

Министерство образования и науки РФ

**ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)**

Кафедра конструирования узлов и деталей РЭА (КУДР)

Н.И.Кузевных

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ
СГЛАЖИВАЮЩИХ ДРОССЕЛЕЙ**

***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 СД.....	6
2.1 Задачи анализа ТЗ	6
2.2 Выбор и обоснование конкурентных типов дросселей.....	6
2.3 Выбор и обоснование конкурентных типов и рядов сердечников....	8
2.4 Выбор и обоснование ферромагнитного материала сердечника.....	10
2.5 Выбор и обоснование типа намотки и материала каркаса.....	11
2.6 Выбор и обоснование проводникового материала и марки обмоточных проводов.....	13
2.7 Выбор электроизоляционных материалов.....	15
2.8 Выбор способа защиты катушки и дросселя.....	18
3 ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ РАСЧЕТ КОНКУРЕНТНЫХ ВАРИАНТОВ И ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИИ ДРОССЕЛЯ.....	22
3.1 Постановка задачи.....	22
3.2 Расчет габаритных критериев конкурентных конструкций СД.....	22
3.3 Выбор типоразмеров сердечников из конкурентных рядов.....	24
3.4 Расчет базовых размеров конкурентных конструкций оптимальных сердечников.....	25
3.5 Расчет ТЭП конкурентных вариантов СД.....	27
3.6 Сравнительный анализ ТЭП конкурентных вариантов и выбор оптимального варианта СД.....	29
4 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ОПТИМАЛЬНОГО ВАРИАНТА СД	30
4.1 Расчет числа витков обмотки.....	30
4.2 Определение сечения провода и выбор стандартного провода.....	30
4.3 Уточнение коэффициента заполнения окна сердечника.....	31
4.4 Расчет максимальной величины индукции в сердечнике.....	33
4.5 Определение активных потерь в сердечнике.....	33
4.6 Определение активных потерь в обмотке.....	35
4.7 Определение максимальной температуры в обмотке.....	36
4.8 Расчет оптимальной толщины немагнитной прокладки.....	37
4.9 Расчет минимальной величины индуктивности дросселя.....	39
5 КОНСТРУКТИВНЫЙ РАСЧЕТ СД.....	41
5.1 Постановка задачи.....	41
5.2 Уточнение конструкции катушки и определение типа намотки	42
5.3 Уточнение выбора изоляционных материалов и габаритных параметров каркаса.....	43
5.4 Расчет размещения обмотки в окне сердечника броневых и стержневых двухкатушечных дросселей.....	43

5.5 Конструктивный расчет тороидального дросселя.....	47
6 УТОЧНЕНИЕ СПОСОБА ЗАЩИТЫ ОТ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПАРАМЕТРОВ....	52
6.1 Уточнение электромагнитных параметров дросселя.....	52
6.2 Расчет технико-экономических показателей дросселя.....	53
ОСНОВНАЯ РЕКОМЕНДОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА.....	54
УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ.....	55
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Справочные данные нормализованных сердечников.....	59
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Параметры сглаживающих дросселей с оптимальной геометрией.....	71
ПРИЛОЖЕНИЕ В. Ряды предпочтительных чисел.....	74
ПРИЛОЖЕНИЕ Г. Диаметры стандартных проводов.....	75

1 ВВЕДЕНИЕ

Сглаживающие дроссели (СД) – это статические электромагнитные устройства, используемые в электрических цепях пульсирующего тока в качестве индуктивного сопротивления. Преимущественное применение СД нашли в источниках вторичного электропитания (ИВЭП) для фильтрации пульсаций выпрямленного тока. Они могут быть использованы также для фильтрации пульсаций напряжения в других цепях питания РЭС.

Отличительной особенностью сглаживающих дросселей является то, что они работают в режиме одновременного намагничивания полями, создаваемыми постоянной и переменной составляющими тока, то есть сердечник в них работает на частном цикле перемагничивания. Как правило, постоянная составляющая тока существенно больше переменной составляющей, что приводит к смещению частного цикла перемагничивания в область насыщения магнитопровода и, как следствие, к уменьшению индуктивности СД. Чтобы не допустить существенного снижения индуктивности СД, в цепь магнитопровода вводится немагнитный зазор. При этом для каждого частного случая существует оптимальный немагнитный зазор, при котором индуктивность СД будет максимальной. Принцип функционирования и другие сведения о сглаживающем дросселе достаточно подробно рассмотрены в [1, раздел 9].

Необходимость проектирования сглаживающих дросселей возникает в тех случаях, когда в силу ряда причин нерационально или невозможно использование нормализованных СД. Учитывая, что стандартные СД имеют дискретные и ограниченные ряды, как по индуктивности, так и по току, то они не могут полностью удовлетворить всей совокупности предъявляемых к проектируемым РЭС технических и технико-экономических показателей (ТЭП). Так, например, при жестких ограничениях по массогабаритным показателям или при значениях индуктивности и тока проектируемого источника вторичного электропитания, выходящих за рамки стандартных СД, часто приходится использовать нестандартные сглаживающие дроссели.

Основы проектирования оптимальных сглаживающих дросселей разработаны Е.И.Гольдштейном и А.К.Майером [2]. Основной целью проектирования ненормализованных СД является такой выбор оптимальной конструкции сердечника, оптимальных соотношений геометрических размеров, основных материалов и других конструктивных решений, который наилучшим образом обеспечил бы оптимальный режим работы дросселя. В качестве критериев оптимизации чаще всего задаются масса, геометрические размеры и стоимость СД, а ограничения накладываются на падение напряжения в дросселе и на температуру перегрева в обмотке. Возможны и другие ограничения.

В техническом задании (ТЗ) на проектирование сглаживающих дросселей обычно задаются следующие технические характеристики СД:

- L_H – индуктивность номинальная СД;
- I_{0H} – ток номинальный (постоянная составляющая);
- $U_{доп}$ – допустимое напряжение на выводах СД;
- ΔU и/или τ_m – допустимое падение напряжения и/или максимальная температура перегрева обмотки;
- f_{Π} – частота пульсаций переменной составляющей напряжения;
- $U_{m.max}$ и $U_{m.min}$ – максимальная и минимальная амплитуда пульсаций переменной составляющей напряжения.

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 использованию нормализованных сердечников и материалов; ограничения по технико-экономическим показателям. А также указывается назначение СД, программа выпуска и срок службы.

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

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

Рассмотрим содержание каждого из этапов.

2 АНАЛИЗ ТЗ, ВЫБОР И ОБОСНОВАНИЕ КОНКУРЕНТНЫХ ВАРИАНТОВ КОНСТРУКЦИЙ СД

2.1 Задачи анализа ТЗ

При анализе технического задания необходимо выбрать и обосновать:

- 1) *конкурентные типы конструкций 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.).

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

2.2 Выбор и обоснование конкурентных типов дросселей

Конструкция сглаживающего дросселя определяется функциональным назначением, основными электрическими параметрами, назначением, требованиями к форме, габаритам, массе, стоимости, надежности и т.д. Основными элементами конструкции СД являются магнитопровод (сердечник) и катушка, в которой размещены обмотки. По типу используемого сердечника СД подразделяются на броневые, стержневые, тороидальные, кабельного типа и т.д.

В СД броневое типа обмотка располагается на центральном стержне сердечника. Это упрощает конструкцию дросселя (одна катушка), позволяет получить более полное использование окна обмоткой и создает частичную механическую защиту обмотки. Поэтому такие дроссели получили широкое распространение. Одним из основных недостатков броневой конструкции

является наличие относительно больших полей рассеяния и, как следствие, дополнительные проблемы в обеспечении электромагнитной совместимости СД с другими радиокомпонентами электронной аппаратуры.

В СД стержневого типа 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 СД при симметричном распределении обмотки по катушкам имеют существенно меньшие, чем у броневых СД, внешние поля рассеяния, что обусловлено взаимной компенсацией внешних магнитных полей катушками.

На тороидальных сердечниках обмотка распределяется равномерно по периметру сердечника, что позволяет полнее использовать магнитные свойства материала и иметь очень слабое внешнее поле. Но из-за сложности технологии изготовления тороидальные СД не получили широкого распространения.

Как показали исследования в [2], выбор конструкции сглаживающего дросселя, оптимального по технико-экономическим показателям определяется, главным образом, величиной энергоемкости. Согласно рекомендациям в [2, с.88] наименьшую массу и габаритный объем имеют: при небольших энергоемкостях СД ($W_M \ll L \cdot I_0^2 / 2 \ll (0,1 \dots 0,2) \Gamma_n \cdot A^2$) броневые и тороидальные конструкции; при средних ($0,3 \ll L \cdot I_0^2 / 2 \ll 4,5 \Gamma_n \cdot A^2$) – тороидальные и стержневые, а при больших ($L \cdot I_0^2 / 2 \gg 4,5 \Gamma_n \cdot A^2$) предпочтение следует отдавать стержневой конструкции.

С точки зрения технологичности изготовления предпочтение следует отдать броневым дросселям. Вторым по технологичности являются стержневые двухкатушечные дроссели. Стержневые однокатушечные практически не применяются, так как они имеют худшие массогабаритные показатели и создают большие поля рассеяния. Самыми нетехнологичными являются тороидальные дроссели, но они обладают наименьшими полями рассеяния. Их применение оправдано лишь для высокочастотных СД (на прессованных сердечниках), а также при жестких ограничениях по высоте конструкции и по массе (плоский монтаж). По габаритному объему они, как правило, проигрывают броневым и стержневым конструкциям.

Следует указать, что приведенное выше разделение СД на предпочтительные конструкции по граничным значениям энергоемкости весьма условное. 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. Чётких же рекомендаций о выборе той или иной конструкции СД в известной литературе пока нет. Поэтому приведенные в [2, с.88] рекомендации по выбору предпочтительных

конструкций СД следует понимать лишь как ориентировочные. Из-за дискретности рядов нормализованных сердечников оптимальными могут оказаться как броневые, так и стержневые конструкции СД. Выявить же оптимальную конструкцию СД можно только по результатам предварительного расчета ТЭП конкурентных вариантов.

Если в задании предусмотрена реализация СД на ненормализованном сердечнике с оптимальной геометрией, то в качестве конкурентных выбираются броневая и стержневая конструкции. Если в ТЗ предусмотрены специальные ограничения (типа – плоская конструкция, минимальные поля рассеяния и т.п.) или СД предназначен для спецаппаратуры, то рассматривается и тороидальная конструкция.

Более подробные сведения о конструкциях унифицированных СД и рекомендации по выбору конкурентных конструкций СД приведены также в работах [3, раздел 2] и в [4, раздел 1].

2.3 Выбор и обоснование конкурентных типов и рядов сердечников

Ферромагнитные сердечники (магнитопроводы) могут быть реализованы из электротехнических сталей, из сплавов железа с никелем (пермаллой) или с кобальтом (пермендюры), из магнитодиэлектриков или ферритов. По способу изготовления магнитопроводы разделяются на пластинчатые, ленточные и прессованные.

Пластинчатые сердечники набираются из пластин соответствующей формы, изготовленных штампованием из листового материала. Достоинством таких сердечников является то, что они могут быть изготовлены практически из любых, даже очень хрупких материалов.

Ленточные сердечники изготавливаются путем навивки на оправку тонкой ленты, витки которой прочно соединяются (склеиваются) между собой. К достоинствам ленточных сердечников следует отнести полное использование свойств текстурованных магнитных материалов, простоту изготовления, позволяющую полную автоматизацию производства, и отсутствие отходов. Ленточные сердечники могут быть неразрезные и разрезные. Для изготовления СД используются разрезные, что существенно упрощает технологию сборки и реализацию немагнитного зазора.

Прессованные сердечники различной формы и назначения изготавливаются из ферритов и магнитодиэлектриков.

По конструктивному признаку магнитопроводы разделяются на броневые, стержневые, тороидальные (кольцевые), типа “шпуля”, кабельного типа и т.д. [2-5].

Выбор того или иного типа сердечника определяется, прежде всего, частотой пульсаций напряжения и назначением СД. При частоте пульсаций до десятков килогерц предпочтение отдается ленточным, разрезным сердечникам из холоднокатаных, текстурованных электротехнических сталей.

Они являются наиболее оптимальными по массогабаритным показателям. Для высокочастотных СД (частота пульсаций 50 кГц и более) используются прессованные сердечники различных конструкций из магнетодиэлектриков или ферритов. В некоторых случаях предпочтительными оказываются кольцевые ленточные сердечники из пермаллоев. Следует отметить, что указанные выше диапазоны частот применения различных материалов весьма ориентировочные. При жестких требованиях по ТЭП необходимо проводить сравнительный анализ различных конструктивных решений.

Следует особо отметить, что унифицированные ряды сердечников для сглаживающих дросселей, оптимальные по какому либо ТЭП, не разработаны и отечественной промышленностью не изготавливаются. Поэтому СД реализуются на типовых сердечниках, разработанных для трансформаторов питания (ТП). Так ряды ШЛ, ПЛ, ОЛ – ленточные сердечники для низковольтных ТП промышленной и повышенной частоты, оптимальные по массогабаритным показателям; ряды ШЛМ и ПЛМ – ленточные сердечники для ТП промышленной частоты, минимальные по массе и стоимости; ряды ШЛР и ПЛР – ленточные сердечники для ТП промышленной частоты, минимальные по стоимости [5].

Указанные выше ряды сердечников (ШЛ, ПЛ, ОЛ, ШЛМ, ШЛР, ПЛМ, ПЛР) изготавливаются из электротехнических сталей и являются оптимальными по массе или стоимости для трансформаторов питания. Но, как показали исследования, проведенные Е. И. Гльдштейном и А. К. Майером, типовые сердечники весьма далеки от оптимальной геометрии сердечников для СД [2, таблица 1.7]. Из нормализованных рядов наиболее близкими к оптимальной геометрии СД по массе и стоимости являются сердечники типа ШЛМ и ПЛМ, вторыми в этом ряду стоят сердечники ШЛР и ПЛР. Наиболее далеки от оптимума ряды сердечников ШЛ, ПЛ и ОЛ. Типовых сердечников, оптимальных по габаритному объему, вообще не существует.

Если в задании предусмотрена реализация СД на ненормализованном сердечнике с оптимальной геометрией, то предпочтение следует отдать броневой и стержневой конструкциям. То есть, в качестве конкурентных рекомендуется выбирать броневой и стержневой ленточные типы сердечников.

Наиболее нетехнологичными для СД являются ленточные тороидальные сердечники. Во-первых, необходима специальная оснастка для разрезания сердечника под немагнитный зазор и последующая стяжка сердечника обоймой. Во-вторых, сложна и трудоемка технология намотки обмотки на сердечник. К тому же, тороидальные СД оказываются наиболее неоптимальными по габаритному объему. Поэтому тороидальные ленточные сердечники используются лишь при наличии в ТЗ специальных ограничений (типа – плоская конструкция, минимальные поля рассеяния и т.п.).

При высоких частотах пульсаций напряжения предпочтение отдается кольцевым и броневым сердечникам, прессованным из низкочастотных ферритов и магнитодиэлектриков.

2.4 Выбор и обоснование ферромагнитного материала сердечника

Основными требованиями, предъявляемыми к ферромагнитным материалам для сердечников сглаживающих дросселей, являются: высокая магнитная проницаемость, высокая индукция насыщения и низкие удельные потери. При выборе типа и марки материала сердечника также необходимо учитывать частоту пульсаций напряжения, назначение СД и ограничения по технико-экономическим показателям.

В области низких и средних частот наиболее полно указанным выше требованиям отвечают электротехнические стали, наилучшими из которых являются холоднокатаные текстурованные стали марок 3411-3415 ГОСТ 21427.1-83 с толщиной ленты 0,35 мм и 3421-3425 ГОСТ 21427.4-78 с толщиной ленты 0,15; 0,08 и 0,05 мм. У них существенно лучше свойства вдоль проката (ленты) по сравнению с горячекатаными изотропными сталями. Так, максимально допустимая рабочая индукция B_S (при напряженности $H = 2500 \text{ А/м}$) для сталей 3411-3415 и 3421-3425 составляет 1,7...1,9 Тл по сравнению с 1,44...1,48 Тл у горячекатаных сталей 1411-1413 и 1511-1514 ГОСТ 21427.3-75. При этом среди однотипных сталей, (они имеют одинаковые первые три числа, например, 341, 342, 141 и т.д.), лучшими свойствами – выше допустимая рабочая индукция B_S и ниже удельные потери, имеют стали с большим порядковым номером. Так, например, сталь 3411- 0,35 мм имеет $B_S = 1,75 \text{ Тл}$ и удельные потери (при индукции 1Тл и частоте 50 Гц) $P_1 = 0,8 \text{ Вт/кг}$, а сталь 3415- 0,35 мм имеет $B_S = 1,90 \text{ Тл}$ и $P_1 = 0,5 \text{ Вт/кг}$ [6,7].

Электротехнические стали являются наиболее дешевыми и недефицитными материалами. Однако, среди них холоднокатаные текстурованные стали более дорогие и более дефицитные, чем горячекатаные. При этом стоимость однотипных сталей тем больше, чем меньше толщина ленты (листа) и чем больше порядковый номер. Например, в семидесятые 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 [5, 7].

Толщина магнитного материала выбирается в зависимости от частоты пульсаций, на которую рассчитывается дроссель. Чем меньше толщина ленты, тем слабее зависимость магнитной проницаемости от частоты и тем меньше потери, но выше стоимость материала. Но так как активные потери в сердечниках СД обычно существенно меньше потерь в обмотке (перемагничивание идет по частному циклу), то частотный диапазон применения магнитных материалов для сердечников сглаживающих дросселей, по сравнению с трансформаторами питания, может быть существенно увеличен. Так, при частотах пульсаций напряжения до 1 кГц рационально использование холоднокатаных, текстурованных электротехнических сталей марок 3411-3415, выпускаемых в виде ленты толщиной $0,35 \text{ мм}$. В области средних частот пульсаций напряжения, вплоть до 50 кГц , предпочтение следует отдать холоднокатаным, текстурованным электротехническим сталям марок 3421-3425 с толщиной ленты $0,15$; $0,08$; $0,05 \text{ мм}$.

Наиболее высокую магнитную проницаемость имеют железо-никелевые сплавы марок 45Н и 50Н ГОСТ 10160.75 (холоднокатаные ленты) ($\mu_{max} \approx (14-24) \cdot 10^3$) и достаточно высокую индукцию насыщения (до $1,5 \text{ Тл}$), но они очень дороги, дефицитны и очень чувствительны к механическим деформациям. Кроме того, в пермаллоях имеет место существенное снижение магнитной проницаемости в переменных магнитных полях при постоянном подмагничивании, то есть на частных циклах перемагничивания. Поэтому они довольно редко используются для изготовления СД. Однако в ряде случаев их применение позволяет существенно снизить массу и объем дросселя.

