

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

Кафедра конструирования узлов и деталей РЭА (КУДР)

УТВЕРЖДАЮ
Зав. кафедрой КУДР

_____ 2011 г.

Курсовое проектирование

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

Разработчик
Доцент кафедры КУДР
_____ Н.И.Кузевных

_____ 2011 г.

СОДЕРЖАНИЕ

1	ВВЕДЕНИЕ	3
2	ТЕМАТИКА И СОДЕРЖАНИЕ КУРСОВЫХ РАБОТ.....	3
3	РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОЙ РАБОТЫ.....	4
3.1	Анализ технического задания на проектирование	4
3.1.1	Общие рекомендации.....	4
3.1.2	Выбор конструкции.....	4
3.1.3	Выбор конструкционных материалов и обмоточных проводов..	6
3.1.4	Выбор электроизоляционных материалов.....	8
3.1.5	Выбор защитных материалов.....	10
3.2	Предварительный расчет ТЭП конкурентных вариантов и выбор оптимального варианта	13
3.3	Электрический и конструктивный расчёт оптимального варианта...	14
3.4	Уточнение электромагнитных параметров и расчет ТЭП.....	15
3.5	Разработка конструкции.....	15
3.6	Критический анализ результатов проектирования.....	15
4	ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ ПОЯСНИТЕЛЬНОЙ ЗАПИСКИ	16
5	РАСПРЕДЕЛЕНИЕ БЮДЖЕТА ВРЕМЕНИ И РЕЙТИНГОВАЯ ОЦЕНКА	17
6	ЗАЩИТА КУРСОВОЙ РАБОТЫ	18
7	МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ПРОЕКТИРОВАНИЮ ТП и СД ...	19
7.1	Методические указания по проектированию ТП.....	19
7.1.1	Этапы проектирования ТП	19
7.1.2	Анализ ТЗ и выбор конкурентных вариантов конструкций ТП..	19
7.1.3	Предварительный расчет конкурентных вариантов и выбор оптимальной конструкции трансформатора	24
7.1.4	Электрический расчет ТП	25
7.1.5	Конструктивный расчет ТП	26
7.1.6	Уточнение электромагнитных параметров и расчет технико-экономических показателей ТП	28
7.2	Методические указания по проектированию СД.....	29
7.2.1	Этапы проектирования сглаживающих дросселей.....	29
7.2.2	Анализ ТЗ и выбор конкурентных вариантов конструкций СД..	29
7.2.3	Предварительный расчет конкурентных вариантов и выбор оптимальной конструкции дросселя.....	31
7.2.4	Электрический расчет СД	33
7.2.5	Конструктивный расчет ТП	34
7.2.6	Уточнение электромагнитных параметров и расчет технико-экономических показателей СД	36
	ОСНОВНАЯ РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА.....	37

1 ВВЕДЕНИЕ

В процессе разработки радиоэлектронных средств (РЭС) зачастую не удается обеспечить выполнение требований технического задания (ТЗ), ограничившись выбором лишь стандартных радиокомпонентов. Известно, что стандартные радиокомпоненты, как правило, не могут удовлетворить всей совокупности предъявляемых к проектируемым РЭС технических и технико-экономических показателей (ТЭП). Так, например, при жестких ограничениях по массогабаритным показателям часто приходится использовать нестандартные радиоэлементы и функциональные устройства. Поэтому радиоинженер должен уметь проектировать нестандартные узлы и радиоэлементы, отвечающие оптимальным образом ТЗ.

Целью курсового проектирования по дисциплине “Перспективная элементная база РЭС” (ПЭБРЭС) является: закрепление теоретического материала курса ПЭБРЭС; изучение методологии проектирования нестандартных радиокомпонентов; приобретение практических навыков работы с технической и справочной литературой и нормативной документацией; приобретение навыков оформления конструкторской документации.

В задачи курсового проектирования ставится овладение основами современных системных методов проектирования (расчета) функциональных узлов и электрорадиоэлементов, оптимальных по заданным ТЭП, в том числе и с применением ПЭВМ. Проектирование включает в себя: анализ технического задания, выбор оптимального варианта конструкции устройства, электрический и конструктивный расчеты, уточнение электромагнитных и конструктивных параметров и расчет технико-экономических показателей.

2 ТЕМАТИКА И СОДЕРЖАНИЕ КУРСОВЫХ РАБОТ

Курсовое проектирование ведется по следующим тематикам:

- Проектирование трансформаторов питания, сглаживающих дросселей, сглаживающих фильтров и др. функциональных устройств вторичных источников электропитания.
- Проектирование устройств фильтрации, селекции и временной задержки радиосигналов.
- Проектирование высокочастотных катушек индуктивности.
- Проектирование функциональных устройств РЭС специального назначения.

Пояснительная записка должна иметь следующие разделы:

- техническое задание на проектирование;
- содержание;
- введение;

- анализ ТЗ, предварительное обоснование и выбор конкурентных вариантов конструкций и конструктивных решений;
- предварительный расчет технико-экономических показателей конкурентных вариантов и выбор оптимальной конструкции;
 - электрический расчет оптимального варианта;
 - конструктивный расчет оптимального варианта;
 - уточнение электромагнитных параметров и технико-экономических показателей;
 - заключение;
 - список литературы.

Объем пояснительной записки – 20...25 страниц машинописного текста шрифтом 14 через 1-1,5 интервала на листах формата А4.

3 РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

3.1 Анализ технического задания на проектирование

3.1.1 Общие рекомендации

Выполнение курсовой работы необходимо начинать с анализа технического задания и изучения технической литературы. Список основной рекомендуемой литературы по указанной выше тематике приведен в конце методического пособия. Но отдельные вопросы курсового проектирования в основной литературе изложены либо поверхностно, либо вообще не рассматриваются. Поэтому для более глубокого знакомства с состоянием отдельных вопросов, например, защиты электрических обмоток и конструктивных элементов проектируемого устройства от внешних климатических и механических воздействий, необходимо обращаться к специальной литературе.

На основании анализа технического задания и рекомендаций из технической и справочной литературы необходимо: выбрать и обосновать конкурентные конструкции разрабатываемого устройства; выбрать и обосновать материалы элементов конструкции – магнитные, проводниковые, изоляционные, конструкционные и др. материалы; выбрать методику расчета и наметить пути решения задачи, поставленной в задании на курсовое проектирование. Все обоснования должны сопровождаться ссылками на соответствующую литературу.

Более конкретные рекомендации по анализу технического задания рассмотрим на примерах проектирования функциональных узлов источников вторичного электропитания, которые наиболее часто приходится разрабатывать на практике.

3.1.2 Выбор конструкции

Конструкция разрабатываемого устройства должна выбираться по ос-

новным определяющим параметрам с учетом наложенных ограничений по технико-экономическим показателям. Так, например, при выборе конструкции трансформатора питания (ТП) определяющими являются габаритная мощность, частота питающей сети и требования к массогабаритным показателям и стоимости. Для ТП малой и средней мощности при повышенных частотах ($f \geq 400 \text{ Гц}$) оптимальными по массогабаритным показателям являются броневые и тороидальные конструкции, а для ТП большой мощности – стержневые и тороидальные. Конкретные рекомендации по выбору конструкции трансформаторов питания наиболее полно изложены в работе [1], приведены в методическом пособии [2] и в подразделе 7.1.

Выбор конструкции сглаживающего дросселя (СД) определяется, главным образом, величиной индуктивности и постоянной составляющей тока, а также требованиями к технико-экономическим показателям. Известно, что при небольших энергоёмкостях СД ($W_M = L \cdot I_0^2 / 2$) предпочтение следует отдавать броневой конструкции, а при больших – стержневой. Тороидальная конструкция предпочтительна для СД малой и средней энергоёмкости при жестких ограничениях по высоте конструкции (плоский монтаж) и по массе. Однако тороидальные СД самые нетехнологичные и дорогие по сравнению с броневыми и стержневыми. Но четких рекомендаций о выборе той или иной конструкции СД в известной литературе пока не имеется. Для ответа на данный вопрос необходимо провести расчет и сравнить конкурентоспособные варианты конструкций. При жестких требованиях к массогабаритным показателям следует выбирать ненормализованные сердечники с оптимальной геометрией. С рекомендациями по выбору конкурентных конструкций СД можно ознакомиться в работах [3-5], в методическом пособии [6] и в подразделе 7.2.

Выбор конструкции сглаживающего фильтра (СФ) практически сводится к выбору элементной базы – конденсаторов и сглаживающих дросселей, оптимальным образом соответствующих требованиям ТЗ. Выбрать же оптимальную схему СФ можно только после предварительного расчета технико-экономических показателей конкурентных вариантов. Конкретные рекомендации по выбору конкурентных вариантов схем СФ и конкурентных типов конденсаторов и сглаживающих дросселей приведены в [5].

Конструкция согласующего трансформатора выбирается, прежде всего, исходя из требований к частотным и нелинейным искажениям трансформатора. Чем жестче требования по нелинейным искажениям и частотным искажениям на низких частотах, тем больше должны быть габариты магнитопровода. А при больших габаритах наилучшими технико-экономическими показателями обладают трансформаторы стержневого типа. С другой стороны, усиление требований к частотным искажениям на верхней частоте, связано с уменьшением индуктивности рассеяния и собственной емкости трансформатора. При равных условиях наименьшей индуктивностью

рассеяния обладает тороидальные трансформаторы с распределенными обмотками, а наибольшими - пластинчатые трансформаторы броневого типа. Увеличение габаритов трансформатора приводит к увеличению индуктивности рассеяния и собственной емкости. Наиболее систематизировано вопрос выбора конструкции трансформаторов согласования изложен в работах [7-9].

3.1.3 Выбор конструкционных материалов и обмоточных проводов

Конструкционные материалы трансформаторов и дросселей можно условно разделить на основные и вспомогательные. К основным относятся материалы сердечников и провода обмоток, а все остальные относятся к вспомогательным. Выбор основных материалов определяется главным образом требованиями к массогабаритным показателям и стоимости, а также назначением разрабатываемого элемента.

Для изготовления магнитопроводов для трансформаторов питания и сглаживающих дросселей, используемых в области низких и средних частот (от 50 Гц до 10 кГц), широкое применение получили электротехнические стали. В последнее время для трансформаторов питания промышленной частоты и низкочастотных сглаживающих дросселей предпочтение отдается ленточным сердечникам из холоднокатаной текстурованной стали марок 3411...3415 ГОСТ 21427.1-83 с толщиной ленты 0,35 мм. Однако для трансформаторов и дросселей бытового назначения, минимальных по стоимости, конкурентными могут оказаться также шихтованные сердечники из горячекатаных изотропных сталей марок 1411...1413 и 1511...1514 ГОСТ 21427.3-75.

