

ТЗ – техническое задание на проектирование.

ТММ – трансформатор малой мощности.

ТП – трансформатор питания.

ТТ – тороидальный трансформатор.

ТУ – технические условия.

ТЭП – технико-экономические показатели.

ШЛ – броневой ленточный сердечник.

ШС – шихтованный сердечник.