Высокочастотные СД ($f_{п} > 50 \text{ кГц}$) реализуются, как правило, на кольцевых и броневого прессованных сердечниках из марганец-цинковых и никель-цинковых ферритов общего применения марок: 1000НМ, 1500НМ, 2000НМ, 3000НМ ГОСТ 16541-76 и 400НН, 600НН, 1000НН, 2000НН ГОСТ 14208-77. Они имеют достаточно высокую магнитную проницаемость ($\mu_{Н} \approx 400-3000$), не дороги и не дефицитны, но у них очень низкая допустимая индукция ($B_s = 0,25 \dots 0,38 \text{ Тл}$ при $H = 800 \text{ А/м}$). Возможно также использование специальных ферритов для импульсных трансформаторов марок: 300ННИ, 350ННИ, 450ННИ, 1000ННИ, 1100ННИ, 1100НМИ, которые имеют примерно такие же характеристики, как и ферриты общего применения.

Из магнитодиэлектриков предпочтение следует отдавать Мопермаллоям марок: П-60, П-100, П-120, П-160 и П-250, для которых характерным является достаточно высокая допустимая рабочая индукция ($B_{max} = 0,52 \dots 0,75 \text{ Тл}$ при $H = 8000 \text{ А/м}$), но у них магнитная проницаемость примерно на порядок ниже, чем у ферритов. К тому же и частотный диапазон ограничен ($f_{max} \approx 30 \dots 1000 \text{ кГц}$). Возможно также использование кольцевых и

броневых сердечников из альсифера марок ТЧ-60, ТЧ-90 ($B_{max} = 0,42 \dots 0,50 \text{ Тл}$ при $H = 8000 \text{ А/м}$).

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

2.5 Выбор и обоснование типа намотки и материала каркаса

Катушки сглаживающих дросселей представляют собой совокупность обмоток с выводами и системы изоляции, размещенных на каркасе, гильзе или непосредственно на сердечнике. По конструкции катушки разделяют на цилиндрические и тороидальные. 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.

Намотка обмоток на каркас (гильзу) может быть выполнена либо рядовым способом, виток к витку, либо внавал – витки укладываются в произвольном порядке. В низковольтных броневых и стержневых СД преимущественное применение получила рядовая намотка на каркас. Каркасная катушка имеет лучшее качество и более надежная. К тому же она более технологична и позволяет получить больший коэффициент заполнения окна обмоткой по сравнению с бескаркасной. Следовательно, применение каркасных катушек позволяет минимизировать массу, габариты и стоимость СД.

Намотка обмоток на гильзу (бескаркасная намотка) более трудоемкая и нетехнологичная, так как необходимо закреплять крайние витки каждого слоя обмоток и изоляционный буртик по торцам катушки, что практически исключает автоматизацию намотки и 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 и высокопотенциальных СД. Она позволяет проще решать вопросы изоляции обмоток между собою и с сердечником.

В последнее время (особенно в зарубежных изделиях) широко применяются секционированные катушки. 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. Секционирование обмоток рекомендуется применять также при проектировании высоковольтных и высокопотенциальных СД с целью уменьшения напряжения между слоями, что позволяет существенно проще решать вопросы изоляции обмоток.

В тороидальных СД обмотки мотаются непосредственно на сердечник, заключенный в обойму, либо изолированный волокнистой или пленочной

изоляции. 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.

В настоящее время каркасы, гильзы и обоймы изготавливают преимущественно из трудновоспламеняющейся пластмассы методами прямого или литьевого прессования и литья под давлением. При *прямом и литьевом прессовании* используются пресс-материалы из термореактивных пластмасс. *Прямое прессование* – довольно трудоемкий, нетехнологичный и неэкологичный процесс. Но использование высокопрочных материалов позволяет повысить механическую прочность, теплостойкость, тропикоустойчивость СД, а также уменьшить толщину корпусной изоляции и, тем самым, несколько увеличить коэффициент заполнения окна обмоткой. Более технологичный процесс *литьевого прессования*. При *горячем литье под давлением* используются преимущественно термопласты. Процесс технологичный и экологически достаточно чистый. Однако, отсутствие высокотемпературных, механически прочных и недефицитных термопластов существенно сужает их область применения. Использование некоторых высокотемпературных реактопластов, позволяющих формовку литьем под давлением, существенно расширяет область применения пластмасс для изготовления каркасов, гильз и обойм для СД.

Основные свойства некоторых пластмасс приведены в приложении Д. Дополнительные сведения о катушках можно найти в [3, 4], а о материалах для каркасов – в справочнике [9].

2.6 Выбор и обоснование проводникового материала и марки обмоточных проводов

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 электроустановках. Но удельная плотность меди в три раза больше, чем у алюминия. Кроме того, медь более дорогая и дефицитная. Поэтому медные обмоточные провода используются преимущественно в дросселях, предназначенных для спецтехники, при оптимизации по массогабаритным показателям. Использование алюминиевых обмоточных проводов ограничено, главным образом из-за их нетехнологичности и низкой механической прочности, бытовой РЭА при минимизации по стоимости. Однако, для слаботочных дросселей даже при оптимизации по стоимости предпочтительными оказываются медные провода. Алюминиевые провода тонкого сечения очень непрочные, что приводит при намотке катушек к нарушению изоляции и частым обрывам провода и, как следствие, к большому проценту брака при изготовлении катушек. Следует также отметить, что из-за того, что удельное сопротивление алюминия в 1,6 раза больше, чем у меди, приходится выбирать алюминиевые

провода большего сечения. К тому же, из-за малой механической прочности, при намотке нельзя устанавливать большое натяжение провода. Все это существенно снижает коэффициент заполнения окна обмотки проводом. Поэтому, при использовании алюминиевых проводов, приходится выбирать сердечники большего типоразмера, а следовательно, увеличивать и массу, и габариты, а возможно, и стоимость может оказаться больше, чем СД с медным проводом.

Для обмоток СД небольшой энергоемкости обычно используют медный провод круглого сечения, но при больших токах (более 10 А) предпочтение следует отдавать проводам прямоугольного сечения, а в некоторых случаях ленточным.

Обмоточные провода изолируются, чтобы исключить межвитковые 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 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. Согласно ГОСТ 8865-70 они делятся на 7 классов нагревостойкости, как изоляционные материалы (см. подраздел 2.7).

В 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 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 – *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.

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

- по типу *эмалевой изоляции*: поливинилацеталевая (винифлекс - *B*, металвин - *M*); 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 °С; **105, 120, 130, 155, 180, 200, 220**, свыше **220**;
- по *материалу проволоки*: медная - (без буквы), медная безжелезистая - *БЖ*, медная никелированная - *МН*, алюминиевая мягкая - *A*, 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 °С 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) 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°C и номинальным диаметром проволоки 0,5 мм.

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

Подробные справочные данные и сведения о свойствах обмоточных проводов, а также рекомендации по их выбору можно найти в справочниках [6-8] и в соответствующей технической литературе по проектированию разрабатываемых устройств. Рекомендации по выбору проводникового материала и марки обмоточных проводов приведены также в [10, пункт 3.1.3].

2.7 Выбор электроизоляционных материалов

В сглаживающих дросселях выделяют корпусную, межслоевую и наружную изоляцию. Корпусная изоляция выполняется в виде каркаса, гильзы, обоймы или нескольких слоев изоляционного материала и предназначена для изоляции обмоточных проводов катушки от магнитопровода, элементов стяжки, экранов и других металлических деталей СД. 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 замыканию. 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. Наружная изоляция накладывается на наружную поверхность 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.

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.

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 пресспорошков (терморезистивных пластмасс) методом горячего прессования. Однако надо учитывать то, что горячее прессование – процесс нетехнологичный и неэкологичный. К тому же пресспорошки, как правило, значительно дороже термопластов. Поэтому прессованные каркасы существенно дороже литых.

В качестве межслоевой, межобмоточной и наружной изоляции используются различные электроизоляционные бумаги, стеклоткань, лакоткань, пленка полиэтилентерефталатная и др. материалы. Ниже приведены краткие характеристики наиболее широко используемых в моточных изделиях РЭС изоляционных материалов.

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 *A-B* 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 *A* 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 *A* (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 *A, E, B, F, H* (до + 180 °C). 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 °C 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 *A*. Выпускается в виде ленты толщиной 40, 60 мкм и шириной от 50 до 200 мм. Применяется в качестве межслоевой изоляции при температуре до +220 °C.

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.

Электрокартон электроизоляционный марки ЭВ и ЭВТ (ГОСТ 2824-86) 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.

При максимальной рабочей температуре обмоток до 120-130 °С в сглаживающих дросселях 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.

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.

Дополнительные сведения об электроизоляционных материалах и рекомендации по их выбору можно найти в технической литературе [3-5] и в справочниках [7-9].

2.8 Выбор способа защиты катушки и дросселя

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

В катушке наиболее критичными к влаге и агрессивной среде являются изоляционные материалы. Поэтому при достаточно высокой влажности для защиты катушки широко используется пропитка лаками. Пропиточные лаки имеют достаточно жидкую консистенцию и легко проникают в толщу обмоток, 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. Но при эксплуатации СД в жестких климатических условиях (очень высокая влажность, высокая температура, наличие агрессивной среды) для защиты обмоток и изоляции катушек одной пропитки недостаточно. В таких случаях катушка пропитывается и

дополнительно обволакивается преимущественно компаундами, обладающими лучшими свойствами, чем лаки.

Нуждаются в защите от влаги и агрессивной среды и все металлические элементы конструкции дросселя, 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 дросселя. В некоторых случаях применяется капсулирование. Но необходимо помнить, что пропитка и обволакивание, особенно компаундами, – трудоемкие и дорогостоящие операции. Поэтому СД 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:

- 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, терморезистивный. Обладает хорошей цементирующей способностью, маслостоек. Применяется для пропитки катушек трансформаторов и дросселей, работающих в диапазоне температур от – 60 до +130 °С;

- 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;

- 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;

- КП-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, терморезистивный. 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 дросселей и трансформаторов 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 антикоррозийного 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 антикоррозийной 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 антикоррозийного и электроизоляционного покрытия металлических и пластмассовых поверхностей по эмали ЭП-567. Диапазон рабочих температур от – 60 до +150 °С.

Для обволакивания катушек 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 плюс $(130...150)$ °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 дросселя от воздействия влаги и агрессивной среды можно найти в литературе [3-5, 7-9].

3 ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ РАСЧЕТ КОНКУРЕНТНЫХ ВАРИАНТОВ И ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИИ ДРОССЕЛЯ

3.1 Постановка задачи

Основной задачей курсового проектирования является освоение методологии оптимального проектирования. В данном случае необходимо спроектировать сглаживающий дроссель, отвечающий оптимально ТЗ. То есть, дроссель должен соответствовать заданным техническим характеристикам и иметь минимальные технико-экономические показатели – массу, габаритный объем, стоимость и т.д., по которым наложены ограничения в ТЗ. В идеале необходимо было просчитать все возможные варианты решения поставленной задачи и выбрать наиболее оптимальный. Но курсовое проектирование сильно ограничено по времени и в средствах. Поэтому в предыдущем разделе было предложено провести анализ ТЗ и отобрать несколько вариантов, на взгляд проектировщика, наиболее конкурентных.

Для решения поставленной задачи предлагается воспользоваться *следующей методикой*:

- 1) рассчитать габаритный критерий;
- 2) выбрать типоразмеры сердечников из конкурентных рядов, если СД реализуется на нормализованном сердечнике, или рассчитать базовые размеры конкурентных конструкций, если СД реализуется на ненормализованном сердечнике с оптимальной геометрией;
- 3) рассчитать технико-экономические показатели конкурентных вариантов СД;
- 4) провести сравнительный анализ ТЭП конкурентных вариантов и выбрать оптимальный вариант СД. Привести основные технические характеристики оптимального сердечника, необходимые для электрического и конструктивного расчета СД.

Рассмотрим подробно каждый из предложенных пунктов.

3.2 Расчет габаритных критериев конкурентных конструкций СД

3.2.1 Если в ТЗ задано ограничение по падению напряжения ΔU , то рассчитывается габаритный критерий N_{1P} по формуле [2, формула (1.35)]

$$N_{1P} = \frac{(L_H I_{0H})^2 \cdot \rho_{20} \cdot K_H}{R_t \cdot B_0^2 \cdot K_C^2 \cdot K_O}, \quad M^5, \quad (3.1)$$

где L_H – индуктивность номинальная, Гн;

I_{0H} – ток номинальный, А;

ρ_{20} – удельное сопротивление материала проводника, Ом·м;

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

R_t – активное сопротивление дросселя в рабочем режиме, Ом;

B_0 – постоянная составляющая магнитной индукции, Тл;

K_C – коэффициент заполнения сердечника магнитным материалом;

K_O – общий коэффициент заполнения окна сердечника проводниковым материалом.

В соответствии с рекомендациями [10, с. 32 и 2, с. 90] принимается:

- $K_H = 1,28$ для медных проводов, что соответствует превышению температуры относительно $20\text{ }^\circ\text{C}$ на 70 K ;

- $B_0 = 1,3\text{ Тл}$, если выбрана холоднокатаная текстурованная сталь;

- $K_C = 0,93$ при толщине ленты $\Delta_L = 0,35\text{ мм}$, $K_C = 0,90$ при $\Delta_L = 0,15..0,20\text{ мм}$, $K_C = 0,85$ при $\Delta_L = 0,08..0,10\text{ мм}$, $K_C = 0,75$ при $\Delta_L = 0,05\text{ мм}$;

- для каркасных катушек $K_O = K'_O \approx 0,25$, если $I_{0H} < 1\text{ А}$; $K_O = K'_O \approx 0,35$, если $I_{0H} = 1..5\text{ А}$; $K_O = K'_O \approx 0,4$, если $I_{0H} > 5\text{ А}$. Для бескаркасных катушек рекомендуется K_O уменьшить на $20..25\%$.

Активное сопротивление дросселя в рабочем режиме рассчитывается по формуле

$$R_t = \frac{\Delta U}{I_{0H}}, \text{ Ом}, \quad (3.2)$$

где ΔU – допустимое падение напряжения, В.

3.2.2 Если в ТЗ задано ограничение по перегреву τ_m , то рассчитывается габаритный критерий N_{2P} по формуле [2, формула (1.53)]

$$N_{2P} = \frac{(L_H \cdot I_{0H})^2 \cdot \rho_{20} \cdot K_H \cdot I^2 \cdot (1 + \nu_P)}{B_0^2 \cdot K_C^2 \cdot K_O \cdot \alpha_0 \cdot \tau \cdot \sqrt[4]{\tau/50} \cdot (1 - \Delta\alpha)}, \text{ М}^7, \quad (3.3)$$

где I – действующее значение тока, принимается $I \approx I_{0H}$, А;

$\nu_P = P_C / P_O$ – соотношение потерь в сердечнике к потерям в обмотке, на данном этапе принимается $\nu_P = 0$;

α_0 – коэффициент, пропорциональный коэффициенту теплоотдачи для типовых конструкций в нормальных условиях эксплуатации, определяется из таблицы 3.1;

τ – средний перегрев обмотки;

$\Delta\alpha$ – коэффициент, учитывающий ухудшение теплообмена дросселя при пониженном давлении окружающей среды;

K_H – коэффициент нагрева в данном случае рассчитывается по формуле

$$K_H = 1 + \alpha_T (t_{C,max} + \tau_m / \Gamma - 20), \quad (3.4)$$

Здесь α_T – температурный коэффициент увеличения удельного сопротивления материала провода, для меди $\alpha_T \approx 0,004\text{ 1/K}$;

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

Γ – коэффициент неравномерности нагрева катушки, определяется из таблицы 3.1.

Средний перегрев обмоток рассчитывается по формуле

$$\tau = \frac{\tau_m}{\Gamma}, \quad (3.5)$$

Коэффициент $\Delta\alpha$ определяется из графика (рисунок 3.1), или рассчитывается по эмпирической формуле

$$\Delta\alpha \approx 1 - \frac{1 + \sqrt{H_{min} / H_{norm}}}{2}, \quad (3.6)$$

где H_{min} – минимальное атмосферное давление воздуха по ТЗ; $H_{norm} = 101 \text{ кПа}$ – нормальное атмосферное давление воздуха.

Таблица 3.1 – Значения коэффициентов α_0 , Γ и m_1 для различных типов СД

Тип СД	Катушки хорошо пропитаны		Катушки не пропитаны		m_1
	α_0 , $Вт/м^2 \cdot К$	Γ	α_0 , $Вт/м^2 \cdot К$	Γ	
Малые броневые	10,5	1,04	9	1,08	1,6
Остальные броневые	10,5	1,05	9	1,1	1,3
Стержневые					
двухкатушечные	12	1,03	10	1,06	1,3
Тороидальные	14	1,25	14	—	—

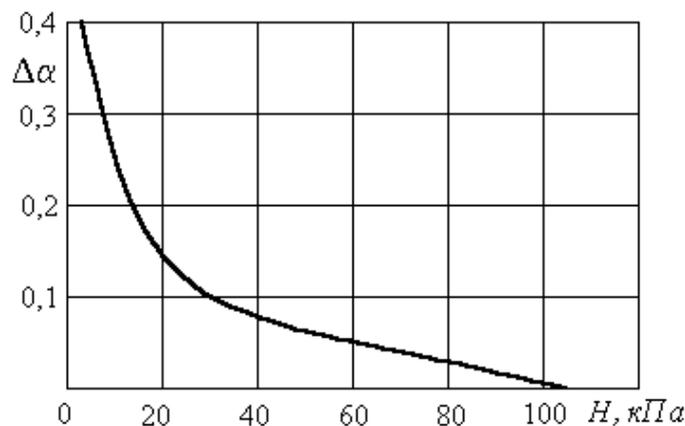


Рисунок 3.1 – Влияние атмосферного давления на теплообмен дросселя с окружающей средой

3.3 Выбор типоразмеров сердечников из конкурентных рядов

Если проектирование ведется на нормализованном сердечнике, то из конкурентных рядов приложения А или из [5, Приложение 4] выбираются

типоразмеры сердечников из условий, чтобы типовые габаритные критерии N_{1T} или N_{2T} были не меньше расчетных, т.е.

$$N_{1T} \geq N_{1P} \text{ или } N_{2T} \geq N_{2P}, \quad (3.7)$$

3.4 Расчет базовых размеров конкурентных конструкций оптимальных сердечников

Если проектирование ведется на ненормализованном (оптимальном) сердечнике, то расчеты проводятся по следующей методике:

- определяются оптимальные значения безразмерных параметров x , y , z ;
- рассчитываются безразмерные коэффициенты $n_{Г1}$ или $n_{Г2}$;
- рассчитываются базовые размеры оптимального сердечника a_1 или a_2 .

Рассмотрим подробно каждый из пунктов.

1) *Оптимальные значения безразмерных параметров x , y , z* определяются из таблицы 3.2. Если оптимизация ведется по габаритному объему V_G , то оптимальные значения x , y , z берутся из последней строки таблицы.