Для трансформаторов питания и сглаживающих дросселей повышенной частоты (от 400 Гц до 10 кГц) наиболее предпочтительными являются ленточные магнитопроводы из холоднокатаных текстурованных сталей марок 3421...3425 ГОСТ 21427.4-78 с толщиной ленты 0,20; 0,15; 0,08 и 0,05 мм.

ТП и СД высокой частоты (несколько десятков килогерц и выше) реализуются, как правило, на тороидальных прессованных сердечниках из марганец-цинковых и никель-цинковых ферритов марок 700НМ...3000НМ и 400НН...2000НН (ГОСТ 16541-76 и ГОСТ 14208-77).

В согласующих трансформаторах наряду с сердечниками из электротехнических сталей широкое применение получили сердечники из никелевых сплавов (пермаллои) марок 45Н, 50Н, 79НМ, 80НХС ГОСТ 10160-75 и др.

Обмоточные провода изготавливаются либо из меди, либо из алюминия. Медные провода, по сравнению с алюминиевыми, обладают меньшим удельным сопротивлением, существенно большей механической прочностью и высокой технологичностью в электромонтаже. Но удельная плотность меди в три раза больше, чем у алюминия. Кроме того, медь более

дорогая и дефицитная. В трансформаторах и дросселях для спецтехники при оптимизации по массогабаритным показателям используется преимущественно медный обмоточный провод.

Для обмоток ТП относительно небольших мощностей и СД небольшой энергоемкости обычно используют медный провод круглого сечения. Но при больших токах предпочтение следует отдавать проводам прямоугольного сечения, а в некоторых случаях ленточным. Использование алюминиевых обмоточных проводов ограничено, главным образом из-за их нетехнологичности и низкой механической прочности, бытовой РЭА при минимизации по стоимости.

Обмоточные провода изолируются, чтобы исключить витковые замыкания. В трансформаторах и дросселях преимущественное применение получили обмоточные провода с эмалевой изоляцией (медные и алюминиевые). Так как витковая изоляция наиболее чувствительна к температуре, то все обмоточные провода делятся по классу нагревостойкости. Обмоточные провода, разработанные до 1987 г., согласно ГОСТ 8865-70 делятся на 7 классов нагревостойкости, как изоляционные материалы (см. пункт 3.1.4). На новые разработки обмоточных проводов согласно ГОСТ 26615-85 установлены следующие температурные индексы (классы нагревостойкости): до 105 °С, до 120 °С, до 130 °С, до 155 °С, до 180 °С, до 200 °С, до 220 °С, свыше 220 °С. Это означает, что данные провода должны надежно работать при указанной температуре не менее 20 тысяч часов. При увеличении рабочей температуры сверх установленной на 10 °С приводит к сокращению их срока службы в два раза.

В трансформаторах и дросселях 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) – 0,05-2,50 мм. Провода марки ПЭМ более стойкие к трансформаторному маслу;

- ПЭВТЛ-1, ПЭВТЛ-2 (ТУ 16.505.446-77) – 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 полиэтилентерефталатного 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 (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 – *A* (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 – *B* (до 130 °С), диаметры проводов (без изоляции) – 0,20-1,32 мм.

Обмоточные провода с эмалевой изоляцией, разработанные до 1987г., сохраняют свою прежнюю систему обозначений: 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.

На обмоточные провода с эмалевой изоляцией, разработанные после 1987г., в соответствии с ГОСТ 26615-85 введена новая система обозначений – буквенно-цифровая. Например, провод ПЭАИ1-200 0,500 - провод эмалированный (ПЭ) из медной проволоки (без обозначения, А - алюминиевый), круглого сечения (без обозначения, П – прямоугольного сечения) с полиамидимидной изоляцией (АИ) с толщиной изоляции по типу 1 (по типу 2 цифра опускается), с температурным индексом 200°С и номинальным диаметром проволоки 0,5 мм [14].

Подробные справочные данные и сведения о свойствах магнитных материалов и обмоточных проводов, а также рекомендации по их выбору можно найти в справочниках [12-14] и в соответствующей технической литературе по проектированию разрабатываемых устройств.

3.1.4 Выбор электроизоляционных материалов

Электроизоляционные, пропиточные, защитные материалы и материалы декоративных покрытий выбираются исходя из требований к электрической прочности, условий эксплуатации и назначения устройств.

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.

В трансформаторах и дросселях изоляционные материалы используются в основном в катушках. В них можно выделить следующие виды изоляции: корпусную – изоляцию между обмоточными проводами и сердечником (каркас, гильза, изоляционный буртик); витковую – изоляцию проводов; межслоевую – изоляцию между слоями обмотки; межобмоточную – изоляцию между различными обмотками; наружную – изоляцию между наружным слоем катушки и сердечником и элементами стяжки и крепления трансформатора или дросселя. Если катушка секционированная, то добавляется еще изоляция между секциями.

Каркасы и гильзы в настоящее время изготавливаются преимущественно из термопластичных, термостойких, негорючих материалов методом горячего литья под давлением. Предпочтение отдается литым каркасам, прежде всего, потому, что процесс изготовления их автоматизирован, а в качестве исходного материала используются в основном недорогие и недефицитные пластмассы. Но при высоких рабочих температурах и жестких требованиях к механической прочности каркасы изготавливают из реактопластов (термореактивных пластмасс) методом горячего прессования. Однако надо учитывать то, что горячее прессование – процесс нетехнологичный и неэкологичный. К тому же реактопласты, как правило, значительно дороже термопластов. Поэтому прессованные каркасы дороже литых. Подробно со свойствами и областями применения пластмасс можно ознакомиться в справочнике [11].

В качестве межслоевой, межобмоточной и наружной изоляции используются различные электроизоляционные бумаги, стеклоткань, лакоткань, пленка полиэтилентерефталатная и др. материалы.

Бумага конденсаторная КОН - 1 и КОН - 2 (ГОСТ 1908-82) выпускается толщиной от 4 до 30 мкм, класс нагревостойкости А 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 А при наличии пропитки. Используется в качестве межслоевой изоляции.

Бумага намоточная ЭН (ГОСТ 1931-80) выпускается толщиной 50 и 70 мкм, класс нагревостойкости А-В 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 А-В при наличии соответствующей пропитки. Используется в качестве межслоевой и межобмоточной изоляции.

Бумага кабельная К-080, К-120, К170 (ГОСТ 23456-83) выпускается толщиной 80, 120 и 170 мкм, класс нагревостойкости А при наличии пропитки. Используется в качестве межслоевой, межобмоточной и наружной изоляции.

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.

Электрокартон электроизоляционный марки ЭВ и ЭВТ (ГОСТ 2824-75) выпускается рулонный толщиной 0,1; 0,15; 0,2; 0,25; 0,3; 0,35; 0,4; 0,5 мм. Используется в качестве немагнитных прокладок в сглаживающих дросселях, а также в качестве клиньев для закрепления катушек на керне сердечника. Подробнее со свойствами и областями применения изоляционных материалов можно ознакомиться в справочнике [11].

3.1.5 Выбор защитных материалов

Для защиты от воздействия влаги и агрессивной среды, повышения электрической прочности и надежности катушки трансформаторов и дросселей пропитываются, обволакиваются и заливаются. Критическими условиями для изоляции моточных изделий по влажности являются: относительная влажность окружающей среды $ОВ = 90 \%$ при температуре $30 \text{ }^\circ\text{C}$. При жестких условиях эксплуатации (бортовая, судовая и др. специальная РЭА) для пропитки, обволакивания и заливки катушек и для обволакивания трансформаторов и дросселей предпочтение отдается компаундам. В ТП и СД, предназначенных для работы в нежестких климатических условиях (наземная, переносная и др. РЭА), для пропитки катушек используются пропиточные лаки, а для обволакивания трансформаторов и дросселей – эмали. Они менее дорогие и дефицитные по сравнению компаундами. Не рекомендуется пропитывать катушки трансформаторов и дросселей, предназначенных для бытовой аппаратуры, при ограничениях по стоимости, так как этот процесс весьма трудоемкий и дорогостоящий. Обычно ограничиваются лишь защитно-декоративным покрытием от коррозии: сердечника – эмалью, а элементов стяжки и крепления – химическим покрытием, например, кадмированием.

Из *пропиточных компаундов* широкое применение нашли марки:

- КГМС-1 – термореактивный, обладает хорошей адгезией, механической прочностью и водостойкостью, пропитка производится при комнатной температуре, полимеризация – при $60\text{-}100 \text{ }^\circ\text{C}$, диапазон рабочих температур от минус 60 до плюс $120 \text{ }^\circ\text{C}$;
 - КГМС-2 – то же, но более эластичный;
 - КП-10 (ТУ ОАБ.504.017) – термореактивный, обладает хорошей цементацией и механической прочностью, пропитка и полимеризация при комнатной температуре, диапазон рабочих температур от минус 50 до плюс $120 \text{ }^\circ\text{C}$;
 - КП-18 – то же, но более стабилен, нагревостойкость до $130 \text{ }^\circ\text{C}$;
 - К-43 – термореактивный, обладает высокой влагостойкостью в области высоких температур, пропитка производится при температуре $55\text{-}65$

°C, полимеризация – при комнатной температуре, диапазон рабочих температур от минус 60 до плюс 180 °C;

- МБК-1 (ТУ 6-16-2431-80) – термореактивный компаунд на основе метакрилового эфира, обладает малым коэффициентом усадки при охлаждении, пропитка производится в вакууме при температуре 50-60 °C, диапазон рабочих температур от минус 60 до плюс 120 °C при использовании кварцевого наполнителя, предназначен для пропитки, обволакивания и заливки катушек, а также для обволакивания трансформаторов и дросселей, работающих в условиях высокой влажности.