Таблица 3.2 – Безразмерные параметры x , y , z сердечников с оптимальной геометрией

β	Оптимальная геометрия СД для конструкции								
	Броневой			Стержневой			Тороидальной		
	x	y	z	x	y	z	x	y	k_d
1,0	2,2/3,0	0,5/0,6	1,0/1,0	2,0/2,3	0,7/1,1	1,5/1,0	2,01/1,15	1,72/1,7	1,0/1,2
1,5	2,2/3,0	0,6/0,8	1,2/1,0	2,2/2,2	0,9/1,3	1,8/1,0	2,01/1,16	1,89/2,1	1,0/1,5
2,0	2,0/3,0	0,6/0,96	1,3/1,0	2,2/2,1	1,0/1,5	2,0/1,2	2,01/1,16	2,03/2,5	1,0/1,7
2,5	2,2/3,0	0,7/1,1	1,4/1,0	2,2/2,0	1,0/1,6	2,2/1,4	2,01/1,16	2,15/2,8	1,0/1,9
3,0	2,3/2,8	0,8/1,2	1,6/1,0	2,1/2,0	1,1/1,7	2,4/1,6	2,01/1,16	2,25/3,1	1,0/2,1
4,0	2,1/2,6	0,8/1,3	1,7/1,14	2,2/1,9	1,3/1,9	2,7/1,9	2,01/1,17	2,42/3,6	1,0/2,4
5,0	2,2/2,5	0,9/1,5	1,8/1,29	2,2/1,8	1,4/2,1	2,9/2,2	2,01/1,17	2,56/4,0	1,0/2,6
V_G	2,7/3,0	0,5/0,5	1,5/1,0	2,6/2,6	0,6/0,6	3,0/3,0	2,85/2,4	1,73/1,6	1,0/1,0

Примечание: В числителе указаны результаты оптимизации для 1, а в знаменателе – для 2 расчетного случая при $m_1 = 1,3$ и $v_P = 0$.

Если оптимизация ведется по массе G или по стоимости C , то предварительно рассчитываются вспомогательные коэффициенты β_G и β_C по формулам (3.7) или (3.8), соответственно,

$$\beta_G = \frac{\gamma_C \cdot K_C}{\gamma_O \cdot K_O} \quad , \quad (3.8)$$

$$\beta_C = \frac{\gamma_C \cdot K_C \cdot c_C}{\gamma_O \cdot K_O \cdot c_O} \quad , \quad (3.9)$$

где γ_C и γ_O – плотности материалов сердечника и обмотки, $кг/м^3$;

c_C и c_O – цены материала сердечника и провода обмотки, $руб/кг$.

Параметры x , y , z определяются при ближайших значениях β .

2) Безразмерные коэффициенты $n_{Г1}$ или $n_{Г2}$ рассчитываются по формулам (3.10) или (3.11)

$$n_{Г1} = \frac{K_{QC}^2 \cdot K_{QO}}{K_{IO}} \quad , \quad (3.10)$$

$$n_{Г2} = \frac{K_{QC}^2 \cdot K_{QO} \cdot K_{SO} \cdot B \cdot \sqrt{0,05 / K_{HK}}}{K_{IO}} \quad . \quad (3.11)$$

Здесь K_{QC} , K_{QO} , K_{IO} , K_{SO} , K_{HK} – безразмерные коэффициенты геометрических характеристик дросселя: площади сечения сердечника, площади окна обмотки, длины среднего витка обмотки, площади охлаждения обмотки, высоты намотки катушки. Они определяют по формулам из [2, таблица 1.1] или из таблиц приложения Б при соответствующих значениях x , y , z , m_1 и v_P .

B – расчетный коэффициент, берется из таблиц приложения Б или определяется по формуле (3.12)

$$B = 1 + m_1 \cdot \beta_S \cdot \sqrt{\frac{0,6 + v_P}{1 + 0,2 \cdot \beta_S \cdot v_P}} \quad , \quad (3.12)$$

где $\beta_S = S_C / S_O$ – отношение площадей охлаждения сердечника и обмотки, определяется из таблиц приложения Б.

m_1 – коэффициент, учитывающий участие шасси в охлаждении дросселя.

3) Базовые размеры оптимального сердечника a_1 или a_2 рассчитываются по формулам (3.13) или (3.14)

$$a_1 = (N_{1P} / n_{Г1})^{0,2} \quad , \quad (3.13)$$

$$a_2 = (N_{2P} / n_{Г2})^{0,146} \quad . \quad (3.14)$$

Полученные оптимальные значения базовых размеров **округляют в большую сторону** по ряду предпочтительных чисел (см. Приложение В).

3.5 Расчет ТЭП конкурентных вариантов СД

3.5.1 Габаритный объем СД $V_{др}$ рассчитывается по формуле

$$V_{др} = A \cdot B \cdot H, \quad (3.15)$$

Габаритные размеры СД рассчитываются по формулам:
для броневой конструкции

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

для стержневой конструкции

$$A = 2(a + c), \quad B = b + c, \quad H = 2a + h, \quad (3.17)$$

где A , B и H – габаритные размеры дросселя (см. рисунок 3.2).

3.5.2 Масса СД $G_{др}$ определяется как сумма массы сердечника G_C и катушки G_K

$$G_{др} = G_C + G_K. \quad (3.18)$$

Если расчет СД ведется на нормализованных сердечниках, то масса сердечников берется из справочных данных для выбранных типоразмеров (см. приложение А). Масса катушки рассчитывается по формуле

$$G_K = G_{КТ} \cdot K_O / K_{от}, \quad (3.19)$$

где $G_{КТ}$ и $K_{от}$ – масса и коэффициент заполнения окна обмоткой для типового трансформатора, берутся из приложения А;

K_O – коэффициент заполнения окна обмоткой, выбранный в пункте 3.2.1.

Если расчет СД ведется на ненормализованных сердечниках, то масса сердечника G_C и катушки G_K рассчитывается по формулам:

$$G_C = a^3 \cdot K_{VC} \cdot K_C \cdot \gamma_C, \quad (3.20)$$

$$G_K = a^3 \cdot K_{VO} \cdot K_O \cdot \gamma_O, \quad (3.21)$$

где a – оптимальное значение базового размера, м;

K_{VC} и K_{VO} – безразмерные коэффициенты объема сердечника и обмотки, берутся из приложения Б при выбранных оптимальных значениях x , y , z ;

K_C и K_O – коэффициенты заполнения сердечника и окна обмотки материалом;

γ_C и γ_O – плотность (удельная масса) материалов сердечника и обмоточного провода, $кг/м^3$. Берутся из справочников [6,7].

3.5.3 Стоимость основных материалов дросселя $\Pi_{др}$ определяется как сумма стоимости материалов сердечника Π_C и катушки Π_K

$$\Pi_{др} = \Pi_C + \Pi_K = G_C \cdot \varphi_C + G_K \cdot \varphi_O, \quad (3.22)$$

где φ_C и φ_O – цены выбранных материалов сердечника и обмоточного провода, $руб/кг$, находятся как справочные данные из [5, 7] и умножаются на курс доллара на текущий момент. Цены 70-х годов прошлого столетия для некоторых марок электротехнических сталей и обмоточных проводов, заимствованные из [5 и 7], приведены в приложении Е.

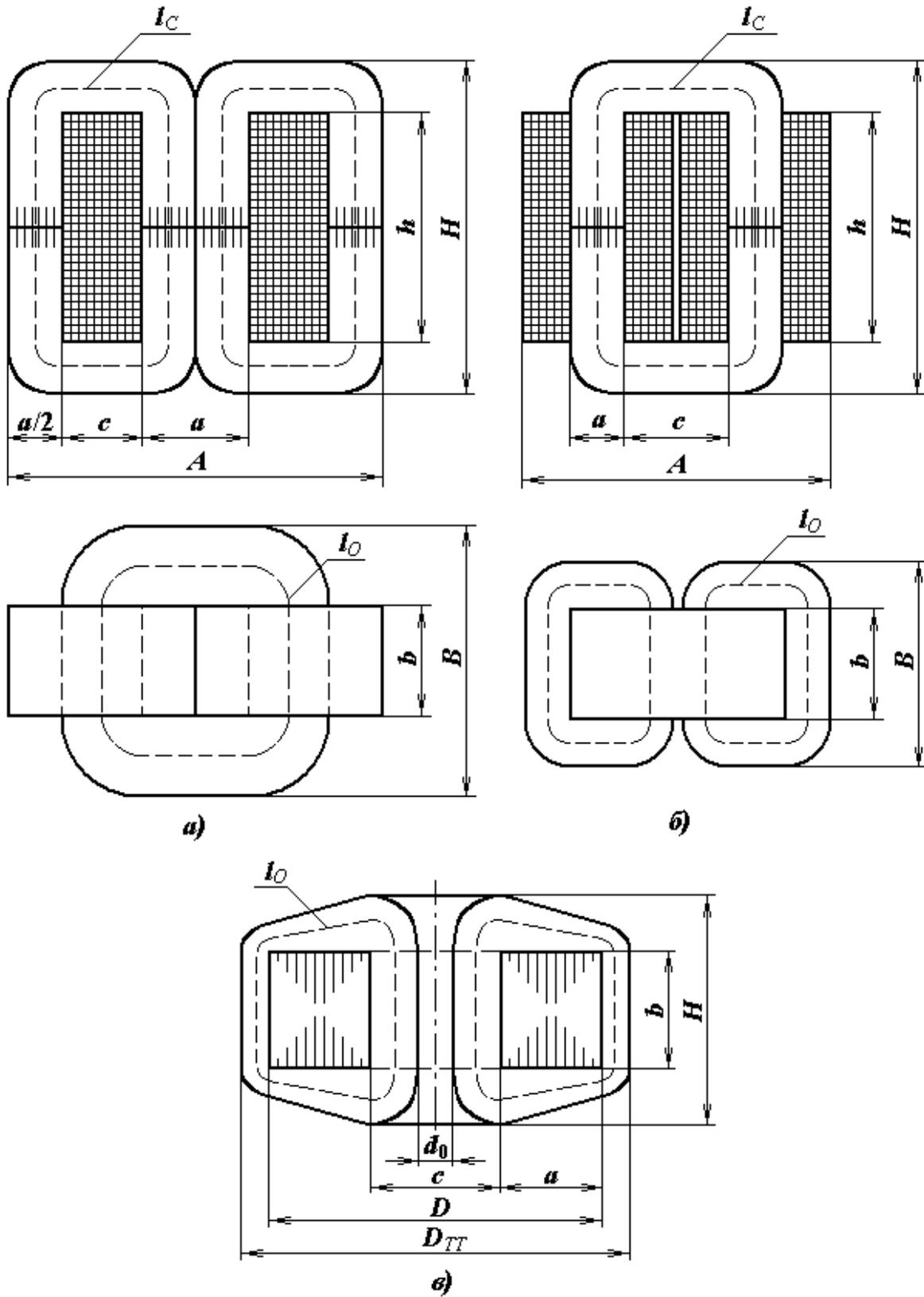


Рисунок 3.2 – Конструкции броневых (а), стержневых (б) и торoidalных (в) сглаживающих дросселей

4 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ОПТИМАЛЬНОГО ВАРИАНТА СД

Электрический расчет оптимального варианта СД проводится по методике, предложенной в пункте 4.2.1 [2], начиная с подпункта 3.

4.1 Расчет числа витков обмотки

Число витков обмотки рассчитывается для первого расчетного случая по формуле (4.1), а для второго расчетного случая по формуле (4.2)

$$W = \sqrt{\frac{R_t \cdot Q_O \cdot K_O}{l_0 \cdot \rho_{20} \cdot K_H}} ; \quad (4.1)$$

$$W = \sqrt{\frac{Q_O \cdot K_O \cdot S_O \cdot B \cdot \alpha \cdot \tau}{I^2 \cdot l_0 \cdot \rho_{20} \cdot K_H \cdot (1 + \nu_P)}} , \quad (4.2)$$

где B – расчетный коэффициент, рассчитывается по формуле (4.3);

α - коэффициент, пропорциональный коэффициенту теплоотдачи, рассчитывается по формуле (4.4).

$$B = 1 + m_1 \cdot \beta_S \sqrt{\frac{0,6 + \nu_P}{1 + 0,2 \cdot \beta_S \cdot \nu_P}} , \quad (4.3)$$

$$\alpha = \alpha_0 \cdot \sqrt[4]{\frac{\tau_m}{50}} \cdot \sqrt[6]{\frac{0,05}{h_K}} \cdot (1 - \Delta\alpha) . \quad (4.4)$$

Здесь $\beta_S = S_C/S_O$ – отношение площадей охлаждения сердечника и обмотки (катушки) дросселя, берется для нормализованных сердечников из приложения А, а для оптимальных – из приложения Б.

4.2 Определение сечения провода и выбор стандартного провода

Рассчитывается сечение провода обмотки по формуле:

$$Q_{ПР.Р} = \frac{Q_O \cdot K_O}{W} . \quad (4.10)$$

Из приложения Г или из [2, таблица П 3.2] выбирается стандартное сечение провода $Q_{ПР.}$. Справочные данные обмоточного провода рекомендуется свести в таблицу 4.1, в которой необходимо привести: марку провода и стандарт на него; значение сечения расчетное $Q_{ПР.Р}$ и стандартное $Q_{ПР.}$; диаметры выбранного провода без изоляции d и в изоляции $d_{ИЗ}$; коэффициент заполнения окна магнитопровода проводниковым материалом $K_{КП}$.

Таблица 4.1 – Справочные данные обмоточного провода

Марка, ГОСТ (ТУ)	$Q_{ПР.Р}, \text{мм}^2$	$Q_{ПР.}, \text{мм}^2$	$d, \text{мм}$	$d_{ИЗ}, \text{мм}$	$K_{КП}$

Марка провода выбирается по максимальной рабочей температуре обмотки согласно классу нагревостойкости с учетом условий эксплуатации, назначения, срока службы СД и ограничений, предусмотренных в ТЗ (см. подраздел 2.6).

4.3 Уточнение коэффициента заполнения окна сердечника

Так как в разделе 3 предварительно было выбрано приближенное значение коэффициента заполнения окна сердечника $K_o = K'_o$ (см. пункт 3.2.1), то после расчета и выбора стандартного провода необходимо уточнить его величину. Уточнение K_o проводится согласно методике, предложенной в [2, с.91, подпункт 5].

4.3.1 Из таблицы 4.2 определяется испытательное напряжение дросселя $U_{исп}$ в зависимости от максимально допустимого напряжения на выводах обмотки дросселя $U_{доп}$.

Таблица 4.2 – Испытательные напряжения дросселей, В

$U_{доп}$	До 24	24...100	100...250	250...1000
$U_{исп}$	250	500	1000	$2U_{доп}+1000$

4.3.2 Уточняют тип намотки (см. подраздел 2.5) и определяют толщину корпусной изоляции каркаса (гильзы) $\Delta_{кор}$

$$\Delta_{кор} = \Delta_K + \Delta_{ТЗ} + \Delta_0, \quad (4.11)$$

где Δ_K – толщина каркаса (гильзы);

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

Δ_0 – толщина подложки – изоляции, наложенной на каркас (гильзу).

Для *прессованных* каркасов и гильз величина Δ_K определяется по рисунку 4.1. Для *литых* каркасов из термопластичных пластмасс для увеличения механической прочности толщину каркаса следует увеличить в 1,5-2 раза. Также следует иметь в виду, что толщина литых каркасов, исходя из технологических ограничений, не должна быть меньше 1 мм.

Величина технологического зазора $\Delta_{ТЗ}$ выбирается в зависимости от технологии сборки и назначения СД. Обычно принимается $\Delta_{ТЗ} \approx 0,2..0,4$ мм и зависит от габаритных размеров каркаса – чем больше габариты каркаса, тем больше $\Delta_{ТЗ}$ [5, с.198]. Толщину подложки можно принять $\Delta_0 = 0,1..0,2$ мм.

Толщину щечек для каркасов рекомендуется принимать равной толщине каркаса. На данном этапе для упрощения расчета принимаем

$$\Delta h/2 = \Delta_{кор}. \quad (4.12)$$

Для бескаркасных (гильзовых) катушек зазор между торцом катушки и сердечником – изоляционный буртик $\Delta h/2$ определяют по таблице 4.3.

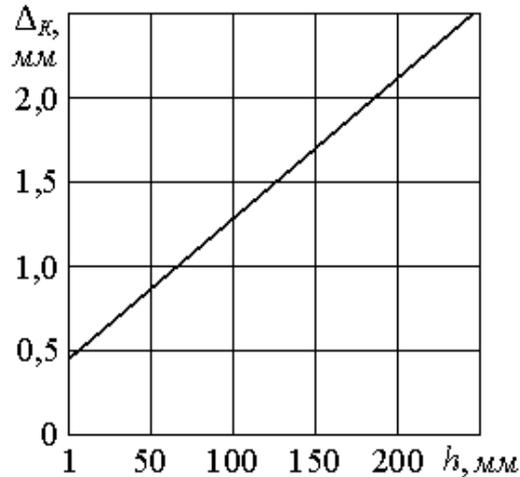


Рисунок 4.1 – Зависимость толщины каркаса от высоты окна обмотки

Таблица 4.3 – 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

4.3.3 Определяют высоту намотки катушки h_K

$$h_K = h - 2 \cdot \Delta h/2 = h - \Delta h, \quad (4.13)$$

где h – высота окна сердечника.

4.3.4 Рассчитывают площадь окна сердечника Q_{OK} , занимаемую только обмоткой, по формулам:

для броневое СД

$$Q_{OK} = h_K \cdot (c - \Delta_{КОР} - \delta_T); \quad (4.14)$$

для стержневого двухкатушечного СД

$$Q_{OK} = h_K \cdot (c - 2\Delta_{КОР} - \delta_T), \quad (4.15)$$

где c – ширина окна сердечника;

δ_T – минимальная величина технологического канала в окне сердечника – зазора между катушкой и сердечником для броневое СД и между катушками для стержневого двухкатушечного СД. Согласно рекомендациям [5, с.148] на данном этапе можно принять $\delta_T = 0,7$ мм.

4.3.5 Определяют коэффициент заполнения окна сердечника только обмоткой K_{OK} (без учета корпусной изоляции и технологических каналов)

$$K_{OK} = Q_{OK}/Q_O. \quad (4.16)$$

4.3.6 Рассчитывают фактический коэффициент заполнения окна сердечника проводниковым материалом

$$K_O = K_{OK} \cdot K_{КП}, \quad (4.17)$$

где $K_{КП}$ – коэффициент заполнения площади окна сердечника только проводниковым материалом. Он учитывает неплотность намотки и то, что провод имеет круглое сечение. $K_{КП}$ берется из таблицы 4.1.

4.3.7 Сравнивают полученное значение K_O с ранее принятым в пункте 3.2.1 K'_O . Если отношение рассчитанного и ранее принятого коэффициентов заполнения окна больше 1, но не больше 1,05, то есть

$$1,05 \geq K_O / K'_O > 1, \quad (4.18)$$

то расчет можно продолжить.

Если же $K_O < K'_O$ или $K_O > 1,05 \cdot K'_O$,
то расчет нужно повторить, начиная с расчета габаритного критерия N_{1P} или N_{2P} , приняв значение коэффициента заполнения равным расчетному.

4.4 Расчет максимальной величины индукции в сердечнике

4.4.1 Рассчитывают максимальную величину переменной составляющей индукции в сердечнике по формуле

$$B_{m.max} = \frac{U_{m.max}}{\omega_{П} W Q_C K_C}, \quad (4.20)$$

где $\omega_{П} = 2\pi f_{П}$ – круговая частота пульсаций переменной составляющей напряжения на дросселе.