Для обволакивания или заливки катушек и для обволакивания трансформаторов и дросселей нашли применение термореактивные компаунды:

- МБК-1 (характеристику см. выше);
- К-115 (ТУ 6-05-1251-75) – эпоксидный компаунд холодного отверждения, обладает хорошей адгезией, механической прочностью и водостойкостью, предназначен для обволакивания и заливки без кожуха катушек, трансформаторов и дросселей. Диапазон рабочих температур от минус 60 до плюс 120 °C;

- Висксинт ПК-68 (ТУ 38-103-177-73) – термостойкий, эластичный, прозрачный компаунд с высокими диэлектрическими свойствами, стойкий к повышенной влажности. Предназначен для заливки трансформаторов и дросселей с ферритовыми и пермалловыми сердечниками, работающих в диапазоне температур от минус 60 до плюс 200 °C, в том числе в тропических условиях;

- ЭП-49А/1, ЭП-49А/2 (ТУ 6-05-1420-75) – порошкообразный компаунд коричневого или черного цвета предназначен для обволакивания методом напыления трансформаторов и дросселей, работающих в тропических условиях при температуре от минус 60 до плюс 130 °C. Температура отверждения (обжига) – 130...150 °C.

Для пропитки катушек трансформаторов и дросселей широко используются лаки:

- МЛ-92 (ГОСТ 15865-70) – электроизоляционный, механически прочный, маслостойкий, эластичный лак с хорошей адгезией. Предназначен для пропитки обмоток, работающих при температуре от минус 60 до плюс 130 °C;

- ФЛ-98 (ГОСТ 12294-76) – алкиднофенольный, термореактивный лак. Обладает хорошей цементирующей способностью, маслостоек. Предназначен для пропитки обмоток, работающих при температуре от минус 60 до плюс 130 °C;

- ПЭ-933Л (ТУ 6-10-714-75) – пропиточный лак горячей сушки, имеет хорошие цементирующие свойства, влагостоек. Отличается повышенной нагревостойкостью и низким коэффициентом старения. Применяется для

пропитки катушек, работающих при температуре от минус 60 до плюс 155 °С и в условиях тропиков;

- КО-916К (ТУ 6-02-690-76) – кремнийорганический, модифицированный полиэфиром, электроизоляционный лак, предназначенный для пропитки обмоток. Для изделий морского и тропического исполнения, работающих в диапазоне температур от минус 60 до плюс 200 °С.

Для защитных и декоративных покрытий и нанесения надписей используются преимущественно *эмали*, реже *композиции*:

- ПФ-115 (ГОСТ 6465-76) – эмали глянцевые: белая (б), черная (ч), красная (к), синяя (с), желтая (ж), светло-зеленая (св.-з). Применяется для защитно-декоративного покрытия и для нанесения надписей и указателей. Диапазон рабочих температур – от минус 60 до плюс 120 °С;

- ЭП-274 (ТУ 6-10-1039-75) – эмаль ч., ср., полуглянцевая, с высокой адгезией к металлам, тропикоустойчивая. Применяется в качестве электроизоляционного и антикоррозийного покрытия в диапазоне рабочих температур – от минус 60 до плюс 180 °С;

- ЭП-91 (ГОСТ 15943-80) – эмаль зеленая, глянцевая, с высокой адгезией к металлам. Применяется в качестве электроизоляционного и антикоррозийного покрытия в диапазоне рабочих температур – от минус 60 до плюс 180 °С;

- ЭП-91 (ГОСТ 22396-77) – эмаль темно-зеленая. Применяется в качестве защитного покрытия в диапазоне рабочих температур – от минус 60 до плюс 150 °С;

- ОС-12-01 (ТУ 84-725-78) – композиция зеленая, матовая, устойчива к грибку. Применяется в качестве защитного покрытия в условиях повышенных температур – от минус 60 до плюс 400 °С;

Некоторые дополнительные сведения об этих материалах имеются в приведенной здесь литературе [1-6], а более подробно о свойствах и областях их применения изложено в литературе по электротехническим материалам и в соответствующих стандартах и технических условиях.

3.2 Предварительный расчет ТЭП конкурентных вариантов и выбор оптимального варианта

Решение поставленной задачи в ТЗ обычно многовариантно. Но среди множества вариантов обязательно найдется один вариант, который будет наиболее оптимальным образом соответствовать требованиям и ограничениям технического задания. Задача разработчика – найти этот единственный вариант и доказать, что он является наиболее оптимальным. В данном случае *под оптимальным понимается такое функциональное устройство (трансформатор, дроссель, фильтр и т.д.), которое будет*

соответствовать всем техническим характеристикам и иметь минимальный (оптимальный) заданный ТЭП.

Для достижения поставленной цели необходимо:

- выбрать типовые элементы конкурентных вариантов конструкций (типоразмеры сердечников для ТП и СД, типовые конденсаторы и сглаживающие дроссели для СФ и т.д.) или рассчитать оптимальные размеры нетиповых элементов (геометрические размеры оптимального сердечника для СД, удельный ТЭП оптимального СД для СФ и т.д.);
- рассчитать технико-экономические показатели выбранных в процессе анализа ТЗ конкурентных вариантов конструкций;
- провести сравнительный анализ конкурентных вариантов и выбрать оптимальный вариант конструкции.

В качестве примера более подробно вопросы выбора оптимальной конструкции трансформаторов питания и сглаживающих дросселей рассмотрены в разделе 7. Аналогичная методика оптимизации конструкции может быть использована при проектировании любого другого функционального устройства или аппарата в целом.

3.3 Электрический и конструктивный расчет оптимального варианта

В электрическом расчете необходимо: рассчитать все электрические параметры устройства, определяющие нагрузку и активные потери энергии в отдельных конструктивных элементах (индукцию в сердечнике, плотность тока в обмотках и активные потери в них для ТП и СД); рассчитать число витков обмоток моточных изделий; рассчитать оптимальные значения емкости конденсаторов и индуктивности сглаживающих дросселей, величину максимального напряжения и пульсаций на конденсаторах и дросселях в сглаживающем фильтре и т.д.

Конструктивный расчет трансформаторов и дросселей сводится к проектированию катушки и размещению обмоток в окне сердечника. При проектировании СФ необходимо провести компоновку конденсаторов и дросселей и разработать печатную плату.

Электрический и конструктивный расчеты трансформаторов питания наиболее полно изложены в монографии Р.Х. Бальяна [1], а методика расчёта систематизирована в методическом пособии [2]. В работах [3,4] подробно освещены конструкции ТП и конструктивный расчет.

Вопросы электрического и конструктивного расчетов сглаживающих дросселей подробно рассмотрены в работах [3 и 5]. Но в работе [5] наиболее систематизирована методика проектирования оптимальных СД как на нормализованных сердечниках, так и на сердечниках с оптимальной геометрией. Конструктивный расчет и разработка конструкции СД наиболее полно представлены в работе [3].

Методика проектирования сглаживавших фильтров, оптимальных по массогабаритным показателям и по стоимости, разработана Е.И. Гольдштейном и А.К. Майером [5]. В работе предложены расчетные соотношения для определения ТЭП различных схем сглаживающих LC-фильтров, что позволяет уже на начальном этапе проектирования выбрать оптимальную схему СФ. Кроме того, авторами разработана методика проектирования СФ на ненормализованном оптимальном сглаживающем дросселе, в том числе и на сердечнике с оптимальной геометрией.

Вопросы теории, расчета и конструирования согласующих трансформаторов (ТС) подробно и наиболее полно рассмотрены Г.С. Цыкиным [7]. Но, к сожалению, справочный материал и некоторые положения, приведенные в ней, уже устарели, а сама книга стала библиографической редкостью, что в определенной мере затрудняет использование её в курсовом проектировании. Более современное отражение вопросов теории и конструктивного расчета нашли в работах Ю.С. Русина [8, 9]. В работе [8] подробно рассмотрены вопросы выбора магнитопровода, расчета оптимального немагнитного зазора, конструктивного расчета катушки, определение основных и паразитных электромагнитных параметров ТС, экранирования трансформатора и другие вопросы.

Подробно методики электрического и конструктивного расчета трансформатора питания и сглаживающего дросселя приведены в методических пособиях [2 и 6].

3.4 Уточнение электромагнитных параметров и расчет ТЭП

После конструктивного расчета, в котором должны быть окончательно приняты все конструктивные решения, необходимо провести уточнение основных электромагнитных, геометрических и др. параметров, а также рассчитать фактические ТЭП (массу, габаритный объем, стоимость) разрабатываемого устройства, исходя из конкретных конструктивных данных.

Для ТП и СД эти вопросы рассмотрены в разделе 7, а наиболее подробно методика уточнения электромагнитных параметров и расчета ТЭП. ТП и СД представлены в методических пособиях [2 и 6].

3.5 Разработка конструкции

Так как в курсовой работе не предусматривается разработка конструкции и конструкторской документации, то в данном разделе необходимо ограничиться выбором и обоснованием метода защиты изделия от внешних климатических воздействий, в частности, от влаги и агрессивной среды. Если есть необходимость в дополнительной защите разрабатываемого устройства от воздействия внешней среды, то выбрать и обосновать: материал (марка, ГОСТ или ТУ) пропитки катушки; материал обволакивания

или заливки катушки, трансформатора, дросселя; материал защитно-декоративного покрытия.

3.6 Критический анализ результатов проектирования

В заключение необходимо провести критический анализ результатов проектирования:

- провести сравнительный анализ параметров и характеристик разработанного устройства с заданными в ТЗ;
- указать, какой ценой пришлось достичь выполнения тех или иных требований ТЗ;
 - отметить, какие требования ТЗ не удалось выполнить и почему;
 - оценить, насколько оптимальным оказалось разработанное устройство;
 - указать возможные пути совершенствования – улучшения свойств и технико-экономических показателей.

4 ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ ПОЯСНИТЕЛЬНОЙ ЗАПИСКИ

4.1 Оформление пояснительной записки (ПЗ) должно удовлетворять общим требованиям к текстовым документам согласно ЕСКД (ГОСТ 2.105-68 и 2.106-68) и ОС ТУСУР 6.1. [15].

ПЗ оформляется на листах формата А4 в редакторе WORD, шрифт 14 через 1-1,5 интервала. Текст размещается на одной стороне листа. Задание подшивается после титульного листа, затем идут содержание (с основной надписью), введение и т.д. В содержание вносятся только наименования разделов и подразделов. Введение и заключение номеруются. Разделы, подразделы и пункты номеруются, а их заголовки отделяются от текста дополнительными интервалами.

4.2 Титульный лист выполняется согласно ОС ТУСУР 6.1, приложение А.

4.3 При выборе и обосновании принимаемых конструктивных решений, конструкционных материалов, физических величин, расчетных коэффициентов и т.д. необходимо делать ссылки на литературу с указанием номера источника (из списка), а также номера страницы, таблицы, рисунка, например: [1, с.612, таблица ПЗ.7], [2, с.83, рисунок П4], [3, с.65].

4.4 Таблицы и рисунки (графики), представленные в пояснительной записке должны быть пронумерованы и подписаны согласно ОС ТУСУР 6.1. Номеруются по разделам и подписываются таблицы сверху, а рисунки снизу. Например: Таблица 2.1 – Результаты предварительных расчетов конкурентных вариантов конструкций ТП. Рисунок 3.1 – Кривая намагничивания стали 3423. На все таблицы и рисунки должны быть ссылки в тексте ПЗ.

4.5 В расчетной части ПЗ должна соблюдаться следующая последовательность записи:

- краткие пояснения цели расчета и ссылка на литературу;
- выражение в общем виде (формула) и номер формулы в круглых скобках по правому полю листа;
- расшифровка вновь введенных условных (буквенных) обозначений физических величин, а для коэффициентов, взятых из справочной литературы, должна быть еще ссылка на источник, (литературу);
- запись выражения в числовых значениях физических величин в той же последовательности, что и их условные обозначения в формуле;
- результат расчета – числовое значение и размерность через пробел.

Например:

Определяем число витков в одном слое первичной обмотки I

$$W_{сл.1} = \frac{h_K \cdot K_{УКЛ.1}}{d_{1.ИЗ}} \quad , \quad (5.8)$$

где h_K – высота намотки катушки, мм;

$K_{УКЛ}$ – коэффициент укладки первичной обмотки [2, с.81, рисунок П6];

$d_{ИЗ}$ – диаметр провода первичной обмотки в изоляции, мм.

$$W_{СЛ.1} = \frac{38 \cdot 0,94}{0,69} = 51,8 \approx 52 \text{ витка.}$$

В конце расчёта должны быть сделаны краткие выводы.

4.6 В заключении необходимо дать краткий анализ принятых конструктивных решений, провести сравнение достоинств и недостатков разработанной конструкции с существующими прототипами, сделать выводы о реализации технического задания и указать возможные пути совершенствования разработанного устройства.

4.7 Список литературы, использованный при курсовом проектировании, должен быть составлен в соответствии с требованиями ГОСТ 19600-74, примеры см. в Приложении Ж ОС ТУСУР [15].

5 РАСПРЕДЕЛЕНИЕ БЮДЖЕТА ВРЕМЕНИ И РЕТИНГОВАЯ ОЦЕНКА

Согласно учебному плану на выполнение курсовой работы отводится 9 недель (10-18 недели), а бюджет времени составляет 9 часов аудиторных занятий и 15 часов самостоятельной работы. При слабой подготовке студентов реальные затраты времени на выполнение курсовой работы могут значительно превышать плановые за счет увеличения времени на самостоятельную работу.

Задание выдается на 10 неделе 5 семестра (после ломки расписания); сдача готового проекта на проверку – на 17 неделе. 18 неделя отводится на доработку и защиту курсовой работы. В процессе выполнения курсовой работой студент выступает как самостоятельный исполнитель. Роль руководителя состоит лишь в содействии самостоятельной работе студента.

График выполнения работы и рейтинговая оценка по отдельным этапам приведен в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – График и рейтинговая оценка работы студентов по выполнению курсовой работы

Этапы работы		Номер недели	Баллы (максим.)
1	Получение задания	10 (1)	0
2	Анализ ТЗ и выбор оптимального варианта конструкции	12 (3)	10
3	Электрический расчет оптимального варианта	14 (5)	10
4	Конструктивный расчет и уточнение параметров	16 (7)	10
5	Оформление пояснительной записки и сдача готовой работы	17 (8)	8
6 Защита курсовой	6.1 Оформление пояснительной записки		8
	6.2 Принятие и обоснование конструктивных решений		12

работы	6.3 Качество расчетов	18 (8)	18
	6.5 Качество защиты курсовой работы		30
Всего баллов			100

Отчетность по выполнению курсовой работы представляется для проверки руководителю в течение семестра в виде **аккуратно выполненных черновиков** с результатами проектирования в соответствии с установленным графиком (согласно расписанию занятий). Поощряется ритмичная работа в течение семестра и рациональное применение средств автоматизации инженерного труда. **В течение семестра рейтинговые баллы начисляются только за своевременно представленный отчет о выполнении соответствующего этапа согласно таблице 5.1.**

Готовую курсовую работу проверяет руководитель и делает заключение о допуске к защите или доработке по указанным вопросам.

6 ЗАЩИТА КУРСОВОЙ РАБОТЫ

Защита разрешается только при наличии зачетной книжки и допуска руководителя проектирования к защите.

Защита курсовой работы имеет своей целью выявить и оценить:

- качество знаний студента, полученных при выполнении курсовой работы;
- умение технически грамотно принимать и обосновывать конструктивные решения;
- умение пользоваться технической и справочной литературой;
- качество оформления ПЗ и соблюдение требований стандартов;
- знание и умение использовать системные средства автоматизации инженерного труда и т.д.

Вместе с тем защита позволяет оценить степень владения студентом теоретическим материалом по теме курсовой работы.

При оценке курсовой работы учитывается:

- качество оформления пояснительной записки;
- правильность и обоснованность принятых конструктивных решений;
- качество расчетов и использование технических средств;
- качество защиты, умение обосновывать и защищать принятые решения.

Если защита прошла неудовлетворительно, то работа возвращается на доработку, а студенту предлагается обратить внимание на конкретные недочеты, выявленные в процессе защиты. В случае повторной неудовлетворительной защиты заведующим кафедрой назначается комиссия по приему курсовой работы. При несогласии с оценкой комиссии по защите студент может опротестовать её, подав заявление на имя заведующего кафедрой. В таком случае заведующий кафедрой назначает комиссию по

защите под своим председательством. Оценка комиссии является окончательной.

Студенты, не защитившие курсовую работу, к экзаменационной сессии не допускаются.

7 МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ПРОЕКТИРОВАНИЮ ТП И СД

7.1 Методические указания по проектированию ТП

7.1.1 Этапы проектирования ТП

Во многих случаях в силу каких-либо причин (чаще всего из-за жестких требований по технико-экономическим показателям) невозможно использование унифицированных (типовых) трансформаторов питания, возникает необходимость проектирования нового трансформатора, удовлетворяющего заданным требованиям.

Проектирование ТП, как и другого функционального устройства, можно условно разделить на *следующие этапы*:

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

Рассмотрим подробнее содержание каждого этапа.

7.1.2 Анализ ТЗ и выбор конкурентных вариантов конструкций ТП

В техническом задании на проектирование обычно задаются:

- электрическая схема ТП;
- U_1 – напряжение первичного источника питания;
- f – частота питающей сети;
- U_{2i} и I_{2i} – напряжения и токи вторичных обмоток;
- τ_m и/или δU – допустимые температура перегрева обмоток и/или падение напряжения на ТП;
- вид нагрузки (схемы выпрямителей, цепи накала и т. д.);
- назначение аппаратуры, для которой проектируется ТП;
- условия эксплуатации или степень жесткости по ГОСТ 11478-88;
- ограничения по массогабаритным показателям или стоимости;
- ограничения по использованию нормализованных сердечников и материалов;

- ограничения по электромагнитным параметрам (по току холостого хода, по собственной паразитной емкости, по индуктивности рассеяния и т.д.);
- программа выпуска;
- срок службы.

При анализе ТЗ необходимо выбрать и обосновать:

- конкурентные типы трансформаторов;
- конкурентные типы сердечников (магнитопроводов);
- конкурентные ряды сердечников;
- ферромагнитный материал;
- конструкцию катушки;
- проводниковый материал и марку обмоточных проводов;
- изоляционные материалы;
- способ защиты катушки и трансформатора и защитные материалы.

Рассмотрим несколько подробнее обоснование и выбор конкурентных вариантов конструкций ТП и конструктивных решений.

1) Выбор и обоснование конкурентных типов трансформаторов

На основании анализа ТЗ (частота питающей сети, габаритная мощность, ограничения по ТЭП, назначение) из возможных вариантов конструкций ТП (броневой, стержневой, тороидальный, обращенный тор, кабельного типа, типа «шпуля» и т.д.) выбрать 2-3 наиболее конкурентные конструкции. Более подробные сведения о конструкциях унифицированных ТП представлены в [4, подраздел 1.3].

Если в ТЗ нет специальных ограничений по конструкции, то для ТП промышленной частоты (50 Гц) предпочтение отдается броневой и стержневой конструкциям, для повышенных частот (400...1000 Гц) – броневой, стержневой и тороидальной, а для частот более 1 кГц – тороидальной и кольцевой конструкциям.

Рекомендации по выбору конструкции ТП в зависимости от габаритной мощности, приведенные в [1], наиболее близки к истине для ТП промышленной частоты, но для ТП повышенной частоты весьма ориентировочные. Чем выше частота, тем дальше сдвигаются граничные мощности в сторону увеличения.

При выборе конкурентных конструкций необходимо учитывать также назначение ТП. Наиболее технологичными в изготовлении являются броневые ТП, вторыми в ряду стоят стержневые, а тороидальные конструкции являются самыми нетехнологичными и дорогостоящими. Следовательно, для бытовой РЭА при оптимизации по стоимости не следует использовать тороидальную конструкцию ТП.

Наиболее оптимальными по габаритному объему являются броневые конструкции, а наибольший удельный объем, при прочих равных условиях,

имеют тороидальные ТП. Но тороидальные ТП имеют наименьшие поля рассеяния, наименьший ток холостого хода и плоскую конструкцию.

Более подробные рекомендации по выбору конкурентных конструкций ТП приведены в [2, подраздел 2.2].

2) Выбор и обоснование конкурентных типов сердечников

Сердечники (магнитопроводы) могут быть реализованы из ленточных (ленточные) или листовых (пластинчатые) электротехнических сталей и сплавов. Для высокочастотных ТП используются прессованные сердечники различных конструкций из магнитодиэлектриков и ферритов. Выбор того или иного типа сердечника определяется, прежде всего, частотой питающего напряжения и назначением ТП. Для ТП повышенной частоты предпочтение отдается ленточным сердечникам из холоднокатаных, текстурованных, электротехнических сталей, а для высокой частоты (более 10 кГц) – прессованным из ферритов и магнитодиэлектриков. В некоторых случаях предпочтительными оказываются кольцевые ленточные сердечники из железо-никелевых сплавов (пермаллоев). Для ТП промышленной частоты могут применяться и ленточные, и пластинчатые сердечники из электротехнических сталей. Но ленточные сердечники более технологичны в изготовлении и в сборке ТП. К тому же при изготовлении их практически отсутствуют отходы. Они же оказываются наиболее оптимальными по массогабаритным показателям.