4.4.2 Проверяют, не превышает ли максимальная величина индукции в сердечнике допустимой величины

$$B_0 + B_{m.max} \leq B_S, \quad (4.21)$$

где B_S – максимально допустимая рабочая индукция для выбранного магнитного материала (справочная величина – значение B при $H = 2500$ А/м).

Если условие (4.21) 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 N_{1P} или N_{2P} (подраздел 3.2).

4.5 Определение активных потерь в сердечнике

4.5.1 По рисунку 4.2 при заданной частоте пульсаций $f_{П}$ и при максимальной величине переменной составляющей индукции $B_{m.max}$ определяют удельные потери в материале сердечника $P'_{вд}$.

4.5.2 По рисунку 4.3 определяются коэффициенты увеличения удельных потерь в сердечнике, обусловленные неблагоприятными факторами:

K_H – коэффициент увеличения потерь, обусловленный действием постоянной составляющей индукции B_0 ;

K_G – коэффициент увеличения потерь из-за влияния геометрии сердечника, зависит преимущественно от ширины ленты b ;

K_3 – коэффициент увеличения потерь, обусловленный наличием немагнитного зазора δ ;

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

Необходимо отметить, что K_T определяется, прежде всего, уровнем технологии изготовления сердечников. Чем ниже уровень технологии, тем существеннее увеличиваются удельные потери исходного материала. При этом увеличение потерь тем значительнее, чем меньше толщина ленты Δ_L и чем выше частота пульсаций $f_{п}$. На рисунке 4.5 приведена зависимость $K_T(f_{п})$ для сердечников из холоднокатаных текстурованных сталей с толщиной ленты $\Delta_L = 0,15..0,35$ мм при хорошо отработанной технологии изготовления. При снижении уровня технологии K_T может увеличиться в несколько раз.

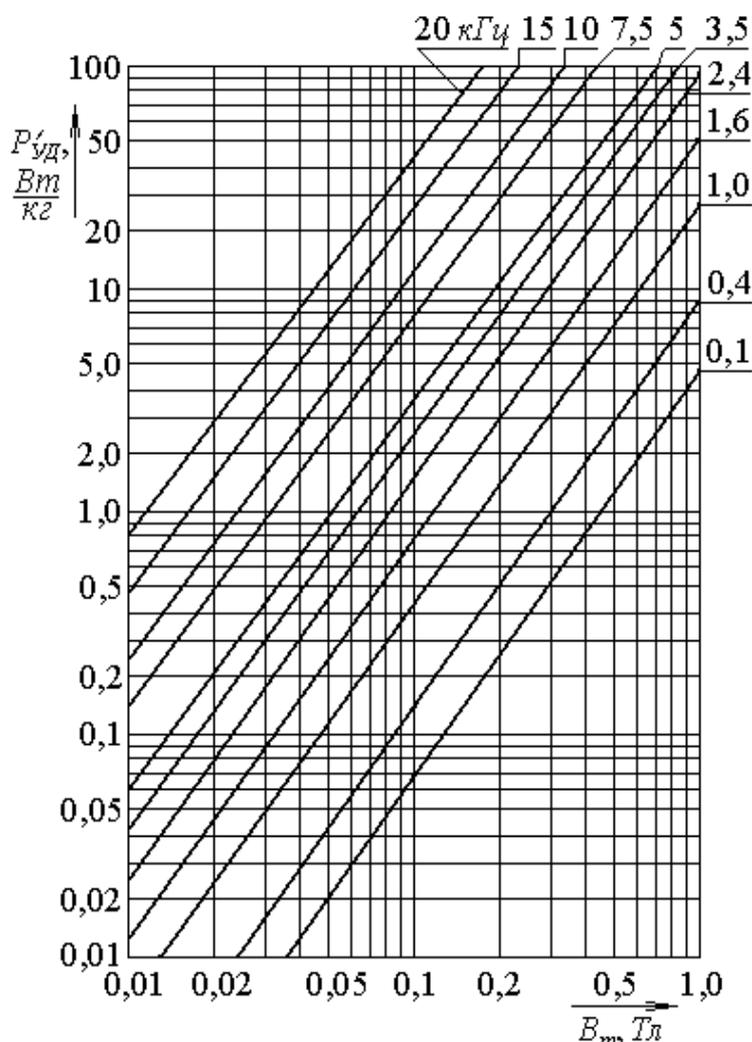


Рисунок 4.2 – Зависимость удельных потерь в стали 3422-0,08 мм от переменной составляющей индукции на частном цикле

4.5.3 Рассчитывают удельные потери в магнитопроводе $P_{уд}$

$$P_{уд} = P'_{уд} \cdot K_T \cdot K_H \cdot K_r \cdot K_3 \quad (4.21)$$

4.5.4 Определяют активные потери в сердечнике P_C

$$P_C = P_{уд} \cdot G_C, \quad (4.22)$$

где G_C – масса сердечника.

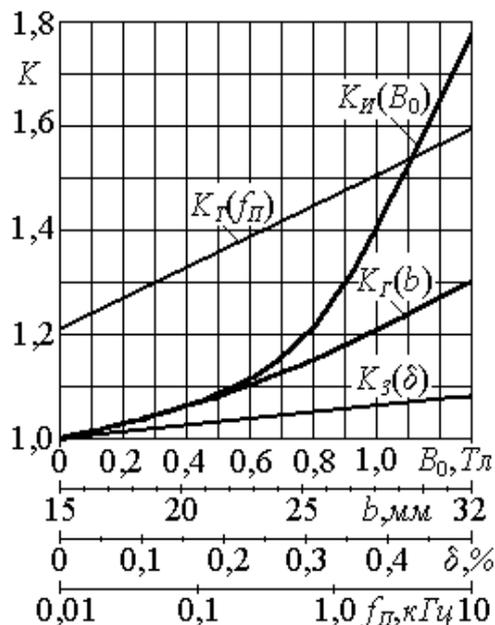


Рисунок 4.3 – Зависимости коэффициентов увеличения удельных потерь в сердечнике

4.6 Определение активных потерь в обмотке

4.6.1 Рассчитывают сопротивление обмотки дросселя

$$R_{l.PAC} = \frac{\rho_{20} \cdot K_H \cdot l_O \cdot W}{Q_{ПР}}, \quad (4.23)$$

где l_O – длина среднего витка обмотки, берется из таблицы 3.4;

$Q_{ПР}$ – стандартное сечение провода, берется из таблицы 4.1.

При расчете по падению напряжения полученная величина $R_{l.PAC}$ не должна превышать заданную допустимую величину сопротивления R_l , рассчитанную по формуле (3.2). Превышение расчетной величины $R_{l.PAC}$ над заданной R_l указывает на ошибки в расчетах.

4.6.2 Определяют максимальную амплитуду переменной составляющей тока

$$I_{m.max} = \frac{U_{m.max}}{\sqrt{(2\pi \cdot f_{II} \cdot L)^2 + R_l^2}}. \quad (4.24)$$

4.6.3 Рассчитывают действующее значение тока дросселя

$$I = \sqrt{I_{OH}^2 + 0,5 \cdot I_{m.max}^2}. \quad (4.25)$$

4.6.4 Определяют потери в обмотке

$$P_o = I^2 \cdot R_r \quad (4.26)$$

4.7 Определение максимальной температуры в обмотке

4.7.1 Среднюю температуру перегрева обмотки СД рассчитывают по формуле Р.Х. Бальяна [5]

$$\tau = \frac{(P_o + P_C)}{\alpha \cdot B \cdot S_o} \quad (4.27)$$

где α – коэффициент, пропорциональный коэффициенту теплоотдачи, рассчитывается по формуле (4.28);

B – расчетный коэффициент, берется из таблиц приложения Б или определяется по формуле (3.12);

S_o – площадь охлаждения катушки (обмотки) дросселя, берется из таблицы 3.4.

$$\alpha = \alpha_0 (1 - \Delta\alpha) \cdot \sqrt[4]{\frac{\tau}{50}} \cdot \sqrt[6]{\frac{0,05}{h_K}} \quad (4.28)$$

где α_0 – базовой коэффициент, пропорциональный коэффициенту теплоотдачи, определяется из таблицы 3.1;

$\Delta\alpha$ – коэффициент, учитывающий ухудшение теплообмена дросселя при пониженном давлении окружающей среды, определяется по рисунку 3.1 или рассчитывается по эмпирической формуле (3.5);

h_K – высота намотки катушки, на данном этапе принимается $h_K = h$, взятой из таблицы 3.4.

Средний перегрев обмотки τ' на данном этапе в первом приближении *при расчете по перегреву* рассчитывается по формуле (3.4), а *при расчете по падению напряжения* принимается $\tau' = 50$ К. Затем средний перегрев τ уточняется методом последовательных приближений по формулам (4.27) и (4.28) с точностью до 1 К.

4.7.2 Рассчитывается максимальная температура перегрева по формуле

$$\tau_{m.PAC} = \tau \cdot \Gamma, \quad (4.29)$$

где Γ – коэффициент неравномерности нагрева катушки, определяется из таблицы 3.1.

При расчете по второму расчетному случаю проводится сравнение расчетной величины $\tau_{m.PAC}$ с заданной в ТЗ τ_m .

Если $\tau_{m.PAC}$ незначительно меньше (не более, чем на 5...10 %) или равна τ_m , то расчеты можно продолжить. *Если $\tau_{m.PAC}$ значительно меньше τ_m , или*

$$\tau_{m.PAC} > \tau_m, \quad (4.30)$$

то вероятнее всего в предыдущих расчетах были допущены существенные ошибки. Тогда следует проверить правильность предыдущих расчетов и/или проконсультироваться с руководителем курсового проектирования.

4.7.3 Рассчитывается максимальная рабочая температура обмотки по формуле

$$t_{P.max} = t_{C.max} + \tau_m, \quad (4.31)$$

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

4.7.4 Проверяется соответствие выбранных в пунктах 2.5-2.7 материалов (каркаса, обмоточных проводов, изоляции) по классу нагревостойкости. Если они не соответствуют $t_{P.max}$, то необходимо выбрать другие.

4.8 Расчет оптимальной толщины немагнитной прокладки

4.8.1 Рассчитывают удельные ампервитки $F_{уд}$ по формуле

$$F_{уд} = \frac{I_{0H}W}{l_C} \quad (4.32)$$

где l_C – средняя силовая линия, берется из таблицы 3.4.

4.8.2 Определяется соотношение δ' / K_ϕ по формуле

$$\delta' / K_\phi = K_\delta \cdot F_{уд} \quad (4.33)$$

где $\delta' = \delta / l_C$ – относительная величина немагнитного зазора;

K_ϕ – коэффициент фиктивного немагнитного зазора;

K_δ – коэффициент пропорциональности между немагнитным зазором и ампервитками. Для холоднокатаных текстурованных сталей $K_\delta \approx 1,1 \cdot 10^{-6} \text{ м / А}$.

4.8.3 По рисункам 4.4–4.6 или из [2, рисунки 1.11–1.14] для соответствующих конструкций СД по величине соотношения δ' / K_ϕ и значениям безразмерных параметров x, y, z для выбранного сердечника определяется оптимальная, относительная величина немагнитной прокладки $\delta'_{п.опт}$.

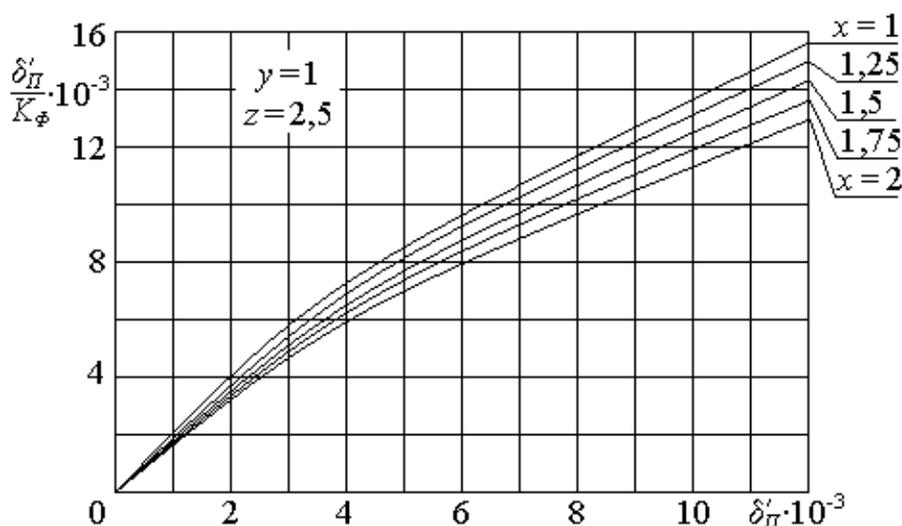


Рисунок 4.4 – Зависимости для определения оптимальной немагнитной прокладки с учетом выпучивания и рассеяния для броневых СД

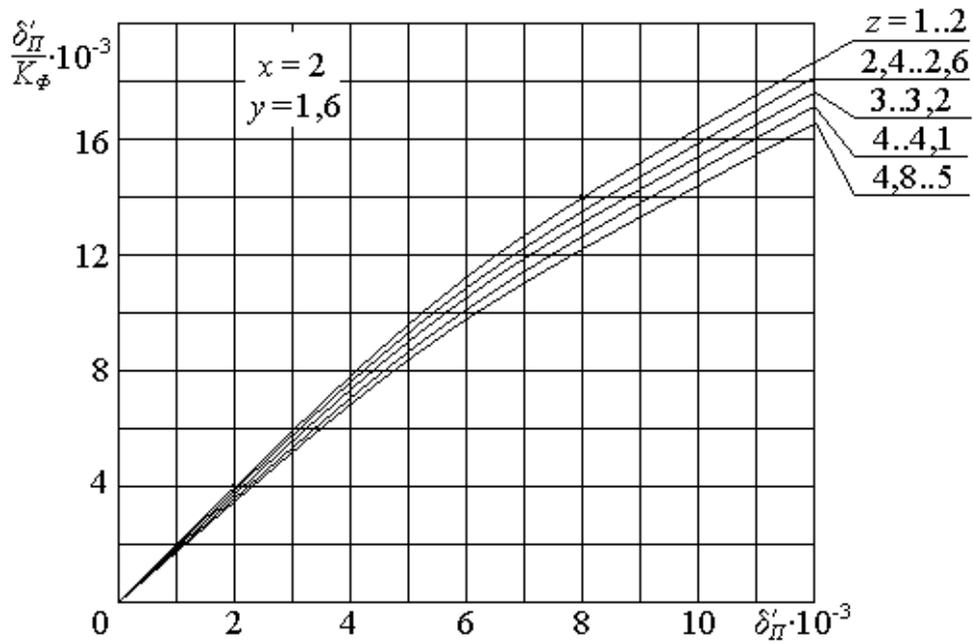


Рисунок 4.5 – Зависимости для определения оптимальной немагнитной прокладки с учетом выпучивания и рассеяния для стержневых СД

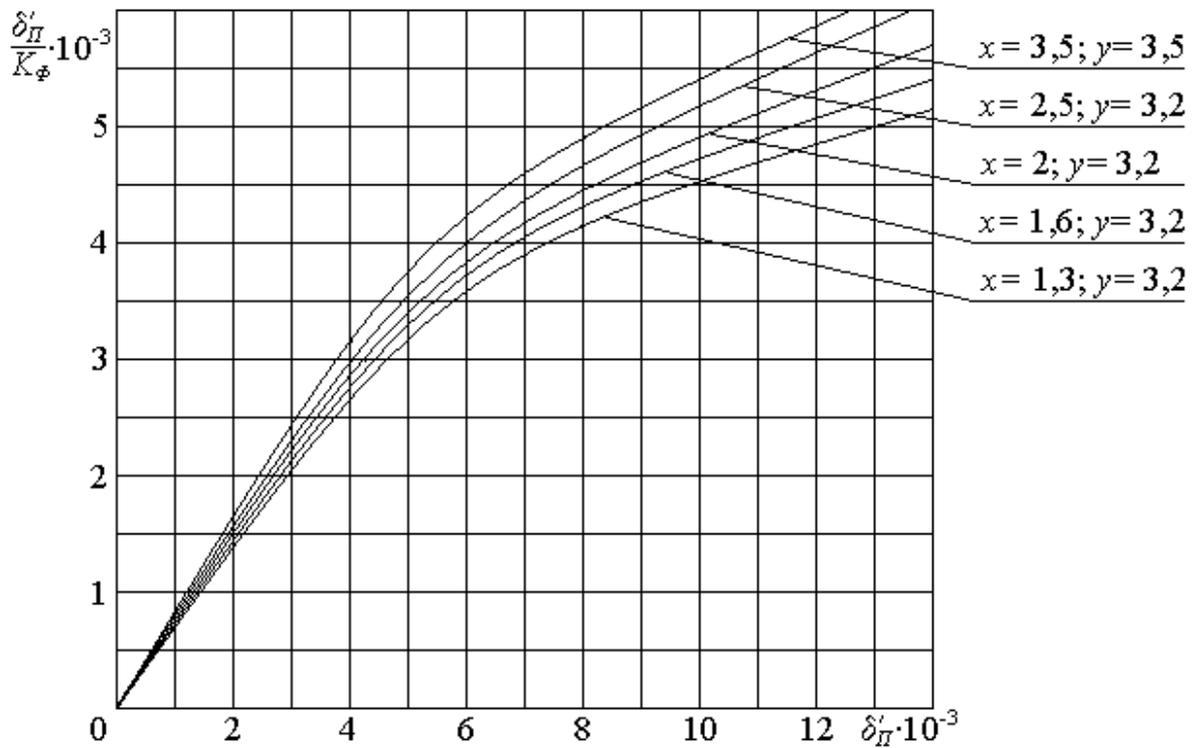


Рисунок 4.6 – Зависимости для определения оптимальной немагнитной прокладки с учетом выпучивания и рассеяния для тороидальных СД

4.8.4 Рассчитывается абсолютная величина оптимальной немагнитной прокладки

$$\delta_{п.опт} = \delta'_{п.опт} \cdot l_c. \quad (4.34)$$

4.8.5 Из существующей номенклатуры стандартных немагнитных материалов, обычно из электроизоляционных бумаг или электрокартона, подбираются прокладки, по толщине близкие к $\delta_{п.опт}$. Предпочтительнее выбирать толщину прокладки $\delta_{п}$, округляя $\delta_{п.опт}$ в большую сторону, так как зависимость $L(\delta_{п})$ в области $\delta_{п} > \delta_{п.опт}$ существенно положее, чем в области $\delta_{п} < \delta_{п.опт}$ (см. [1, рисунок 9.4]).

4.9 Расчет минимальной величины индуктивности дросселя

4.9.1 Рассчитывают минимальную величину переменной составляющей индукции в сердечнике по формуле (4.35)

$$B_{m.min} = \frac{U_{m.min}}{\omega_{п} W Q_C K_C}, \quad (4.35)$$

4.9.2 Рассчитывают вспомогательный коэффициент δ_{Φ}'' , характеризующий относительный немагнитный зазор в магнитопроводе с учетом эффектов выпучивания и рассеяния магнитного поля, по формуле

$$\delta_{\Phi}'' = (\delta / K_{\Phi}) \cdot K_C = K_{\delta} \cdot F_{уд} \cdot K_C. \quad (4.36)$$

4.9.3 При полученных значениях δ_{Φ}'' и $F_{уд}$ по рисунку 4.7 уточняют принятую в пункте 3.2.1 постоянную величину индукции в сердечнике B_0 .