3) Выбор и обоснование конкурентных рядов сердечников

Для ТП разработаны оптимальные ряды сердечников: ШЛ, ПЛ, ОЛ – ленточные сердечники для низковольтных ТП промышленной и повышенной частоты, оптимальных по массогабаритным показателям; ШЛО, ПЛО – ленточные сердечники с увеличенным окном обмотки для высоковольтных ТП промышленной и повышенной частоты, оптимальных по массогабаритным показателям; ШЛМ, ПЛМ – для ТП промышленной частоты, минимальных по массе и стоимости; ШЛР, ПЛР, УШ – для ТП промышленной частоты, минимальных по стоимости; ШЛП – ленточные сердечники с увеличенным отношением ширины ленты к толщине навивки (керн) для низковольтных ТП повышенной частоты, оптимальных по габаритному объему. ТЛ – броневые ленточные сердечники для трехфазных трансформаторов промышленной и повышенной частоты (400 Гц). Трансформаторы высокой частоты реализуются, как правило, на кольцевых и броневых сердечниках, изготовленных из ферритов и магнитодиэлектриков.

Более подробные рекомендации по выбору конкурентных типов и рядов сердечников даны в методическом пособии [2, подраздел 2.3]. Дополнительные сведения о сердечниках можно найти в [1, 3, 4 и 14].

4) Выбор и обоснование ферромагнитного материала

Рекомендации по выбору материала сердечников приведены в пункте 3.1.3 и в [2, подраздел 2.4], а более подробную информацию о свойствах выпускаемых в настоящее время ферромагнитных материалов можно найти в справочной литературе [10, 12-14].

5) Выбор и обоснование типа намотки и материала каркаса

В низковольтных броневых и стержневых ТП преимущественное применение получила рядовая намотка на каркас. Она более технологична и позволяет получить больший коэффициент заполнения окна обмоткой K_o по сравнению с бескаркасной. Следовательно, применение каркасных катушек позволяет минимизировать массу, габариты и стоимость ТП. Намотка обмоток на гильзу (бескаркасная намотка) нетехнологична, так как необходимо закреплять крайние витки каждого слоя обмоток и выполнять изоляционный буртик по торцам катушки, что значительно увеличивает время изготовления катушки. К тому же снижается механическая прочность катушки. Достоинство бескаркасной катушки – существенно облегчается процесс пропитки обмоток. Бескаркасную намотку рекомендуется применять при проектировании высоковольтных трансформаторов. Она позволяет проще решать вопросы изоляции обмоток между собою и с сердечником. Секционирование обмоток применяется так же при проектировании высоковольтных ТП с той же целью.

Каркасы (гильзы) рекомендуется изготавливать из пластмассы методом горячего прессования или горячего литья под давлением. При горячем прессовании используются порошки из терморезистивных пластмасс. Процесс нетехнологичный, трудоемкий и неэкологичный. Однако, использование высокопрочных материалов позволяет повысить механическую прочность, теплостойкость, тропикоустойчивость ТП, а также уменьшить толщину корпусной изоляции и, тем самым, увеличить коэффициент заполнения окна обмоткой. При горячем литье под давлением используются гранулы из термопластичных пластмасс. Процесс технологичный, легко поддается автоматизации и экологически достаточно чистый, но отсутствие высокотемпературных, механически прочных и недефицитных термопластов существенно сужает их область применения. Однако имеется ряд реактопластов, обладающих достаточно высокой рабочей температурой (до 200 °С) и допускающих формование горячим литьем под давлением или литьевым прессованием.

В тороидальных трансформаторах корпусная изоляция выполняется так же из пластмассы в виде обоймы из двух половинок, либо наматывается лентой их хлопчатобумажной, шелковой или стеклянной ткани с последующей пропиткой лаками или компаундами.

Дополнительные сведения о катушках можно найти в [1,3,14], а свойства материалов для каркасов и рекомендации по их выбору в [2 и 11].

6) Выбор и обоснование проводникового материала и марки обмоточных проводов

Рекомендации по выбору проводникового материала и марки обмоточных проводов приведены в пункте 3.1.3. Более подробно этот вопрос рассмотрен в методическом пособии [2, подраздел 2.6]. Дополнительную информацию об обмоточных проводах можно найти в литературе [1,3,13 и 14].

7) Выбор электроизоляционных материалов

При максимальной рабочей температуре обмоток до 120-130 °С в трансформаторах питания в качестве межслоевой изоляции широко используются изоляционные бумаги: конденсаторная марок КОН-1 и КОН-2, телефонная марки КТН, намоточная марки ЭН, пропиточная марки ЭИП и кабельная марки К. Однако, следует помнить, что все бумаги без пропитки относятся к классу нагревостойкости *Y* (до 90 °С), при наличии пропитки – к классу *A* (до 105 °С), а намоточная и пропиточная бумаги при пропитке соответствующим материалом могут быть отнесены к классу *E* (до 120 °С) или *B* (до 130 °С). При более высоких рабочих температурах рекомендуется использовать в качестве изоляции стеклоткань с последующей пропиткой (см. пункт 3.1.4).

Межобмоточная изоляция обычно реализуется двумя слоями намоточной, пропиточной, кабельной бумаги и стеклоткани при наличии пропитки или лакоткани и стеклолакоткани без пропитки катушки.

В качестве наружной изоляции из соображений механической прочности рекомендуется использовать два слоя кабельной бумаги или стеклоткани при последующей пропитке или два слоя лакоткани при отсутствии пропитки.

Рекомендации по выбору изоляционных материалов см. в пункте 3.1.4, в методическом пособии [2, подраздел 2.7] и в технической и справочной литературе [1, 3, 4, 11, 13 и 14].

8) Выбор способа защиты катушки и трансформатора

Для защиты катушки от влаги и агрессивной среды широко используется пропитка лаками и компаундами. Проникая в толщу обмоток, они заполняют все воздушные промежутки и пропитывают 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. При эксплуатации трансформатора в жестких климатических условиях (высокая влажность, наличие агрессивной среды) для защиты обмоток и изоляции катушек одной пропитки недостаточно. Поэтому катушка дополнительно обволакивается, как правило, компаундами. Нуждаются в защите от влаги и агрессивной среды и все металлические

элементы конструкции трансформатора, особенно содержащие железо. При нежестких условиях эксплуатации ограничиваются обволакиванием эмалями или лаками, а при жестких условиях обволакивают компаундами с наполнителями. Обычно обволакивание выполняет и роль декоративного покрытия трансформатора. В некоторых случаях применяется капсюлирование. Но необходимо помнить, что пропитка и обволакивание – трудоемкие и дорогостоящие операции. Поэтому трансформаторы для бытовой РЭА при оптимизации по стоимости не рекомендуется ни пропитывать, ни обволакивать. Дополнительные рекомендации и справочные данные см. в пункте 3.1.5, в методическом пособии [2, подраздел 2.8], а также в технической и справочной литературе [1, 3, 4, 11, 13 и 14].

7.1.3 Предварительный расчет конкурентных вариантов и выбор оптимальной конструкции трансформатора

Для выбора оптимального варианта конструкции ТП, необходимо хотя бы ориентировочно определить ТЭП конкурентных вариантов, отобранных в пункте 7.1.2, для чего можно воспользоваться *методикой, приведенной в [3, раздел 3]*.

1) **Рассчитать габаритную мощность трансформатора P_T** по формуле (3.1).

2) **Определить расчетный случай и рассчитать габаритный критерий Gr** : При этом возможны следующие варианты расчета:

- если задано падение напряжения δU (1 р.с.), то рассчитывается $Gr^{(U)}$ по формуле (3.2);

- если задан перегрев обмотки τ_m (2 р.с.) и частота питающей сети 50 Гц , то для броневых (БТ) и стержневых (СТ) трансформаторов наиболее вероятен вынужденный тепловой режим (ТВР) и габаритный критерий $Gr^{(\tau)}$ рассчитывается по формуле (3.3). Если частота питающей сети 400 Гц и выше, то для БТ и СТ наиболее вероятен естественный тепловой режим (ТЕР) и габаритный критерий $Gr^{(\tau)}$ рассчитывается по формуле (3.11). Для тороидального трансформатора (ТТ) в при любой частоте будет иметь место ТЕР, так как сердечник располагается внутри обмотки. Следовательно для ТТ $Gr^{(\tau)}$ рассчитывается по формуле (3.11);

- если заданы и δU и τ_m , то рассчитываются габаритные критерии $Gr^{(U)}$ и $Gr^{(\tau)}$ по первому и второму расчетному случаям;

- если не заданы ни δU , ни τ_m , то проще всего выбрать типовой режим – $\delta U = 0,1$ или $\tau_m = 50 \text{ К}$ при $f = 50$ или 400 Гц и выбрать типоразмер сердечника по типовой мощности P_T .

3) **Выбрать типоразмеры сердечников** из конкурентных рядов из условий, чтобы типовые габаритные критерии были не менее расчетных, т.е.

$Gr_T^{(U)} \geq Gr^{(U)}$, $Gr_T^{(\tau)} \geq Gr^{(\tau)}$, или $P_T \geq P_T$. Если заданы δU и τ_m , то

выбирается больший типоразмер из каждого ряда сердечников, а меньший типоразмер сердечника отбрасывается из дальнейшего анализа.

4) **Найти из таблиц** в [2, приложение Д] или в [1, приложение 7] для выбранных типоразмеров сердечников **массу сердечников G_c , катушек G_k и трансформаторов G_{TP}** для типовых условий.

5) **Рассчитать** ориентировочно **габаритные размеры A, B, H и габаритный объем трансформаторов V_{TP}** по формулам (3.15 – 3.20) из [2].

6) **Рассчитать ориентировочно стоимость** материалов сердечников C_c , обмоточных проводов C_o и общую стоимость C_{TP} согласно методике, приведенной в [2, пункт 3.4.4].

7) **Провести сравнительный анализ полученных результатов и выбрать оптимальный вариант ТП**, соответствующий требованиям технического задания.

Для удобства анализа рекомендуется результаты расчетов свести в таблицу 7.1

Таблица 7.1 – ТЭП конкурентных вариантов трансформаторов

Типоразмер сердечника	Типовой габарит. критерий		Тип. мощн. $P_T, Вт$	Масса, кг			Габаритные размеры, мм, $дм^3$				Стоимость, руб		
	$G_T^{(U)}$	$G_T^{(T)}$		G_c	G_k	G_{TP}	A	B	H	V_{TP}	C_c	C_o	C_m
ШЛ 16×16													
ПЛ12,5×16×40													
ОЛ32×50×25													

8) **Привести справочные данные** сердечника для выбранного оптимального варианта ТП.

7.1.4 Электрический расчет ТП

Электрический расчет проводится для выбранного оптимального трансформатора по тому расчетному случаю, по которому он был выбран, то есть по 1 р.с. или по 2 р.с. (по ТЕР или по ТВР) согласно методике, приведенной в [2, раздел 4].

Электрический расчет включает следующие основные этапы.

1) **Определение величины рабочей индукции в сердечнике B** . При расчете по перегреву при ТЕР рассчитывается оптимальная величина индукции по формуле (4.27) [2]. При расчете по перегреву при ТВР и при расчете по падению напряжения индукцию в сердечнике можно принять $B = B_s$, где B_s – предельно допустимая рабочая индукция для выбранного материала сердечника, которая берется из справочной литературы [12-14] или из методического пособия [2, таблицы 2.2 и 2.3]. Однако, с целью

уменьшения тока холостого хода, рабочую индукцию рекомендуется выбирать из условия $B \leq 0,9 \cdot B_s$.

2) **Определение активных потерь в сердечнике P_c и в обмотках P_o .** Потери в сердечнике P_c при любом расчетном случае рассчитывается по формуле (4.1). Потери в обмотках P_o рассчитываются при расчете по падению напряжения по формуле (4.2), а при расчете по перегреву (при ТЕР и ТВР) – по формуле (4.23). При расчете по перегреву необходимо также рассчитать падение напряжения δU по формуле (4.25), а при расчете по падению напряжения – рассчитать температуру перегрева τ_m по формуле (4.4). Если в ТЗ заданы и падение напряжения, и перегрев, то необходимо провести сравнение расчетных значений δU или τ_m с заданными. При расчете по перегреву должно выполняться условие $\delta U \leq \delta U_{don}$, а при расчете по падению напряжения – условие $\tau_m \leq \tau_{m, don}$. То есть *расчетные значения не должны превышать заданные в ТЗ*. Если эти условия не выполняются, то либо неправильно выбран расчетный случай, либо в расчетах допущены ошибки.

3) **Расчет числа витков обмоток W .** Число витков первичной обмотки W_1 рассчитывается по формуле (4.8), а для вторичных – по формуле (4.9). При этом значение падения напряжения δU в формуле (4.7) при расчете по перегреву берется расчетное, а при расчете по падению напряжения – заданное в ТЗ. Числа витков обмоток на данном этапе рекомендуется не округлять до целого числа. Они округляются при уточнении электромагнитных параметров.

4) **Расчет составляющих намагничивающего тока I_0** проводится по формулам (4.10) и (4.11). При этом напряженность магнитного поля в сердечнике определяется по основной кривой намагничивания $B(H)$ для выбранного материала, которую можно построить по справочным данным из [12-14] или из [2, приложение Е]. Величину немагнитного зазора δ можно ориентировочно рассчитать по эмпирической формуле (4.12). При этом значение δ в формулу (4.11) подставляется в *микрометрах*.

5) **Расчет тока первичной обмотки I_1** проводится по формуле (4.14).

6) **Расчет плотностей тока в первичной j_1 и вторичных обмотках j_2** выполняется по формулам (4.18) и (4.19). При этом предварительно определяется средняя плотность тока в обмотках по формуле (4.16).

7) **Определение сечения проводов обмоток $Q_{пр.i}$** проводится по формуле (4.14).

8) **Выбор стандартных сечений проводов обмоток** осуществляется по справочным данным из [1, таблицы ПЗ.6-ПЗ.9], [14, таблица 7.24] или из [2, приложение Б]. **Марка провода** выбирается согласно классу

нагревостойкости с учетом ТЗ (см. пункт 3.1.3 и [2, пункт 2.6]). Для выбранных проводов необходимо привести марку провода и стандарт, значения сечений $Q_{пр.i}$ и диаметров выбранных проводов без изоляции d_i и в изоляции $d_{из.i}$. Удобнее все сведения свести в таблицу.

Подробно методика электрического расчета ТП изложена в [1, с. 527-554].

7.1.5 Конструктивный расчет ТП

В конструктивном расчете уточняются ранее принятые в пункте 7.1.2 конструктивные решения и производится расчет размещения обмоток в окне сердечника. Конструктивный расчет тороидальных трансформаторов существенно отличается от расчета броневых и стержневых трансформаторов. Поэтому их рассматривают отдельно.

Конструктивный расчет броневых и стержневых ТП условно можно разделить на следующие этапы.

1) Уточнение конструкции катушки и определение типа намотки. Уточняется конструкция катушки – каркасная, бескаркасная (гильзовая), секционированная (см. подпункт 5 пункта 7.1.2) и определяется тип намотки обмоток – рядовая виток к витку или внавал.

2) Уточнение материала и определение габаритных размеров каркаса (гильзы). Прежде всего следует уточнить марку материала и технологию изготовления каркаса, выбранные ранее в подпункте 5 пункта 7.1.2. Толщина корпусной изоляции (гильзы), толщина щечек каркаса или изоляционного буртика, высота намотки катушки и т.д., проводится согласно методике, приведенной в [2, раздел 5]. При определении толщины корпусной изоляции и толщины щечек каркаса следует иметь в виду, что на рисунке 5.2 [2, с.50] значения Δ_k приведены для прессованных каркасов. Для литых каркасов из термопластичных пластмасс для увеличения механической прочности Δ_k и $\Delta h/2$ следует увеличить в 1,5-2 раза.

3) Определение толщины межслоевой, межобмоточной и наружной изоляции и уточнение марок изоляционных материалов. Толщина изоляции определяется согласно рекомендациям, приведенным в [2, пункт 5.2.5]. Следует иметь в виду, что: толщина межслоевой изоляции выбирается из условий механической прочности по [2, рисунок 5.4] и округляется до стандартной в сторону увеличения; толщина межобмоточной изоляции выбирается из условий электрической прочности; толщина наружной изоляции выбирается из условий электрической и механической прочности. Обычно в качестве межобмоточной и наружной изоляции для низковольтных ТП используется 2-3 слоя кабельной бумаги, стеклоткани или лакоткани. В процессе определения толщины той или иной изоляции уточняются

конкретные марки изоляционных материалов с учетом их номенклатуры (см. пункт 3.1.4 и подпункт 7 пункта 7.1.2).

4) Расчет размещения обмоток в окне сердечника. Конструктивный расчет размещения обмоток броневых и стержневых ТП в окне сердечника сводится к расчету числа витков в слое $W_{сл}$ и числа слоев $n_{сл}$ для каждой обмотки, к выбору порядка размещения обмоток на катушке, к расчету толщины намотки обмоток C_{oi} и катушки C_K и к определению величины технологического зазора ΔC_K . Методика конструктивного расчета броневых и стержневых трансформаторов представлена в [2, подраздел 5.2]. Рекомендуются первичную обмотку размещать на каркасе (гильзе), предварительно намотав на него два слоя изоляции. Вторичные обмотки следует размещать в порядке уменьшения их мощности. В стержневых трансформаторах обмотки следует распределять на две катушки, соблюдая симметричное распределение нагрузки на оба стержня. Величина технологического зазора ΔC_K не должна быть меньше допустимой, иначе будет затруднена сборка трансформатора. Существенное превышение технологического зазора допустимую величину или отрицательное значение ΔC_K указывает на ошибки в расчетах или в принятии конструктивных решений.

Методика конструктивного расчета тороидального трансформатора представлена в [2, подраздел 5.3]. Обмотки в них рекомендуется размещать, по возможности, равномерно по всей длине сердечника. Последовательность размещения обмоток на сердечнике та же, что и на катушке для броневых трансформаторов.

5) Уточнение способа защиты от внешних воздействий. В данном пункте необходимо уточнить способ защиты от внешних воздействий и выбор материалов пропитки и обволакивания, проведенные в подпункте 8 пункта 7.1.2. Рассчитать толщину влагозащитного покрытия. Рекомендации по расчету толщины влагозащитного покрытия приведены в [16] и в [2, подраздел 5.4].

7.1.6 Уточнение электромагнитных параметров и расчет технико-экономических показателей ТП

После конструктивного расчета уточняются основные электромагнитные параметры и рассчитываются технические характеристики ТП согласно методике, приведенной в [2, раздел 6]:

- рассчитываются активные сопротивления обмоток r_1 и r_{2i} ;
- уточняются э.д.с. E_1 и число витков обмоток W_1 и W_{2i} . На этом этапе необходимо округлить числа витков до целого числа или до 0,5 витка, если число витков небольшое. Рекомендуется округлять числа, по возможности, в одну сторону;

- уточняются ток намагничивания I_{0P} , рабочий $I_{РАБ}$ и полный ток первичной обмотки I_1 ;
- определяются активные потери в обмотках P_O ;
- уточняются рабочая индукция в сердечнике B и активные потери в сердечнике P_C ;
- рассчитываются максимальный перегрев обмоток τ_m и падение напряжения δU ;
- определяется ток холостого тока $I_{ХХ}$;
- рассчитываются технико-экономические показатели ТП – массу (G_C, G_K, G_{TP}), габариты (A, B, H, V_{TP}), стоимость ($Ц_C, Ц_O, Ц_{TP}$).

Если будет обнаружено большое расхождение окончательных значений τ_m или δU с заданными в ТЗ, то расчет нужно повторить. Но чаще всего это свидетельствует о наличии грубых ошибок в электрическом или конструктивном расчетах. Перегрев обмотки τ_m и падение напряжения δU сверх установленных в ТЗ значений не допустимы.

7.2 Методические указания по проектированию СД

7.2.1 Этапы проектирования сглаживающих дросселей

Этапы проектирования СД те же, что и трансформатора питания (см. пункт 7.1.1). Рассмотрим содержание некоторых этапов.