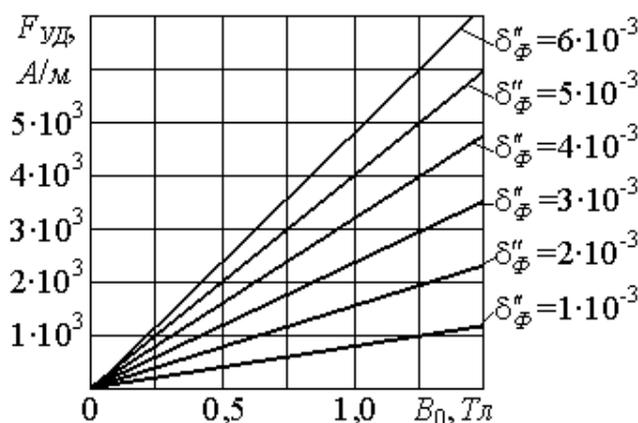


Рисунок 4.7 – Зависимость удельных ампервитков от постоянной составляющей индукции

4.9.4 При найденных значениях $B_{m.min}$ и B_0 по рисункам 4.8 определяют минимальную относительную величину средней проницаемости материала сердечника на частном цикле $\mu_{CP.min}$.

4.9.5 Рассчитывают минимальную относительную величину эквивалентной проницаемости магнитопровода $\mu_{\Sigma.min}$ по формуле

$$\mu_{\Sigma.min} = \frac{1}{1/\mu_{CP.min} + \delta_{\phi}^*} \cdot \quad (4.37)$$

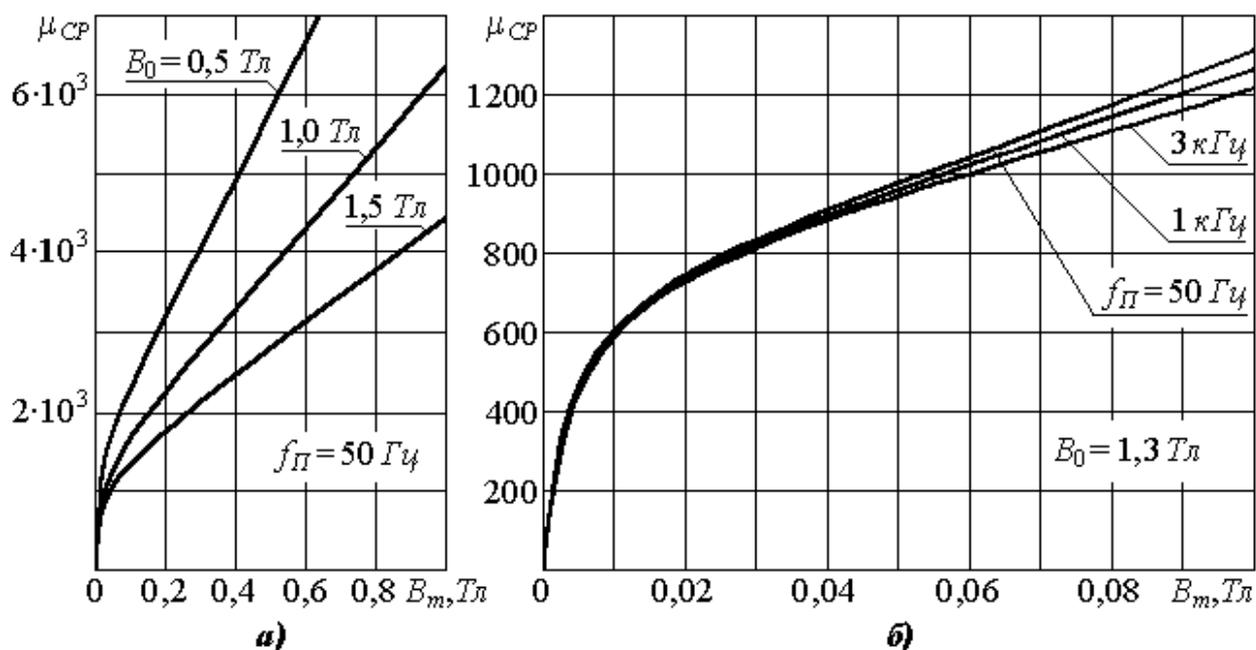


Рисунок 4.8 – Зависимости средней проницаемости μ_{CP} от переменной составляющей индукции B_m для стали 3422

4.9.6 Рассчитывают минимальную величину индуктивности дросселя L_{min} при по формуле

$$L_{min} = \frac{\mu_0 \mu_{\Sigma.min} W^2 Q_C K_C}{l_C} \quad (4.38)$$

Если полученное значение L_{min} меньше заданной величины, то необходимо проконсультироваться с руководителем курсового проектирования и при необходимости обеспечить заданное значение индуктивности путем увеличения типоразмера сердечника.

5 КОНСТРУКТИВНЫЙ РАСЧЕТ СГЛАЖИВАЮЩЕГО ДРОССЕЛЯ

5.1 Постановка задачи

Конструктивный расчет СД 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 дросселя. В связи с ограниченностью времени, отводимого на курсовое проектирование, рассмотрим лишь методики конструктивного расчета броневых, стержневых и тороидальных СД, конструкции которых представлены на рисунке 3.2. В основу предлагаемой методики положены работы [2, 3, 5].

Более подробно конструкции катушек и размещение обмотки дросселя в окне сердечника приведены на рисунках 5.1 и 5.2.

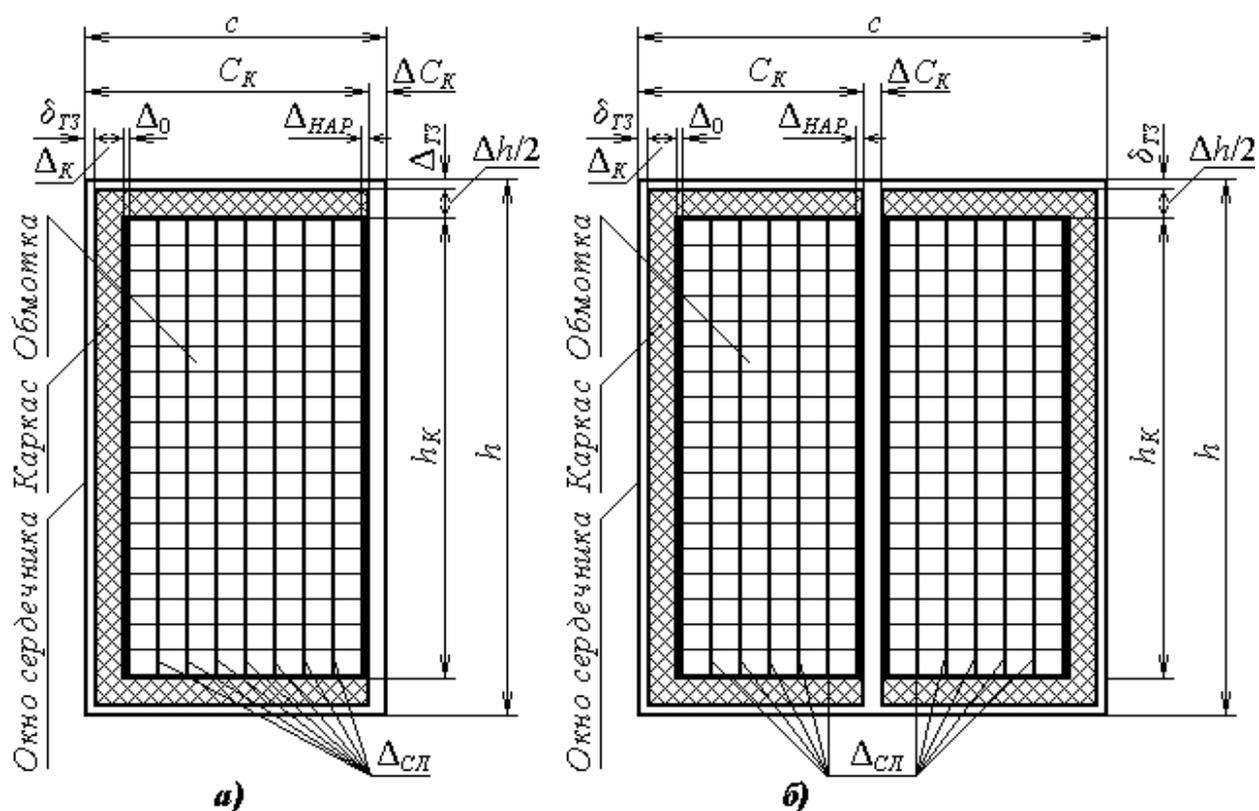


Рисунок 5.1 – Размещение обмотки в окне сердечника броневого (а) и стержневого двухкатушечного (б) дросселей

На рисунках 5.1 введены следующие условные обозначения:

c, h – ширина и высота окна сердечника.

h_k – высота намотки катушки;

C_k – толщина намотки катушки;

$\Delta_{СК}$ – технологический зазор между катушкой и сердечником для броневое СД и между катушками для стержневого СД;

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

$\Delta_{К}$ – толщина каркаса (гильзы);

$\Delta h/2$ – толщина щечек каркаса;

Δ_0 – толщина изоляции, наложенной на каркас (гильзу) между каркасом и первым слоем обмотки – подложка;

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

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

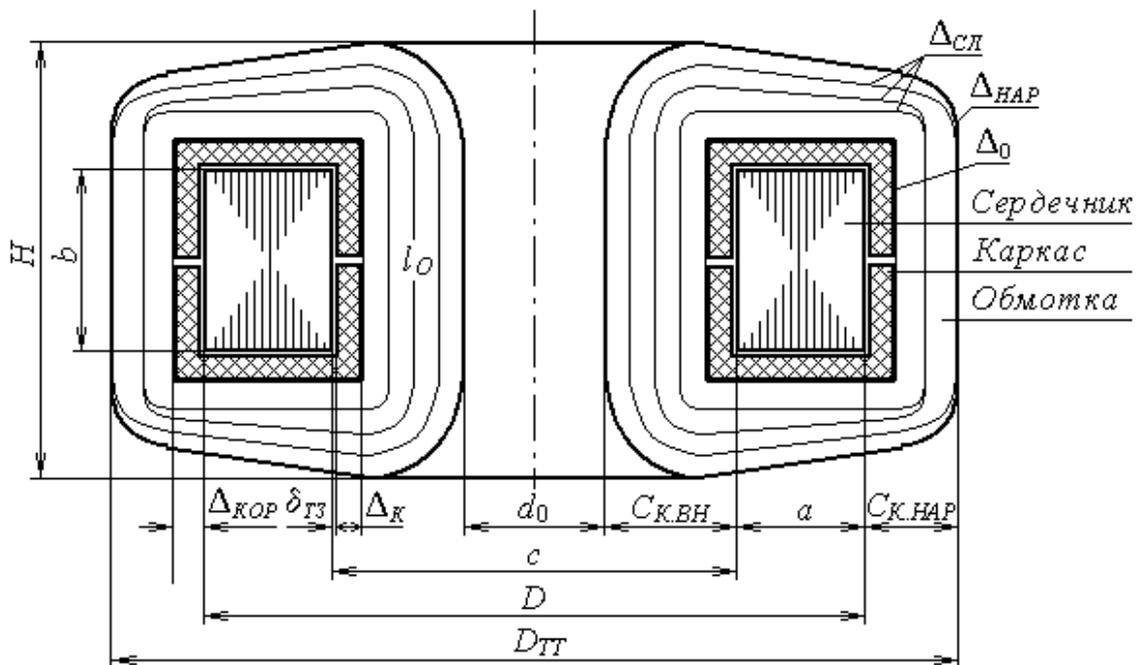


Рисунок 5.2 – Размещение обмотки в окне сердечника тороидального дросселя

В дополнение к принятым выше условным обозначениям на рисунке 5.2 для тороидального дросселя введены следующие условные обозначения:

a, b , – толщина и ширина сердечника;

c – внутренний диаметр сердечника;

$C_{К.ВН}, C_{К.НАР}$ – внутренняя и наружная толщина намотки катушки;

d_0 – диаметр технологического отверстия;

D – наружный диаметр тороидального сердечника;

$D_{ТТ}$ – наружный диаметр тороидального дросселя;

H – высота тороидального дросселя;

l_0 – длина среднего витка обмотки.

5.2 Уточнение конструкции катушки и определение типа намотки

Уточняется конструкция катушки – каркасная, бескаркасная (гильзовая), секционированная (см. подраздел 2.5) и определяется тип

намотки обмоток – рядовая виток к витку или внавал (без соблюдения порядовки).

5.3 Уточнение выбора изоляционных материалов и габаритных параметров каркаса

На данном этапе, прежде всего, следует уточнить с учетом результатов расчета максимальной рабочей температуры $t_{P,max}$ (см. пункт 4.7.3):

- марку материала и технологию изготовления каркаса (гильзы), выбранные ранее в подразделе 2.5;
- марку обмоточных проводов, выбранную в пункте 2.6;
- марки изоляционных материалов, выбранных в пункте 2.7.

При расчете по *заданному перегреву обмотки* должно выполняться условие

$$t_{P,max} \approx t_{P3,max} = t_{C,max} + \tau_m, \quad (5.1)$$

то есть расчетная величина максимальной рабочей температуры $t_{P,max}$ должна быть близкой к заданной в ТЗ максимальной рабочей температуре. Если условие (5.1) не выполняется, то нужно искать ошибки в расчетах и проконсультироваться у руководителя курсового проектирования.

При расчете на *заданное падение напряжения* на начальном этапе (раздел 3) принимается коэффициент нагрева $K_H = 1,28$, что соответствует $t_{P3,max} = 90^\circ\text{C}$. Если ранее выбранные материалы оказались не соответствующими по классу нагревостойкости, то выбираются другие изоляционные материалы и обмоточный провод, соответствующие расчетной температуре $t_{P,max}$.

Если никаких изменений в ранее принятых конструктивных решениях не проведено, то толщина корпусной изоляции (гильзы) $\Delta_{КОР}$ определяется по формуле (4.11), толщина щечек каркаса или изоляционного буртика $\Delta h/2$ и высота намотки катушки h_K берутся из подраздела 4.3.

Если приняты существенные изменения в ранее принятых конструктивных решениях, то следует уточнить габаритные параметры $\Delta_{КОР}$, $\Delta h/2$ и h_K каркаса (гильзы) по методике, изложенной в пунктах 4.3.1–4.3.3.

5.4 Расчет размещения обмотки в окне сердечника броневых и стержневых двухкатушечных дросселей

Конструктивный расчет размещения обмотки в окне сердечника сводится к расчету: числа витков в слое $W_{СЛ}$, числа слоев $n_{СЛ}$, толщины намотки обмотки C_O и катушки C_K , величины технологического зазора ΔC_K . В процессе расчета также необходимо определить толщину межслоевой и наружной изоляции и выбрать стандартные изоляционные материалы для их реализации. Рекомендуется перед намоткой первого слоя на каркас (гильзу) предварительно наложить два слоя изоляции. Для этой цели обычно используется материал межслоевой изоляции. Рассмотрим подробно методику расчета размещения обмотки в окне сердечника.

5.4.1 Рассчитывают число витков обмотки в одном слое по формуле

$$W_{сл} = \frac{h_K}{K_{НЕП} \cdot d_{ИЗ}}, \quad (5.2)$$

где $K_{НЕП}$ – коэффициент неплотности намотки (укладки) провода в осевом направлении, определяется по рисунку 5.3;

h_K – высота намотки катушки;

$d_{ИЗ}$ – диаметр провода в изоляции.

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

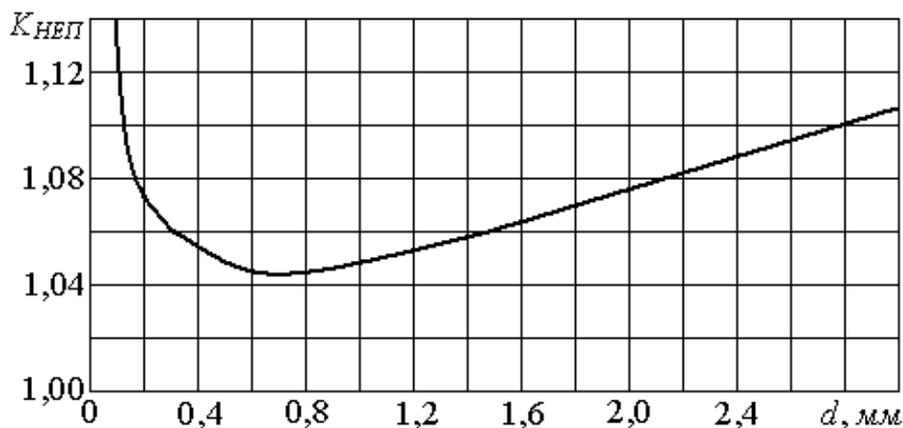


Рисунок 5.3 – Зависимость коэффициента неплотности намотки в осевом направлении от диаметра провода

5.4.2 Определяют число слоёв обмотки.

Для броневого дросселя обмотка размещается на одной катушке, а число слоёв рассчитывается по формуле (5.3)

$$n_{сл} = W / W_{сл}. \quad (5.3)$$

В стержневом дросселе обмотка размещается симметрично на двух катушках, что позволяет свести к минимуму уровень внешних магнитных полей и повысить электромагнитную совместимость СД с другими радиокомпонентами устройства. Поэтому для стержневых СД число слоёв рассчитывается по формуле (5.4)

$$n_{сл} = W / 2W_{сл}. \quad (5.4)$$

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

5.4.3 Определяют толщину межслоевой изоляции.

При рядовой намотке виток к витку толщина межслоевой изоляции $\Delta_{сл}$ выбирается не только из условий электрической, но и из условий механической прочности по рисунку 5.4 [5, 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 СД межслоевую изоляцию прокладывают через каждый слой обмотки. При диаметрах провода более 0,5 мм межслоевая изоляция в любом случае должна прокладываться через каждый слой [3, с.102]. Если провода диаметром более 1,3 мм, то в качестве межслоевой изоляции рекомендуется накладывать два слоя изоляционного материала с общей толщиной не менее 0,15 мм.

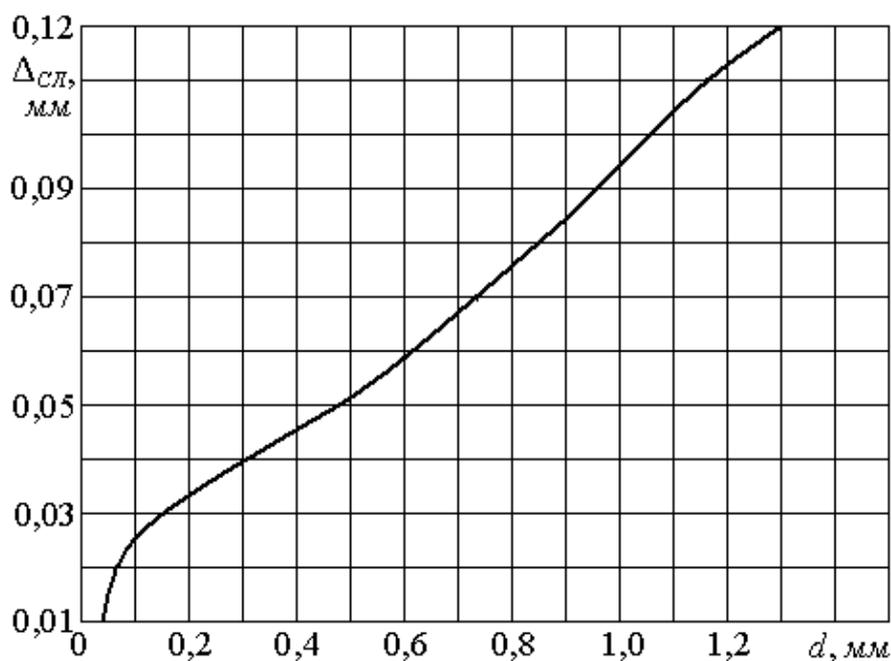


Рисунок 5.4 – Зависимость толщины межслоевой изоляции от диаметра провода

5.4.4 Наружная изоляция выбирается в зависимости от назначения СД 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 0,16..0,3 мм.

5.4.5 Для предотвращения нарушения изоляции обмоточного провода в процессе намотки на каркас (гильзу) накладывается обычно 1-2 слоя бумаги

толщиной по 0,1 мм ($\Delta_0 = 0,1..0,2$ мм). Наиболее часто для этой цели используется намоточная, пропиточная или кабельная бумага [5, с.198].

5.4.6 Рассчитывают радиальную толщину обмотки C_0

$$C_0 = [d_{ИЗ} \cdot n_{СЛ} + \Delta_{СЛ} \cdot (n_{СЛ} - 1)] \cdot K_{РАЗБ}, \quad (5.5)$$

где $d_{ИЗ}$ – диаметр провода в изоляции;

$K_{РАЗБ}$ – коэффициент разбухания обмотки в радиальном направлении, находится из рисунка 5.5.

Коэффициент разбухания обусловлен выпучиванием и неплотностью укладки провода в радиальном направлении и зависит как от диаметра провода, так и от соотношения $x = b/a$. 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 карасу (гильзе).

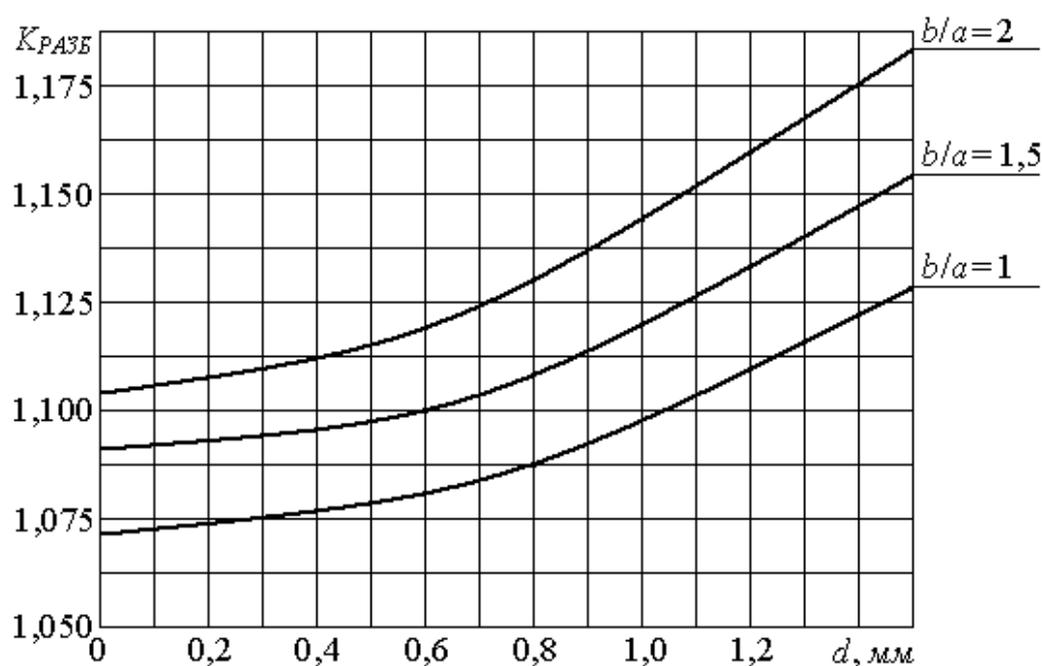


Рисунок 5.5 – Зависимость коэффициента разбухания обмотки в радиальном направлении от диаметра провода

5.4.7 Определяют полную толщину катушки в окне сердечника (см. рисунок 5.1)

$$C_K = \Delta_{КОР} + C_0 + \Delta_{НАР}. \quad (5.6)$$

5.4.8 Определяют величину технологического зазора (см. рисунок 5.1): для броневых дросселей между катушкой и сердечником по формуле (5.7)

$$\Delta C_K = c - C_K; \quad (5.7)$$

для стержневых дросселей между катушками по формуле (5.8)

$$\Delta C_K = c - 2C_K. \quad (5.8)$$

Оптимальным считается зазор $\Delta C_K = 0,5..1,0$ мм [3, 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 [5, с.148], что вполне согласуется с рекомендациями авторов работы [3].

5.4.9 Рассчитывается фактическая длина среднего витка обмотки l_O

$$l_O = 2(a + b + 4\Delta_{КОР}) + \pi \cdot C_O . \quad (5.9)$$

5.5 Конструктивный расчет тороидального дросселя

5.5.1 Общие рекомендации

Упрощенная конструкция тороидального дросселя приведена на рисунке 5.2. Конструкция катушки тороидального дросселя состоит из каркаса, обмотки и изоляционных материалов. Каркас может быть изготовлен из пластмассы путем горячего прессования или литья под давлением, как и каркасы для броневых и стержневых дросселей. В этом случае он представляет собой обойму, состоящую из двух одинаковых половинок (изображен на рисунке 5.2). Кроме того, корпусная изоляция тороидального дросселя может быть выполнена путем навивки изоляционной ленты на сердечник с половинным перекрытием с последующей пропиткой лаком или компаундом. Для этой цели используется стеклолента, лента из батиста или ленты из других изоляционных материалов. При этом на торцевые части сердечника обычно накладываются кольца из электрокартона толщиной 0,2 мм [3, с.109].

Обмотку в тороидальных СД рекомендуется размещать равномерно по всему периметру сердечника, что позволяет свести к минимуму поля рассеяния и внешние магнитные поля. Межслоевая изоляция в низковольтных тороидальных СД, как правило, не используется, так как витковая изоляция обмоточных проводов позволяет обеспечить необходимую электрическую прочность. Толщина каркаса Δ_K и величина технологического зазора $\delta_{ТЗ}$ определяются аналогично, как и для броневых дросселей.

Конструктивный расчет размещения обмотки в окне сердечника тороидальных дросселей значительно сложнее, чем броневых и стержневых СД. Это обусловлено, прежде всего, сложностью конструкции катушки. Методики расчета размещения обмоток на сердечнике приведены в работах [2, с.98, пункт 4.3.2], [3, с.108-113] и [5, с.196-197]. Все они основаны на определении числа слоев обмоток с внутренней (в окне) и 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.

С учетом выше сказанного, а также того, что в настоящее время при проектировании повсеместно используется вычислительная техника, предлагается весьма простая методика конструктивного расчета тороидального СД, 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 в витку, а по наружной стороне – с шагом. Поэтому и расчетные соотношения для расчета размещения обмотки изнутри и снаружи сердечника различные.

Так как в подавляющем большинстве случаев в тороидальных дросселях межслоевая изоляция не используется, то для упрощения методики расчета учитывать ее не будем.

5.5.2 Расчет размещения обмотки в окне сердечника

1) Рассчитывается число витков в n -ом слое с внутренней части обмотки $W_{СЛ.ВН.n}$ по формуле

$$W_{СЛ.ВН.n} = \frac{\pi \cdot [D_{ВН.0} - (2n_{ВН} - 1) \cdot d_{ИЗ} \cdot K_{РАЗБ}]}{d_{ИЗ} \cdot K_{НЕП}}, \quad (5.10)$$

где $D_{ВН.0}$ – диаметр окна сердечника после наложения корпусной изоляции;

$n_{ВН}$ – номер слоя обмотки в окне сердечника;

$d_{ИЗ}$ – диаметр обмоточного провода в изоляции;

$K_{РАЗБ}$ – коэффициент разбухания обмотки, определяется по рисунку 5.5;

$K_{НЕП}$ – коэффициент неплотности намотки, определяется по рисунку 5.3.

$$D_{ВН.0} = c - 2 \cdot \Delta_{КОР}, \quad (5.11)$$

где c – внутренний диаметр сердечника;

$\Delta_{КОР}$ – толщина корпусной изоляции, рассчитывается по формуле (4.11)

$$\Delta_{КОР} = \Delta_K + \Delta_{ТЗ} + \Delta_0,$$

Здесь Δ_K – толщина каркаса (гильзы), $\Delta_{ТЗ}$ – величина технологического зазора и Δ_0 – толщина подложки определяются согласно рекомендациям, приведенным в пункте 4.3.2. При определении Δ_K по рисунку 4.1 следует принять высоту намотки равной среднему диаметру сердечника, то есть

$$h = (D + c)/2. \quad (5.12)$$

При использовании программы для расчета $W_{СЛ.ВН.n}$ на каждом цикле следует осуществлять проверку условия

$$W - \sum W_{СЛ.ВН.n} \geq 0. \quad (5.13)$$

Расчет продолжается, пока выполняется условие (5.13). При ручном расчете контроль условия (5.13) можно осуществлять по мере необходимости.

2) Число слоев в окне сердечника будет равен числу циклов

$$n_{СЛ.ВН} = n_{ВН}. \quad (5.14)$$

3) Рассчитывается толщина обмотки в окне сердечника

$$C_{O.ВН} = n_{СЛ.ВН} \cdot d_{ИЗ} \cdot K_{РАЗБ} + \Delta_{НАР.ВН}, \quad (5.15)$$

где $\Delta_{НАР.ВН}$ – толщина наружной изоляции с внутренней стороны обмотки может быть определена по формуле

$$\Delta_{НАР.ВН} = \Delta_{НАР} \cdot K_{П.ИЗ.ВН}. \quad (5.16)$$

Здесь $\Delta_{НАР}$ – толщина изоляционной ленты; $K_{П.ИЗ.ВН}$ – коэффициент перекрытия изоляционной ленты внутри катушки. Практически $K_{П.ИЗ.ВН}$ равен числу слоев изоляции внутри катушки. Принимается $K_{П.ИЗ.ВН} = 3..4$ и впоследствии уточняется.

4) Определяется диаметр технологического отверстия d_0 после наложения наружной изоляции

$$d_0 = c - 2(\Delta_{КОР} + C_{O.ВН}). \quad (5.17)$$

5) Определяется допустимый диаметр технологического отверстия $\delta_{ТТ}$, необходимого для свободного прохода челнока намоточного станка. Согласно рекомендациям из [5, с.148] $\delta_{ТТ}$ можно приближенно рассчитать по формуле

$$\delta_{ТТ} = \sqrt{\frac{c^2 + 2bc}{10 + 4c}}. \quad (5.18)$$

Здесь внутренний диаметр c и ширина b сердечника в мм.

6) Проверяется условие свободного прохода челнока намоточного станка в технологическом отверстии

$$d_0 - \delta_{ТТ} > 0. \quad (5.19)$$

Если условие (5.19) выполняется, то неполный последний слой при необходимости может быть дополнен, а при выполнении неравенства (5.20)

$$d_0 - \delta_{ТТ} \geq d_{ИЗ} \cdot K_{РАЗБ} \quad (5.20)$$

может быть добавлен еще один слой обмотки. При этом, естественно, необходимо уточнить число витков обмотки W , число слоев $n_{СЛ.ВН}$ и толщину обмотки $C_{O.ВН}$.

Если условие (5.19) не выполняется, то необходимо уменьшить коэффициент заполнения окна обмоткой K_O и повторить все расчеты, начиная с подраздела 3.2.

7) Рассчитывается внутренняя толщина намотки катушки $C_{К.ВН}$

$$C_{К.ВН} = \Delta_{КОР} + C_{O.ВН}. \quad (5.21)$$

8) Уточняется коэффициент заполнения окна обмоткой K_O

$$K_O = \frac{4Q_{ПР} \cdot W}{\pi \cdot c^2}, \quad (5.22)$$

где $Q_{ПР}$ – площадь сечения стандартного провода (см. таблицу 4.1).

Если полученная величина K_O существенно отличается от ранее принятой, то необходимо ее скорректировать и повторить расчеты, начиная с подраздела 3.2.

5.5.3 Расчет размещения обмотки на наружной стороне сердечника

1) Рассчитывается число витков в n -ом слое с наружной части обмотки $W_{СЛ.НАР.n}$ по формуле

$$W_{СЛ.НАР.n} = \frac{\pi \cdot [D_{НАР.0} + (2n_{НАР} - 1) \cdot d_{ИЗ} \cdot K_{РАЗБ}]}{d_{ИЗ} \cdot K_{НЕП}}, \quad (5.23)$$

где $D_{НАР.0}$ – наружный диаметр сердечника после наложения корпусной изоляции. При использовании литых или прессованных каркасов $D_{НАР.0} \approx D_{ВН.0}$;

$n_{НАР}$ – номер слоя обмотки с наружной стороны.

В процессе расчета $W_{СЛ.НАР.n}$, как и в пункте 5.5.2, проверяется условие

$$W - \sum W_{СЛ.НАР.n} \geq 0. \quad (5.24)$$

Расчет продолжается, пока выполняется условие (5.23).

2) Определяется число слоев обмотки с наружной стороны

$$n_{СЛ.НАР} = n_{НАР}. \quad (5.25)$$

3) Рассчитывается наружная толщина обмотки

$$C_{О.НАР} = n_{СЛ.НАР} \cdot d_{ИЗ} \cdot K_{РАЗБ} + \Delta_{НАР.НАР}, \quad (5.26)$$

где $\Delta_{НАР.НАР}$ – толщина наружной изоляции с наружной стороны обмотки

$$\Delta_{НАР.НАР} = \Delta_{НАР} \cdot K_{П.ИЗ.НАР}, \quad (5.27)$$

где $K_{П.ИЗ.НАР}$ – коэффициент перекрытия изоляционной ленты снаружи катушки. Обычно снаружи изоляционная лента накладывается с половинным перекрытием. Тогда $K_{П.ИЗ.НАР} = 2$.

4) Рассчитывается внешняя толщина намотки катушки $C_{К.НАР}$

$$C_{К.НАР} = \Delta_{КОР} + C_{О.НАР}. \quad (5.28)$$

5.5.4 Расчет геометрических параметров тороидального дросселя

Определяются габаритные размеры дросселя: наружный диаметр $D_{НАР}$ и высота дросселя H (см. рисунок 5.2)

$$D_{НАР} = D_{ТТ} = D + 2C_{К.НАР}, \quad (5.29)$$

$$H = b + 2C_{К.ВН}. \quad (5.30)$$

Весьма важным параметром для дросселя является длина среднего витка обмотки l_0 . Ее можно определить как длину средней линии сечения обмотки (рисунок 5.2).

$$l_0 = 2 \left[b + 2\Delta_{КОР} + \sqrt{(a + 2\Delta_{КОР})^2 + (R_{ВН} - R_{НАР})^2 / 4} \right] + \pi(R_{ВН} + R_{НАР}), \quad (5.31)$$

где $R_{ВН}$ и $R_{НАР}$ – внутренняя и наружная толщина обмотки без наружной изоляции

$$R_{ВН} = n_{СЛ.ВН} \cdot d_{ИЗ} \cdot K_{РАЗБ}, \quad R_{НАР} = n_{СЛ.НАР} \cdot d_{ИЗ} \cdot K_{РАЗБ}. \quad (5.32)$$

5.6 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 дросселя. 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].

$$\Delta_{\text{ПОКР}} = \sqrt{\frac{\tau \cdot D_{\text{ДИФ}}}{-\ln \frac{P_3 - P_{\text{КР}}}{2(P_3 - P_0)}}}, \quad (5.33)$$

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 $OB = 90\%$ 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 $OB = 5\%$ при температуре $t = 20\text{ }^\circ\text{C}$.

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

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

где P – парциальное давление насыщенных водяных паров при определенной температуре, определяется по таблице 5.1;

OB_i – относительная влажность, при которой определяется парциальное давление, %.

Таблица 5.1 – 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 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФАКТИЧЕСКИХ ТЭП ДРОССЕЛЯ

6.1 Уточнение электромагнитных параметров дросселя

6.1.1 Рассчитывается активное сопротивление обмотки дросселя $R_{l.PAC}$

$$R_{l.PAC} = \frac{P_{20} \cdot K_H \cdot l_O \cdot W}{Q_{ПП}} \quad , \quad (6.1)$$

где l_O – длина среднего витка обмотки, берется из раздела 5;

K_H – коэффициент нагрева, рассчитывается по формуле

$$K_H = \alpha_T(t_{C.max} + \tau - 20). \quad (6.2)$$

Здесь τ – средний перегрев, берется из подраздела 4.7.

6.1.2 Определяется падение напряжения в обмотке по формуле

$$\Delta U = I \cdot R_{l.PAC}, \quad (6.3)$$

где I – действующее значение тока, рассчитанное в пункте 4.6.3.

Если расчет ведется по первому расчетному случаю, то полученное значение ΔU не должно превышать падение напряжения, заданное в ТЗ.

6.1.3 Рассчитываются активные потери в обмотке P_O

$$P_O = I^2 \cdot R_{l.PAC}. \quad (6.4)$$

6.1.4 Уточняется максимальный перегрев обмотки τ_m по формуле

$$\tau_m = \frac{(P_O + P_C) \cdot \Gamma}{\alpha \cdot B \cdot S_O} \quad , \quad (6.5)$$

где параметры P_C , Γ , α и S_O берутся из раздела 4, а коэффициент B рассчитывается по формуле (3.12). При этом значение коэффициента ν_P уточняется по формуле

$$\nu_P = P_C / P_O. \quad (6.6)$$

Если расчет ведется по второму расчетному случаю, то полученное значение τ_m не должно превышать максимальный перегрев обмотки, заданный в ТЗ.

6.1.5 Уточняется максимальная рабочая температура обмотки

$$t_{P.max} = t_{C.max} + \tau_m. \quad (6.7)$$

Если $t_{P.max}$ существенно больше максимальной рабочей температуры, рассчитанной в подразделе 4.7, то при необходимости проводится коррекция выбора изоляционных материалов.