7.2.2 Анализ ТЗ и выбор конкурентных вариантов конструкций СД

В техническом задании на проектирование обычно задаются:

- L – индуктивность номинальная СД;
- I_H – ток номинальный (постоянная составляющая);
- $U_{доп}$ – допустимое напряжение на выводах СД;
- ΔU или τ_m – допустимое падение напряжения или максимальная температура перегрева обмотки;
 - U_m и $f_{п}$ – амплитуда и частота пульсаций напряжения;
 - назначение аппаратуры, для которой проектируется СД;
 - условия эксплуатации или степень жесткости по ГОСТ 11478-88;
 - ограничения по использованию нормализованных сердечников и материалов;
 - ограничения по массогабаритным показателям или стоимости;
 - программа выпуска;
 - срок службы.

При анализе ТЗ необходимо выбрать и обосновать:

- 1) конкурентные типы дросселей (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 и марки обмоточных проводов* (медь, алюминий, круглого или прямоугольного профиля, ленточный, марки проводов);

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

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

Рассмотрим несколько подробнее каждый из пунктов анализа ТЗ.

1) Выбор и обоснование конкурентных типов дросселей

Общие рекомендации по выбору конструкции СД приведены в пункте 3.1.2, а более подробные в [6, подраздел 2.2] и в [5, с.88]. Следует отметить, что деление СД на предпочтительные конструкции по граничным значениям энергоемкости, приведенным в [5, с.88], весьма условные. Во-первых, в них не учитывается частота и амплитуда пульсаций напряжения. Во-вторых, технико-экономические показатели СД существенно зависят от геометрии и дискретности конкретных рядов типовых (нормализованных) рядов сердечников. Поэтому указанные рекомендации по выбору предпочтительных конструкций СД следует понимать лишь как ориентировочные. Выявить же оптимальную конструкцию СД можно по результатам предварительного расчета ТЭП конкурентных вариантов.

Более подробные сведения о конструкциях унифицированных СД представлены в [4, подраздел 1.3].

2) Выбор и обоснование конкурентных типов и рядов сердечников

Достаточно подробно типы сердечников и существующие нормализованные ряды сердечников рассмотрены в подпунктах 2 и 3 пункта 7.1.2 и в [6, подраздел 2.3]. Сразу же оговоримся, что специальных типовых рядов сердечников, оптимальных по какому либо ТЭП, для сглаживающих дросселей не существует. Указанные выше ряды сердечников (ШЛ, ПЛ, ОЛ, ШЛМ, ШЛР, ПЛМ, ПЛР и т.д.) изготавливаются из электротехнических сталей и являются оптимальными по массе или стоимости для трансформаторов питания. Оптимальная геометрия сердечников по

габаритному объему, массе и стоимости для СД разработана Е.И.Гльдштейном и А.К.Майером и приведена в [5, таблица 1.7]. Анализ показал, что из нормализованных рядов наиболее близкими к оптимальной геометрии СД являются сердечники типа ШЛМ и ПЛМ, вторыми в этом ряду стоят сердечники ШЛР и ПЛР. Наиболее далеки от оптимума ряды сердечников ШЛ, ПЛ, ОЛ, ШЛО, ПЛО.

Наиболее нетехнологичными для СД являются ленточные, тороидальные сердечники. Во-первых, сложна и трудоемка технология намотки обмотки на сердечник. Во-вторых, необходима специальная оснастка для разрезания сердечника под немагнитный зазор и последующая стяжка сердечника обоймой. Поэтому тороидальная конструкция СД используется лишь в спецаппаратуре при соответствующих ограничениях, оговоренных в ТЗ.

Если в задании предусмотрена реализация СД, оптимального по массе, для спецаппаратуры на ненормализованном сердечнике с оптимальной геометрией, то в качестве конкурентных выбираются броневая, стержневая и тороидальная конструкции. При оптимизации СД по габаритному объему тороидальную конструкцию можно исключить из этого ряда.

3) Выбор и обоснование ферромагнитного материала

Рекомендации по выбору материала сердечников приведены в пункте 3.1.3 и [6, подраздел 2.4]. Дополнительные рекомендации по выбору ферромагнитного материала сердечника можно найти в [4, с.56], [5, с.18], а более подробную информацию о свойствах выпускаемых в настоящее время ферромагнитных материалов можно отыскать в справочной литературе [12-14].

4) Выбор и обоснование типа намотки и материала каркаса

Этот вопрос подробно рассмотрен в подпункте 5 пункта 7.1.2 и в [6, подраздел 2.5]. Подробные сведения о материалах, используемых для изготовления каркасов и гильз можно найти в справочнике [11]. В дополнение следует указать, что в ненормализованных сглаживающих дросселях предусматривается, как правило, одна обмотка. В нормализованных СД обмотка обычно делится на две одинаковых секции.

5) Выбор и обоснование проводникового материала и марки обмоточных проводов

Рекомендации по выбору проводникового материала и марки обмоточных проводов приведены в пункте 3.1.3 и в [6, подраздел 2.6], а более подробную информацию об обмоточных проводах можно найти в литературе [1, 3, 13 и 14].

6) Выбор изоляционных материалов

Рекомендации по выбору электроизоляционных материалов приведены в пункте 3.1.4 и в подпункте 7 пункта 7.1.2. Более подробные сведения о

номенклатуре, свойствах и областях применения электроизоляционных материалов можно найти в методическом пособии [6, подраздел 2.7], в технической и справочной литературе [1, 3, 4, 11 и 13].

7) Выбор способа защиты катушки и дросселя

Рекомендации по выбору способа защиты катушки и дросселя от воздействия влаги и агрессивной среды, а также рекомендации по выбору защитных материалов приведены в пункте 3.1.5 и в подпункте 8 пункта 7.1.2. Более подробно вопросы защиты дросселей рассмотрены в [6, подраздел 2.8]. Дополнительные рекомендации и справочные данные можно найти в литературе [1, 3, 4, 11, 13 и 14].

7.2.3 Предварительный расчет конкурентных вариантов и выбор оптимальной конструкции дросселя

Для выбора оптимального варианта конструкции СД, необходимо хотя бы ориентировочно определить ТЭП конкурентных вариантов, отобранных в пункте 7.2.2, для чего можно воспользоваться *методикой*, предложенной в методическом пособии [6].

1) Рассчитать габаритный критерий N_{1P} или N_{2P} .

Если задано падение напряжения ΔU (1 р.с.), то рассчитывается габаритный критерий N_{1P} по формуле (3.1), максимально допустимое активное сопротивление дросселя в рабочем режиме R_t определяется по формуле (3.2), а значение коэффициента нагрева принимается $K_H = 1,28$.

Если задана температура перегрева τ_m (1 р.с.), то рассчитывается габаритный критерий N_{2P} по формуле (3.3), а K_H рассчитывается по формуле (3.4). Коэффициент заполнения окна обмоткой принимается: $K_O \approx 0,25$, если $I_H < 1$ А; $K_O \approx 0,35$, если $I_H = 1..5$ А; $K_O \approx 0,4$, если $I_H > 5$ А. Коэффициент $\Delta\alpha$ находится из графика [6, рисунок 3.1] или может быть рассчитан по эмпирической формуле (3.6).

Остальные физические величины и коэффициенты следует выбирать на основании рекомендаций, приведенных в [6, пункты 3.2.1 и 3.2.2].

2) Если проектирование ведется на нормализованном сердечнике, то типоразмеры сердечников выбираются из конкурентных рядов [6, приложение А] из условия, что типовой габаритный критерий N_T должен быть не меньше расчетного N_P , т.е. $N_{1T} \geq N_{1P}$ или $N_{2T} \geq N_{2P}$.

3) Если проектирование ведется на ненормализованном (оптимальном) сердечнике, то по предложенной в [6, подраздел 3.4] методике определяются:

- из таблицы 3.2 оптимальные значения безразмерных параметров x, y, z ;

- из приложения Б находятся безразмерные коэффициенты оптимального сердечника;
- по формулам (3.10) или (3.11) рассчитываются коэффициенты $n_{Г1}$ или $n_{Г2}$;
- по формулам (3.13) или (3.14) рассчитывается базовый размер оптимального сердечника a_1 или a_2 и **округляется в сторону увеличения** по ряду предпочтительных чисел [6, приложение В];

4) По методике, предложенной в [6, подраздел 3.5], ориентировочно рассчитываются **технико-экономические показатели** конкурентных конструкций дросселей:

- по формулам (3.15)-(3.17) рассчитываются **габаритные размеры A, B, H и габаритный объем дросселей $V_{др}$** ;
- согласно пункту 3.5.2 определяют **массу сердечника G_C , катушки G_K и дросселя $G_{др}$** ;
- **рассчитывается ориентировочно стоимость материалов** сердечников Π_C , обмоточных проводов Π_O и общую стоимость конкурентных конструкций дросселей $\Pi_{др}$ по методике, предложенной в [6, пункт 3.5.3].

5) **Проводится сравнительный анализ полученных результатов и выбирается оптимальный вариант СД**, соответствующий требованиям технического задания. Для удобства анализа рекомендуется результаты расчетов свести в таблицу 7.2.

Таблица 7.2 - ТЭП конкурентных вариантов дросселей

Типоразмер сердечника	Типовой габ. критерий $N_{Г1} / N_{Г2}$	Масса, кг			Габаритные размеры, мм, $дм^3$				Стоимость, руб		
		G_C	G_K	$G_{др}$	A	B	H	$V_{др}$	Π_C	Π_O	$\Pi_{др}$
ШЛ 16×16											
ПЛ12,5×16×40											
ОЛ32×50×25											

6) **Привести справочные данные** нормализованного или оптимального сердечника для выбранного оптимального варианта СД. При этом геометрические размеры для нормализованного сердечника берутся из таблиц [6, приложение А], а для оптимального сердечника рассчитываются.

7.2.4 Электрический расчет оптимального варианта СД

Электрический расчет оптимального варианта СД проводится по методике, предложенной в разделе 4 методического пособия [6].

1) Рассчитывается число витков обмотки по формулам (4.1) или (4.2) в зависимости от того, по какому расчетному случаю ведется расчет.

2) Определяется сечение провода по формуле (4.10) и из таблицы Г.1 [6, приложение Г] или из [5, таблица ПЗ.2] выбирается стандартное сечение провода. Справочные данные обмоточного провода рекомендуется свести в таблицу, в которой необходимо привести: марку провода и его стандарт, сечение провода расчетное $Q_{ПР.Р}$ и стандартное $Q_{ПР}$, диаметры выбранного провода без изоляции d и в изоляции $d_{ИЗ}$ и коэффициент заполнения окна магнитопровода проводниковым материалом $K_{КП}$. Марка провода выбирается согласно классу нагревостойкости с учетом назначения СД, условий эксплуатации и др. требований ТЗ (см. пункт 3.1.3).