6.1.6 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.**

6.2 Расчет технико-экономических показателей дросселя

6.2.1 Рассчитываются габаритные размеры дросселя A , B , H , D_{TT} (см. рисунок 3.2) без учета влагозащитного покрытия по формулам:

для броневой конструкции

$$A = 2(a + c), \quad B = b + 2C_K, \quad H = a + h; \quad (6.8)$$

для стержневой конструкции

$$A = 2(a + C_K) + c, \quad B = b + 2C_K, \quad H = 2a + h; \quad (6.9)$$

для тороидальной конструкции

$$D_{TT} = D + 2C_{K.HAP}, \quad (6.10)$$

$$H = b + 2C_{K.BH}. \quad (6.11)$$

Здесь фактическая толщина намотки катушек C_K , $C_{K.HAP}$ и $C_{K.BH}$ берется из раздела 5 для соответствующих конструкций дросселей.

6.2.2 Определяется габаритный объем дросселя V_{DP} по формулам: для броневой и стержневой конструкции

$$V_{DP} = A \cdot B \cdot H, \quad (6.12)$$

для тороидальной конструкции

$$V_{DP} = D_{TT}^2 \cdot H, \quad (6.13)$$

6.2.3 Рассчитывается масса провода (катушки) G_K по формуле

$$G_K = l_0 \cdot W \cdot Q_{PP} \cdot \gamma_0, \quad (6.14)$$

где Q_{PP} – сечение стандартного провода, m^2 ;

γ_0 – плотность материала обмоточного провода, kg/m^3

6.2.3 Определяется масса основных материалов дросселя

$$G_{DP} = G_C + G_K, \quad (6.15)$$

где G_C – масса сердечника, берется из таблицы 3.4.

6.2.4 Рассчитывается стоимость основных материалов дросселя

$$Ц_{DP} = G_C \cdot ц_C + G_K \cdot ц_0, \quad (6.16)$$

где $ц_C$ и $ц_0$ – цены выбранных материалов сердечника и обмоточного провода, $руб/kg$, находятся как в пункте 3.5.3.

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 Гольдштейн Е.И., Майер А.К. Индуктивно-емкостные сглаживающие фильтры. - Томск: Изд-во ТГУ, 1982.- 222 с.
- 3 Белопольский И.И. и др. Расчет трансформаторов и дросселей малой мощности М.: Энергия, 1973.- 400 с.
- 4 Каретникова Е.И. и др. Трансформаторы питания и дроссели фильтров РЭА.- М.: Сов. радио, 1973.- 180 с.
- 5 Бальян Р.Х. Трансформаторы для радиоэлектроники.- М.: Сов. радио, 1971.- 720 с.
- 6 Справочник по электротехническим материалам / Под ред. Ю.В. Корицкого и др. Т.3. – Л.: Энергоатамиздат, 1988. – 728 с.
- 7 Электротехнический справочник / Под ред. Профессоров МЭИ. Т.1. – М.: Энергия, 1980, 520 с.
- 8 Масленников М.Ю., Соболев Е.А. и др. Справочник разработчика и конструктора РЭА. Кн.1 и 2.- М.: Энергоатомиздат, 1993.- 299 с.
- 9 Справочник по электротехническим материалам / Под ред. Ю.В. Корицкого и др. Т.2. – М.: Энергоатамиздат, 1987. – 464с.
- 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.

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

B – расчетный коэффициент.

Γ – коэффициент неравномерности нагрева катушки.

OB – относительная влажность.

ζ_C и ζ_O – цены материалов сердечника и провода обмотки.

ζ_K, ζ_C – стоимость материалов обмотки и сердечника.

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

a_1, a_2 – базовые размеры оптимального сердечника, определяемые по первому и второму расчетным случаям.

A, B, H – габаритные размеры броневого и стержневого дросселей.

B_0 – постоянная составляющая магнитной индукции.

$B_{m.max}, B_{m.min}$ – максимальная и минимальная величина переменной составляющей индукции.

B_S – максимально допустимая рабочая индукция магнитного материала.

c – внутренний диаметр троидального сердечника.

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

$C_{O.VH}, C_{O.HAP}$ – толщина обмотки с внутренней и наружной стороны тороидального дросселя.

C_K – толщина намотки катушки.

$C_{K.VH}, C_{K.HAP}$ – внутренняя и наружная толщина намотки катушки тороидального дросселя.

d – диаметр провода без изоляции.

d_0 – диаметр технологического отверстия тороидального дросселя.

$d_{ИЗ}$ – диаметр провода с изоляцией.

D – наружный диаметр троидального сердечника.

$D_{VH.0}, D_{HAP.0}$ – внутренний и наружный диаметр тороидального сердечника после наложения корпусной изоляции.

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

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

$f_{П}$ – частота пульсаций переменной составляющей напряжения на дросселе.

$F_{УД}$ – удельные ампервитки дросселя.

$G_{ДР}, G_K, G_C$ – масса дросселя, катушки и сердечника.

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

h_K – высота намотки катушки.

H – высота тороидального дросселя.

$H_{норм}$ – нормальное атмосферное давление воздуха.

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

I – действующее значение тока.

I_{0H} – номинальный ток дросселя.

$K_{Г}$ – коэффициент увеличения потерь из-за влияния геометрии сердечника.

- K_3 – коэффициент увеличения потерь, обусловленный наличием немагнитного зазора.
- K_{II} – коэффициент увеличения потерь, обусловленный действием постоянной составляющей индукции.
- $K_{КП}$ – коэффициент заполнения окна магнитопровода проводниковым материалом (без изоляции).
- 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_{OK} – коэффициент заполнения окна сердечника только обмоткой.
- K_{OT} – коэффициент заполнения окна обмоткой для типового трансформатора.
- $K_{П.ИЗ.ВН}$, $K_{П.ИЗ.НАР}$ – коэффициент перекрытия изоляционной ленты внутри и с наружи катушки.
- $K_{РАЗБ}$ – 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_ϕ – коэффициент фиктивного немагнитного зазора.
- $K_d = d_0/a$ – безразмерный коэффициент технологического отверстия тороидального дросселя/
- K_{hk} , K_{IC} , K_{IO} , K_{QO} , K_{QC} , K_{SO} , K_{VO} , K_{VC} – безразмерные коэффициенты геометрических характеристик дросселя.
- K_δ – коэффициент пропорциональности между немагнитным зазором и ампервитками.
- l_O – длина среднего витка обмотки.
- l_C – длина средней силовой линии магнитопровода.
- L_H – индуктивность номинальная.
- L_{min} – расчетная минимальная величина индуктивности дросселя.
- $n_{ВН}$, $n_{НАР}$ – номер слоя обмотки с внутренней и наружной стороны сердечника тороидального дросселя.
- $n_{Г1}$, $n_{Г2}$ – безразмерные коэффициенты типовых габаритных критериев.
- $n_{СЛ}$ – число слоев обмотки.
- $n_{СЛ.ВН}$, $n_{СЛ.НАР}$ – число слоев обмотки с внутренней и наружной стороны тороидального дросселя.
- N_{1P} , N_{2P} – расчетные габаритные критерии по первому и второму расчетным случаям.
- N_{1T} , N_{2T} – типовые габаритные критерии нормализованных сердечников по первому и второму расчетным случаям.
- P – парциальное давление насыщенных водяных паров при определенной температуре.

- P_0 – парциальное давление водяных паров в условиях консервации.
- P_3 – парциальное давление водяных паров при максимальной влажности, заданной в ТЗ
- P_{KR} – критическое значение парциального давления водяных паров внутри покрытия.
- P_O – активные потери в обмотке.
- P_C – активные потери в сердечнике.
- $P_{уд}$ – удельные потери в магнитопроводе (в сердечнике).
- $P'_{уд}$ – удельные потери в материале сердечника.
- $R_{ВН}, R_{НАР}$ – внутренняя и наружная толщина обмотки тороидального дросселя без наружной изоляции.
- Q_O – площадь окна сердечника.
- Q_{OK} – площадь окна сердечника, занимаемая только обмоткой (без изоляции).
- $Q_{ПР}$ – сечение провода стандартного.
- $Q_{ПР.Р}$ – сечение провода расчетное.
- Q_C – площадь сечения сердечника.
- R_t – допустимое активное сопротивление обмотки дросселя в рабочем режиме.
- $R_{t.РАС}$ – расчетное активное сопротивление обмотки дросселя в рабочем режиме.
- S_O, S_C – площади охлаждения обмотки и сердечника.
- $t_{P.max}$ – максимальная расчетная величина рабочей температуры обмотки СД.
- $t_{P3.max}$ – максимальная рабочая температура обмотки, заданная в ТЗ.
- $t_{C.min}, t_{C.max}$ – минимальная и максимальная температура среды, заданная в ТЗ.
- $U_{ДОП}$ – максимально допустимое напряжение на выводах обмотки дросселя.
- $U_{ИСП}$ – испытательное напряжение дросселя.
- $U_{т.max}, U_{т.min}$ – максимальная и минимальная амплитуда переменной составляющей напряжения в обмотке.
- $V_{ДР}$ – габаритный объем дросселя.
- W – число витков обмотки.
- $W_{СЛ}$ – число витков в слое обмотки.
- $W_{СЛ.ВН.n}, W_{СЛ.НАР.n}$ – число витков в n -ом слое с внутренней и наружной части обмотки тороидального дросселя.
- x, y, z, k_d – основные безразмерные параметры сердечников.
- α – коэффициент, пропорциональный коэффициенту теплоотдачи.
- α_0 – коэффициент, пропорциональный коэффициенту теплоотдачи для типовых конструкций в нормальных условиях эксплуатации.
- α_T – температурный коэффициент увеличения удельного сопротивления материала провода.
- β_G и β_C – вспомогательные коэффициенты.
- β_S – отношение площадей охлаждения сердечника и обмотки.
- δ – величина немагнитного зазора.

δ' – относительная величина немагнитного зазора.

δ'_{II} – относительная величина немагнитной прокладки.

$\delta_{II.OPT}$ – оптимальная величина немагнитной прокладки.

δ_T – минимальная величина технологического канала в окне сердечника.

δ_{TT} – допустимый диаметр технологического отверстия в тороидальном дросселе.

$\delta_{\text{н}}$ – относительный немагнитный зазор в магнитопроводе с учетом эффектов выпучивания и рассеяния магнитного поля.

γ_O, γ_C – плотности материалов обмотки и сердечника.

$\mu_{CP.min}$ – минимальная относительная величина средней проницаемости материала сердечника на частном цикле.

$\mu_{Э.min}$ – минимальная относительная величина эквивалентной проницаемости магнитопровода.

ν_P – отношение потерь в сердечнике к потерям в обмотке.

ρ_{20} – удельное сопротивление материала проводника при 20 °С.

τ – средний перегрев обмотки, срок службы дросселя.

τ_m – максимальная температура перегрева обмотки.

$\tau_{m.PAC}$ – расчетная величина максимальной температуры перегрева обмотки.

ω_{II} – круговая частота пульсаций переменной составляющей напряжения на дросселе.

Δ_0 – толщина подложки – изоляции, наложенной на каркас (гильзу).

Δ_K – толщина каркаса (гильзы).

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

Δ_L – толщина ленты сердечника.

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

$\Delta_{НАР.ВН}, \Delta_{НАР.НАР}$ – толщина наружной изоляции с внутренней и с наружной стороны обмотки тороидального дросселя.

$\Delta_{ПОКР}$ – толщина влагозащитного покрытия.

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

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

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

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

Δh – удвоенная толщина щечек каркаса.

ΔU – допустимое падение напряжения.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

(справочное)

СПРАВОЧНЫЕ ДАННЫЕ НОРМАЛИЗОВАННЫХ СЕРДЕЧНИКОВ

Таблица А.1 - справочные данные сердечников типа ШЛ по НП 0.666.001

Типо- размер $a \times b$, мм	c , мм	h , мм	$l_c \cdot 10^{-3}$, м	$l_o \cdot 10^{-3}$, м	$Q_c \cdot 10^{-4}$, м ²	$Q_o \cdot 10^{-4}$, м ²	$S_o \cdot 10^{-4}$, м ²	$N_1 \cdot 10^{-10}$, м ⁵	$N_2 \cdot 10^{-12}$, м ⁷	β_s	G_c , г	G_{KT} , г	K_{OT}
6 × 6,5 6 × 8 6 × 10 6 × 12,5	6	15	51,0	43,8 46,8 50,9 55,8	0,38 0,48 0,6 0,75	0,9	10	0,0297 0,0443 0,0636 0,0907	0,0064 0,01 0,0152 0,0247	1,0 1,1 1,3 1,6	13 16 20 25	4,3 4,6 5,0 5,6	0,12
8 × 8 8 × 10 8 × 12,5 8 × 16	8	20	68	57,1 61,1 66,1 73,2	0,64 0,8 1,0 0,28	1,6	18	0,1145 0,1675 0,242 0,358	0,0423 0,065 0,101 0,167	1,0 1,1 1,3 1,6	30 36 45 57	15 16 17 19	0,18
10 × 10 10 × 12,5 10 × 16 10 × 20	10	25	85	71,4 76,4 83,4 91,4	1,0 1,25 1,6 2,0	2,5	28	0,35 0,511 0,741 1,06	0,253 0,296 0,465 0,743	1,0 1,1 1,3 1,6	57 70 90 112	35 38 41 45	0,22
12 × 12,5 12 × 16 12 × 20 12 × 25	12	30	102	86,6 93,5 101,8 111,5	1,5 1,9 2,4 3,0	3,6	40	0,909 1,38 2,04 2,83	0,699 1,105 1,765 2,73	1,0 1,1 1,3 1,6	170 130 165 205	70 75 80 90	0,25

Окончание таблицы А.1

Типо- размер $a \times b$, мм	c , мм	h , мм	$l_c \cdot 10^{-3}$, м	$l_o \cdot 10^{-3}$, м	$Q_c \cdot 10^{-4}$, м ²	$Q_o \cdot 10^{-4}$, м ²	$S_o \cdot 10^{-4}$, м ²	$N_1 \cdot 10^{-10}$, м ⁵	$N_2 \cdot 10^{-12}$, м ⁷	β_s	G_c , кГ	G_{KT} , кГ	K_{OT}
16 × 16 16 × 20 16 × 25 16 × 32	16	40	136	114,3 122,2 132,1 146,2	2,6 3,2 4,0 5,1	6,4	70	3,62 5,22 7,52 11,11	4,64 6,98 10,88 18,0	1,0 1,1 1,3 1,6	240 300 370 470	190 200 220 240	0,28
20 × 20 20 × 25 20 × 32 20 × 40	20	50	171	142,8 152,5 166,8 182,3	4,0 5,0 6,4 8,0	10	110	10,9 16,2 23,85 34,6	21,25 32,95 52,5 85,25	1,0 1,1 1,3 1,6	0.46 0.58 0.74 0.92	0,39 0,40 0,46 0,50	0,30
25 × 25 25 × 32 25 × 40 25 × 50	25	62,5	213	178,3 192,5 208 228,1	6,25 8,0 10,0 12,5	15,6	175	33,6 51,2 73,5 104,5	100,2 154,25 247 392	1,0 1,1 1,3 1,6	0.9 1.2 1.5 1.8	0,81 0,87 0,95 1,04	0,32
32 × 32 32 × 40 32 × 50 32 × 64	32	80	273	228 244 264 292,1	10,2 12,8 16,0 20,4	25,6	285	115,9 126 246 360	539 612 1293 2112	1,0 1,1 1,3 1,6	1.9 2.4 3.0 3.8	1,8 1,9 2,1 2,3	0,34
40 × 40 40 × 50 40 × 64 40 × 80	40	100	342	283,5 305,9 333,8 365	16,0 20,0 25,6 32,0	40	445	358 510 776 1110	2483 3685 6075 9720	1,0 1,1 1,3 1,6	3.7 4.7 6.0 7.5	3,6 3,9 4,2 4,6	0,35

Таблица А.2 - Справочные данные сердечников типа ПЛ по НП 0.666.001

Типоразмер $a \times b \times h$, мм	c , мм	$l_c \cdot 10^{-3}$, м	$l_o \cdot 10^{-3}$, м	$Q_c \cdot 10^{-4}$, м ²	$Q_o \cdot 10^{-4}$, м ²	$S_o \cdot 10^{-4}$, м ²	$N_1 \cdot 10^{-10}$, м ⁵	$N_2 \cdot 10^{-12}$, м ⁷	β_s	G_c , з	G_{KT} , з	K_{OT}
6,5×12,5×8	8	52	50,5	0,91	0,64	12	0,083	0,024	1,00	28	2	0,07
6,5×12,5×10		56			0,8	14	0,104	0,033	0,93	30	3	0,08
6,5×12,5×12,5		61			1	17	0,130	0,043	0,70	33	4	0,09
6,5×12,5×16		68			1,28	30	0,166	0,058	0,60	37	6	0,10
8×12,5×12,5	10	69	46,6	1,0	1,25	21	0,221	0,093	0,76	47	8	0,13
8×12,5×16		76			1,6	25	0,283	0,137	0,78	51	12	0,14
8×12,5×20		84			2	30	0,353	0,180	0,65	57	16	0,15
8×12,5×25		94			2,5	36	0,442	0,250	0,54	63	21	0,16
10×12,5×20	12,5	96	64,6	1,25	2,5	38	0,586	0,367	0,55	80	27	0,20
10×12,5×25		106			3,1	45	0,639	0,435	0,45	90	36	0,20
10×12,5×32		116			4	55	0,947	0,710	0,35	100	48	0,21
10×12,5×40		136			5	67	1,19	1,017	0,30	115	61	0,21
12,5×16×25	16	120	82,5	2,0	4	60	1,905	1,83	0,55	165	67	0,23
12,5×16×32		134			5,1	73	2,425	2,56	0,45	185	90	0,24
12,5×16×40		150			6,4	88	3,06	3,54	0,35	205	115	0,24
12,5×16×50		170			8,0	106	3,82	5,0	0,30	230	145	0,25
12,5×25×30	20	138	106,4	3,1	6	90	5,43	7,45	0,55	290	150	0,26
12,5×25×40		158			8	115	7,19	11,5	0,45	330	210	0,26
12,5×25×50		178			10	135	8,93	15,3	0,35	380	260	0,27
12,5×25×60		198			12	160	10,8	21,2	0,30	420	320	0,27