3) Уточняется коэффициент заполнения окна магнитопровода K_0 согласно методике, предложенной в подразделе 4.3, и сравнивается с ранее выбранным значением K'_0 (см. подпункт 1 пункта 7.2.3). Если значение рассчитанного K_0 больше ранее принятого, но не более, чем на 5 %, то расчет можно продолжить. Если $K_0 < K'_0$ или $K_0 > 1,05 \cdot K'_0$, то расчет нужно повторить, начиная с расчета габаритного критерия, приняв значение коэффициента заполнения равным расчетному.

4) Рассчитывается максимальная величина переменной составляющей индукции в сердечнике $B_{m.min}$ по формуле (4.20) и проверяется условие (4.21) $B_0 + B_{m.max} \leq B_S$, где B_S – максимально допустимая рабочая индукция для выбранного магнитного материала (значение B при $H = 2500$ А/м). Если условие не выполняется, то снижают значение постоянной составляющей индукции до величины $1,3 > B_0 \geq 1$ Тл и повторяют расчет, начиная с расчета габаритного критерия. Если условие выполняется, то расчет продолжают.

5) Определяются активные потери в сердечнике и в обмотке по формулам (4.22) и (4.26), соответственно, при этом предварительно рассчитывается максимальная рабочая температура обмотки $R_{t.PAC}$. Рассчитываются максимальная температура перегрева обмотки СД $\tau_{m.PAC}$ и максимальная рабочая температура обмотки $t_{P.max}$ (см. подраздел 4.7). Проверяются требования ТЗ по допустимому падению напряжения (R_t) и по перегреву (τ_m). Если расчет ведется по первому расчетному случаю, то проверяется условие $R_{t.PAC} \leq R_t$. Если расчет ведется по второму расчетному случаю, то проверяется условие $\tau_{m.PAC} \leq \tau_m$. Если $R_{t.PAC}$ или $\tau_{m.PAC}$ незначительно меньше (не более, чем на 5...10 %) заданных, то расчет можно продолжить. Если $R_{t.PAC}$ или $\tau_{m.PAC}$ **значительно меньше или больше заданных**, то вероятнее всего в предыдущих расчетах были допущены существенные ошибки. Необходимо проверить расчеты и проконсультироваться с руководителем.

При расчете по первому расчетному случаю (τ_m не задана в ТЗ) дальнейшие расчеты ведутся при полученной расчетной величине $\tau_m = \tau_{m.PAC}$.

6) Определяется оптимальная толщина немагнитной прокладки согласно подразделу 4.8 [6].

7) Рассчитывают минимальные значения индукции $B_{m.min}$ по формуле (4.35) и индуктивности L_{min} по формуле (4.38). Если значение L_{min} не менее заданной в ТЗ величины, то расчет можно продолжить. Если L_{min} меньше заданной, то необходимо проконсультироваться с руководителем курсового проектирования.

7.2.5 Конструктивный расчет СД

В конструктивном расчете уточняются ранее принятые в пункте 7.2.2 конструктивные решения и производится расчет размещения обмоток в окне сердечника. Условно конструктивный расчет СД можно разделить на следующие этапы.

1) Уточнение конструкции катушки и определение типа намотки. Уточняется конструкция катушки – каркасная, бескаркасная (гильзовая), секционированная (см. подпункт 4 пункта 7.2.2) и определяется тип намотки обмоток – рядовая виток к витку или в навал.

2) Уточнение выбора обмоточного провода и изоляционных материалов и уточнение размеров каркаса (гильзы). В соответствии рассчитанной выше максимальной рабочей температуре $t_{P.max}$ уточняют марку обмоточных проводов, марки изоляционных материалов, марку материала и технологию изготовления каркаса, выбранные ранее в пункте 7.2.2. Если выбран другой материал каркаса, то согласно методике, приведенной в [6, подраздел 4.3], уточняются его размеры: толщина корпусной изоляции (гильзы) $\Delta_{КОР}$, толщина щечек каркаса (или изоляционного буртика) $\Delta h/2$, высота намотки катушки h_K и т.д. При определении толщины корпусной изоляции и толщины щечек каркаса следует иметь ввиду, что на рисунке 4.1 [6] значения Δ_K приведены для прессованных каркасов. Для литых каркасов из термопластичных пластмасс для увеличения механической прочности Δ_K и $\Delta h/2$ следует увеличить в 1,5-2 раза.

3) Расчет размещения обмотки в окне сердечника. Конструктивный расчет размещения обмотки **броневых** и **стержневых** двухкатушечных СД в окне сердечника представлен в [6, подраздел 5.4] и сводится:

- к расчету числа витков в слое $W_{СЛ}$ и числа слоев $n_{СЛ}$ обмотки;
- к выбору толщины межслоевой $\Delta_{СЛ}$ и наружной $\Delta_{НАР}$ изоляции;
- к расчету толщины намотки обмотки C_O и катушки C_K ;
- к определению величины технологического зазора $\Delta C_K = c - C_K$.

Рекомендуется перед намоткой первого слоя на каркас (гильзу) предварительно намотать один-два слоя изоляции. В стержневых СД обмотку следует разделить поровну на две катушки. Число витков в слое $W_{СЛ}$ округляется в меньшую сторону, а число слоев $n_{СЛ}$ – в большую. Величина технологического зазора ΔC_K считается оптимальной в пределах 0,5...1,0 мм.

Конструктивный расчет *тороидального дросселя* коренным образом отличается от расчета броневых и стержневых СД и приведен в [6, подраздел 5.5]. В предлагаемой методике расчет размещения обмотки в окне сердечника рекомендуется проводить последовательно по слоям. Последний слой рекомендуется размещать равномерно по всей длине сердечника. Расчет толщины намотки катушки ведется отдельно внутри и снаружи сердечника. На заключительном этапе расчета размещения обмотки в окне сердечника проводится контроль величины диаметра технологического отверстия d_0 . Она должна быть не менее допустимой величины δ_{TT} , необходимой для свободного прохода челнока намоточного станка ($d_0 - \delta_{TT} > 0$).

4) Уточнение способа защиты от внешних воздействий. На заключительном этапе конструктивного расчета необходимо сделать окончательный выбор способа защиты катушки и дросселя в целом от внешних воздействий и выбор материалов пропитки и обволакивания, проведенные в подпункте 7 пункта 7.2.2. Рассчитать толщину влагозащитного покрытия по методике, предложенной в [6, подраздел 5.6]. Дополнительные сведения по влагозащите устройств РЭС и рекомендации по расчету толщины влагозащитного покрытия можно найти в [16].

7.2.6 Уточнение электромагнитных параметров и расчет технико-экономических показателей СД

После конструктивного расчета уточняются основные электромагнитные параметры и рассчитываются технические характеристики СД согласно методике, приведенной в [6, раздел 6]:

- рассчитывается активное сопротивление обмотки дросселя R_i ;
- определяется падение напряжения в обмотке ΔU ;
- определяются активные потери в обмотке P_o ;
- рассчитываются максимальный перегрев обмотки τ_m и максимальная рабочая температура обмотки $t_{p.max}$;
- рассчитываются габаритные размеры (A , B , H) и технико-экономические показатели СД – габаритный объем $V_{др}$, массу (G_c , G_k , $G_{др}$) и стоимость (C_c , C_o , $C_{др}$).

Проводится сравнение расчетных значений ΔU и τ_m с заданными в ТЗ. Если будет обнаружено большое расхождение окончательных значений ΔU или τ_m , то расчет нужно повторить. Но чаще всего это свидетельствует о наличии грубых ошибок в электрическом или конструктивном расчетах. ***Перегрев обмотки τ_m и падение напряжения ΔU сверх установленных в ТЗ значений не допустимы.***

ОСНОВНАЯ РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1 Бальян Р.Х. Трансформаторы питания для радиоэлектроники.- М.: Сов. радио, 1971. – 720 с.

2 Кузевых Н.И. Проектирование трансформаторов для РЭС: Методическое пособие по курсовому проектированию.– Томск: ТУСУР, 2011.–109 с.

3 Белопольский И.И. и др. Расчёт трансформаторов и дросселей малой мощности. - М.: Энергия, 1973. – 400 с.

4 Каретникова Е.И. и др. Трансформаторы питания и дроссели фильтров для РЭА. - М.: Сов. радио, 1973. – 180 с.

5 Гольдштейн Е.И., Майер А.К. Индуктивно-емкостные сглаживающие фильтры. – Томск: Изд-во ТГУ, 1982. – 222 с.

6 Кузевых Н.И. Проектирование оптимальных сглаживающих дросселей: Методическое пособие по курсовому проектированию. – Томск: ТУСУР, 2009. – 76 с.

7 Цыкин Г.С. Трансформаторы низкой частоты. – М.: Связьиздат, 1955 – 418 с.

8 Русин Ю.С. Трансформаторы звуковой и ультразвуковой частоты. - Л.: Энергия, 1973. – 152 с.

9 Кузнецов В.К., Оркин Б.Г., Русин Ю.С. Трансформаторы усилительной и измерительной аппаратуры. – Л.: Энергия , 1969 - 152 с.

10 Расчет электромагнитных элементов источников вторичного электропитания / А.Н. Горский, Ю.С. Русин и др. – М: Радио и связь, 1988. – 176 с.

11 Справочник по электротехническим материалам / Под ред. Ю.В. Корицкого, В.В. Пасынкова, Б.М. Тареева. Т.2. – М.: Энергоатамиздат, 1987. – 464 с.

12 Справочник по электротехническим материалам / Под ред. Ю.В. Корицкого, В.В. Пасынкова, Б.М. Тареева. Т.3. – Л.: Энергоатамиздат, 1988. – 728 с.

13 Электротехнический справочник / Под ред. профессоров МЭИ. Т.1. – М.: Энергия, 1985. – 520 с.

14 Масленников М.Ю., Соболев Е.А. и др. Справочник разработчика и конструктора РЭА. Кн.1 и 2.- М.: Энергоатомиздат, 1993. – 299 с.

15 ОС ТУСУР 6.1-97. Система образовательных стандартов. Работы студенческие учебные и выпускные квалификационные. Общие требования и правила оформления. – Томск: ТУСУР, 1997. – 38 с.

16 Козлов В.Г. Практикум по теплообмену в РЭА. – Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1980. – 74 с.