Окончание таблицы А.2

Типоразмер $a \times b \times h$, мм	c , мм	$l_c \cdot 10^{-3}$, м	$l_o \cdot 10^{-3}$, м	$Q_c \cdot 10^{-4}$, м ²	$Q_o \cdot 10^{-4}$, м ²	$S_o \cdot 10^{-4}$, м ²	$N_1 \cdot 10^{-10}$, м ⁵	$N_2 \cdot 10^{-12}$, м ⁷	β_s	G_c , кГ	G_{KT} , кГ	K_{OT}
16×32×40 16×32×50 16×32×65 16×32×80	25	180 200 230 260	135	5,1	10 12,5 16,3 20	150 180 220 270	19,3 24,0 31,4 38,5	42,7 58,3 83,5 117,8	0,55 0,45 0,35 0,30	640 710 800 920	350 450 590 740	0,29
20×40×50 20×40×60 20×40×80 20×40×100	32	227 247 287 327	170,2	8,0	16 19,2 25,6 31	240 280 350 420	59,4 71,4 95,0 118,5	203 259 389 543	0,55 0,45 0,35 0,30	1,3 1,4 1,6 1,8	0,76 0,92 1,25 1,58	0,31
25×50×65 25×50×80 25×50×100 25×50×120	40	288 318 358 398	212,2	12,5	26 32 40 48	390 450 540 630	188,3 232 290 348	997 1300 1770 2323	0,55 0,45 0,35 0,30	2,5 2,8 3,1 3,5	1,6 2,0 2,6 3,1	0,34
32×64×80 32×64×100 32×64×130 32×64×160	50	360 400 460 520	270	20,5	40 50 65 80	600 710 880 1060	615 768 996 1230	4830 6530 9450 13130	0,55 0,45 0,35 0,30	5,1 5,7 6,5 7,4	3,3 4,2 5,5 6,8	0,35
40×80×100 40×80×120 40×80×160 40×80×200	64	453 490 573 653	340,4	32	64 77 102 128	960 1100 1400 1700	1919 2289 3060 3848	13300 29250 44600 63700	0,55 0,45 0,35 0,30	9,9 10,8 12,6 14,3	6,9 8,4 11,2 14,1	0,35

Таблица А.3 - Справочные данные сердечников типа ОЛ по НП 0.666.001

Типоразмер $c \times D \times b$, мм	a , мм	d_0 , мм	H , мм	$l_c \cdot 10^{-3}$, м	$l_o \cdot 10^{-3}$, м	$Q_c \cdot 10^{-4}$, м ²	$Q_o \cdot 10^{-4}$, м ²	$S_o \cdot 10^{-4}$, м ²	$N_1 \cdot 10^{-10}$, м ⁵	$N_2 \cdot 10^{-12}$, м ⁷	G_c , з	G_{KT} , з	K_{OT}
10x16x4 10x16x5 10x16x6,5 10x16x8	3	7,2 7,7 8,5 9,2	6,8 7,3 8,0 8,8	41	17,4 18,8 20,9 23,0	0,12 0,15 0,20 0,24	0,8	9 9 10 11	0,0066 0,0096 0,0154 0,0200	0,00083 0,00119 0,00208 0,00294	3 4 5 6	2,2 2,5 2,8 3,1	0,10
12x20x5 12x20x6,5 12x20x8 12x20x10	4	8,1 8,9 9,5 10,4	8,9 9,6 10,5 11,6	50	22,6 24,7 27,0 29,0	0,20 0,26 0,32 0,40	1,1	13 14 15 17	0,0195 0,0301 0,0417 0,0607	0,00337 0,00555 0,00811 0,0132	7 9 11 13	4,5 5,0 5,5 6,5	0,12
16x26x6,5 16x26x8 16x26x10 16x26x12.5	5	9,5 10,2 11,0 11,9	13,0 13,8 15,0 16,6	66	30,6 32,9 35,9 39,9	0,33 0,40 0,50 0,63	2	22 24 26 28	0,0711 0,0974 0,1391 0,1988	0,0196 0,0290 0,0442 0,0669	14 18 22 27	12 14 15 17	0,15
20x32x8 20x32x10 20x32x12,5 20x32x16	6	10,7 11,5 12,5 13,7	17,3 18,5 20,0 22,3	82	38,9 42,0 45,9 51,5	0,48 0,60 0,75 0,95	3	32 34 35 38	0,1779 0,2859 0,3678 0,5254	0,0679 0,1147 0,1500 0,2284	25 32 40 52	20 20 19 18	0,16 0,14 0,12 0,10
25x40x10 25x40x12,5 25x40x16 25x40x20	7,5	12,2 13,1 14,2 15,4	22,8 24,4 26,8 29,6	102	49,9 53,9 59,7 66,3	0,75 0,95 1,20 1,50	5	52 55 58 62	0,5641 0,8375 1,027 1,696	0,334 0,519 0,661 1,148	51 64 82 102	48 48 48 46	0,18 0,17 0,15 0,13

Окончание таблицы А.3

Типоразмер $c \times D \times b$, мм	a , мм	d_0 , мм	H , мм	$l_c \cdot 10^{-3}$, м	$l_o \cdot 10^{-3}$, м	$Q_c \cdot 10^{-4}$, м ²	$Q_o \cdot 10^{-4}$, м ²	$S_o \cdot 10^{-4}$, м ²	$N_1 \cdot 10^{-10}$, м ⁵	$N_2 \cdot 10^{-12}$, м ⁷	G_c , г	G_{KT} , г	K_{OT}
32x50x16	9	14,9	33,1	129	69,9	1,45	8	90	2,406	2,320	125	128	0,21
32x50x20		16,1	35,9		76,6	1,8		95	3,383	3,400	155	131	0,19
32x50x25		17,5	39,5		85,1	2,25		100	4,760	4,950	195	134	0,18
32x50x32		19,3	44,7		97,1	2,9		110	6,930	7,770	250	135	0,16
40x64x20	12	16,8	43,2	163	90,7	2,4	13	145	8,257	12,27	270	290	0,23
40x64x25		18,1	46,9		99,4	3,0		155	11,77	18,44	330	300	0,22
40x64x32		19,9	52,1		111	3,8		170	16,86	28,47	420	310	0,21
40x64x40		21,7	58,3		125	4,8		185	23,89	43,08	530	320	0,19
50x80x25	15	18,9	56,1	204	116	3,8	20	235	24,98	57,59	520	610	0,26
50x80x32		20,6	61,4		126	4,8		250	36,63	88,49	670	650	0,25
50x80x40		22,4	67,6		142	6,0		270	50,74	130,3	803	700	0,23
50x80x50		24,4	75,6		160	7,5		300	70,40	197,1	1040	750	0,22
64x100x32	18	21,5	74,5	258	149	5,8	32	380	72,34	257,2	1000	1350	0,28
64x100x40		23,2	80,8		163	7,2		410	101,8	358,3	1300	1500	0,27
64x100x50		25,2	88,8		181	9,0		440	143,4	573,4	1600	1600	0,26
64x100x64		27,7	100,3		206	11,5		480	205,3	877,5	2000	1750	0,25
80x128x40	24	24,1	95,9	327	192	9,6	50	620	240,6	1338	2100	2800	0,29
80x128x50		26,1	103,9		209	12,0		660	343,8	2009	2700	3100	0,29
80x128x64		28,5	115,5		235	15,4		720	505,0	3162	3400	3400	0,28
80x128x80		31,1	128,9		264	19,2		780	698,2	4651	4300	3700	0,27

Таблица А.4 - Справочные данные сердечников типа ШЛМ по НП 0.666.001

Типоразмер $a \times b \times h$, мм	c , мм	$l_c \cdot 10^{-3}$, м	$l_o \cdot 10^{-3}$, м	$Q_c \cdot 10^{-4}$, м ²	$Q_o \cdot 10^{-4}$, м ²	$S_o \cdot 10^{-4}$, м ²	$N_1 \cdot 10^{-10}$, м ⁵	$N_2 \cdot 10^{-12}$, м ⁷	β_s	G_c , г	$G_{кт}$, г	$K_{от}$
8×6,5×13	5	50	44,7	0,5	0,65	8,5	0,036	0,0081	1,4	18	2,2	0,08
8×8×13			47,8	0,6			0,049	0,0113	1,5	22	2,3	
8×10×13			51,7	0,8			0,080	0,0205	1,8	28	2,5	
8×12,5×13			56,7	1,0			0,115	0,0321	2,1	36	2,8	
8×16×13			63,6	1,25			0,159	0,0486	2,4	44	3,1	
10×8×18	6	70	54,8	0,8	1,1	14,0	0,128	0,0444	1,4	36	7,0	0,13
10×10×18			58,8	1,0			0,187	0,0670	1,5	45	7,5	
10×12,5×18			63,8	1,25			0,269	0,1069	1,8	56	8,0	
10×16×18			70,8	1,6			0,397	0,1731	2,1	72	9,0	
10×20×18			78,8	2,0			0,558	0,2646	2,4	91	10,0	
12×10×23	8	80	69	1,2	1,8	23,0	0,375	0,2054	1,4	70	22	0,19
12×12,5×23			73	1,5			0,546	20314	1,5	90	24	
12×16×23			81	1,9			0,801	0,5039	1,8	115	26	
12×20×23			89	2,4			1,163	0,8027	2,1	150	28	
12×25×23			97	3,0			1,634	1,2526	2,4	180	32	
16×12,5×26	9	100	85	2,0	2,3	31,0	1,079	0,7806	1,4	135	39	0,21
16×16×26			92,4	2,6			1,685	1,2590	1,5	175	42	
16×20×26			100	3,2			2,349	1,9510	1,8	215	45	
16×25×26			110	4,0			3,337	3,0402	2,1	270	50	
16×32×26			124	5,1			4,814	4,7720	2,4	350	56	

Окончание таблицы А.4

Типоразмер $a \times b \times h$, мм	c, мм	$l_c \cdot 10^{-3}$, м	$l_o \cdot 10^{-3}$, м	$Q_c \cdot 10^{-4}$, м²	$Q_o \cdot 10^{-4}$, м²	$S_o \cdot 10^{-4}$, м²	$N_1 \cdot 10^{-10}$, м⁵	$N_2 \cdot 10^{-12}$, м⁷	β_s	G_c, з	$G_{кт}$, з	$K_{от}$
20×16×36	12	130	102	3,2	4,3	55	4,01	5,1332	1,4	290	110	0,25
20×20×36			110	4,0			5,84	7,7140	1,5	370	120	
20×25×36			120	5,0			8,42	12,236	1,8	440	130	
20×32×36			134	6,4			12,4	19,695	2,1	580	140	
20×40×36			150	8,0			17,4	29,923	2,4	730	150	
25×20×45	15	160	137	5,0	6,8	85	12,4	22,361	1,4	0,57	240	0,28
25×25×45			147	6,3			18,3	34,315	1,5	0,71	250	
25×32×45			161	8,0			27,0	55,952	1,8	0,91	280	
25×40×45			177	10,0			38,4	87,240	2,1	1,1	300	
25×50×45			197	12,5			53,9	133,309	2,4	1,4	340	

Таблица А.5 - Справочные данные сердечников типа ПЛМ по НП 0.666.001

Типоразмер $a \times b \times h$, мм	c , мм	$l_c \cdot 10^{-3}$, м	$l_o \cdot 10^{-3}$, м	$Q_c \cdot 10^{-4}$, м ²	$Q_o \cdot 10^{-4}$, м ²	$S_o \cdot 10^{-4}$, м ²	$N_1 \cdot 10^{-10}$, м ⁵	$N_2 \cdot 10^{-12}$, м ⁷	β_s	G_c , кз	$G_{кт}$, кз	$K_{от}$
22×32×28	19	160	138	7,1	5,3	105	19,4	39,76	1,0	0,8	0,17	0,26
22×32×36		180			6,8	125	24,9	53,14	0,8	0,9	0,22	
22×32×46		200			8,7	150	31,8	72,72	0,65	1,0	0,29	
22×32×58		220			11,0	185	40,2	103,4	0,55	1,1	0,37	
27×40×36	24	210	172	11	8,7	170	61,31	194,9	1,0	1,6	0,37	0,29
27×40×46		230			11,0	190	77,52	241,6	0,8	1,7	0,49	
27×40×58		250			13,9	240	97,96	344,2	0,65	1,9	0,63	
27×40×73		280			17,5	260	123,3	428,5	0,55	2,2	0,80	
34×50×46	30	260	215	17	13,8	270	185,4	901,3	1,0	3,1	0,80	0,31
34×50×58		290			17,4	320	233,8	1183	0,8	3,4	1,00	
34×50×73		320			21,9	380	294,2	1579	0,65	3,8	1,30	
34×50×90		350			27,0	450	362,7	2111	0,55	4,2	1,70	

Таблица А.5 - Справочные данные сердечников типа ШЛР по НП 0.666.004

Типоразмер $a \times b \times h$, мм	c, мм	$l_c \cdot 10^{-3}$, м	$l_o \cdot 10^{-3}$, м	$Q_c \cdot 10^{-4}$, м²	$Q_o \cdot 10^{-4}$, м²	$S_o \cdot 10^{-4}$, м²	$N_1 \cdot 10^{-10}$, м⁵	$N_2 \cdot 10^{-12}$, м⁷	β_s	G_c, кГ	G_{KT}, кГ	K_{OT}
10×12,5×20 10×16×20 10×20×20	7	70	67 74 82	1,25 1,6 2,0	1,4	17	0,33 0,48 0,68	0,159 0,267 0,418	1,9 2,3 2,7	60 77 96	14 15 17	0,16
12×20×25 12×25×25 12×32×25	8	90	89 98 113	2,4 3,0 3,8	2	24	1,29 1,82 2,55	0,864 1,379 2,133	1,9 2,3 2,7	140 175 220	30 35 40	0,19
16×20×32 16×25×32 16×32×32 16×40×32	8	110	97 107 121 137	3,2 4,0 5,1 6,4	2,6	33	2,74 3,88 5,58 7,77	2,409 3,839 6,134 9,387	1,9 2,3 2,7 3,1	240 300 390 480	45 50 55 65	0,20
20×25×40 20×32×40 20×40×40 20×50×40	10	130	121 135 151 171	5,0 6,4 8,0 10,0	4	51	8,24 12,1 16,9 23,3	10,813 17,869 27,742 42,114	1,9 2,3 2,7 3,1	470 600 750 940	100 110 125 145	0,23

Таблица А.6 - Справочные данные сердечников типа ПЛР по НП 0.666.004

Типоразмер $a \times b \times h$, мм	c, мм	$l_c \cdot 10^{-3}$, м	$l_o \cdot 10^{-3}$, м	$Q_c \cdot 10^{-4}$, м²	$Q_o \cdot 10^{-4}$, м²	$S_o \cdot 10^{-4}$, м²	$N_1 \cdot 10^{-10}$, м⁵	$N_2 \cdot 10^{-12}$, м⁷	β_s	G_c, г	G_{KT}, г	K_{OT}
10×12,5×32 10×16×32 10×20×32 10×25×32	8	110	57,6 64,6 72,6 82,6	1,2 1,6 2,0 2,5	2,6	42 45 48 51	0,65 1,03 1,43 1,97	0,373 0,634 0,969 1,414	0,35 0,35 0,4 0,4	100 130 160 200	16 18 20 23	0,12
12,5×16×40 12,5×20×40 12,5×25×40 12,5×32×40	10	140	72,7 80,7 90,7 104,7	2,0 2,5 3,1 4,0	4	66 70 74 81	2,20 3,10 4,24 6,11	1,916 2,861 4,264 6,731	0,35 0,35 0,4 0,4	190 250 310 400	45 50 55 65	0,17
14×20×45 14×25×45 14×32×45 14×36×45	11,5	160	86 96 110 118	2,8 3,5 4,5 5,0	5,2	86 92 99 103	4,74 6,63 9,57 11,0	5,272 7,894 12,62 15,12	0,35 0,35 0,4 0,4	310 390 500 570	80 90 100 110	0,20
16×20×60 16×25×60 16×32×60 16×40×60	16	200	97 107 121 137	3,2 4,0 5,1 6,4	9,6	140 150 160 170	10,1 14,3 20,6 28,7	17,50 26,55 41,95 62,00	0,35 0,35 0,4 0,4	460 580 740 930	210 230 260 300	0,25

Окончание таблицы А.6

Типоразмер $a \times b \times h$, мм	c , мм	$l_c \cdot 10^{-3}$, м	$l_o \cdot 10^{-3}$, м	$Q_c \cdot 10^{-4}$, м ²	$Q_o \cdot 10^{-4}$, м ²	$S_o \cdot 10^{-4}$, м ²	$N_1 \cdot 10^{-10}$, м ⁵	$N_2 \cdot 10^{-12}$, м ⁷	β_s	G_c , к2	G_{KT} , к2	K_{OT}
18×25×71 18×32×71 18×40×71 18×45×71	18	240	114 128 144 154	4,5 5,8 7,2 8,1	13	190 200 215 220	23,0 34,1 46,7 55,3	52,53 81,82 124,1 150,3	0,35 0,35 0,4 0,4	0,75 0,95 1,2 1,4	0,36 0,40 0,45 0,48	0,27
21×36×85 21×40×85 21×45×85	25	290	153 161 171	7,6 8,4 9,5	21	310 315 325	79,1 91,9 111	286,4 337,9 432,6	0,35 0,35 0,4	1,5 1,7 1,9	0,90 0,93 0,98	0,30
25×40×100 25×45×100 25×50×100	28	340	174 184 194	10,0 11,3 12,5	28	410 420 430	169 191 226	747,1 924,2 1131,6	0,35 0,35 0,4	2,4 2,7 3,0	1,3 1,4 1,5	0,31
28×40×120 28×45×120 28×50×120	32	390	186 196 206	11,2 12,6 14,0	38	540 550 570	256 307 361	1521,4 1861,1 2334,7	0,35 0,35 0,4	3,1 3,5 3,9	2,1 2,2 2,3	0,32

ПРИЛОЖЕНИЕ Б
(справочное)

Параметры сглаживающих дросселей с оптимальной геометрией

Таблица Б.1 – Дроссели броневых типа при $m_1=1$ и $v_p=0$

x	y	z	K_{Ic}	K_{Io}	K_{Qc}	K_{Qo}	K_{hk}	K_{sc}	K_{so}	β_s
2,2	0,5	1,0	4,57	7,97	2,2	0,50	1,0	29,76	8,71	3.42
2,2	0,6	1,2	5,17	8,28	2,2	0,72	1,2	32,32	11,58	2.79
2,0	0,6	1,3	5,37	7,88	2,0	0,78	1,3	30,70	12,16	2.52
2,2	0,7	1,4	5,77	8,60	2,2	0,98	1,4	34,88	14,83	2.35
2,3	0,8	1,6	6,37	9,11	2,3	1,28	1,6	38,70	18,46	2.10
2,1	0,8	1,7	6,57	8,71	2,1	1,36	1,7	36,79	19,16	1.92
2,2	0,9	1,8	6,97	9,23	2,2	1,62	1,8	40,00	22,46	1.78
2,7	0,5	1,5	5,57	8,97	2,7	0,75	1,5	38,60	11,28	3.42

Окончание таблицы Б.1

x	y	z	K_A	K_B	K_D	K_{vc}	K_{vo}	K_V	B
2,2	0,5	1,0	3,0	3,2	2,0	10,05	3,99	19,20	3.65
2,2	0,6	1,2	3,2	3,4	2,2	11,37	5,97	23,94	3.16
2,0	0,6	1,3	3,2	3,2	2,3	10,74	6,15	23,55	2.95
2,2	0,7	1,4	3,4	3,6	2,4	12,69	8,43	29,38	2.82
2,3	0,8	1,6	3,6	3,9	2,6	14,65	11,66	36,50	2.63
2,1	0,8	1,7	3,6	3,7	2,7	13,80	11,85	35,96	2.49
2,2	0,9	1,8	3,8	4,0	2,8	15,33	14,95	42,56	2.38
2,7	0,5	1,5	3,0	3,7	2,5	15,04	6,73	27,75	3.65

Таблица Б.2 – Дроссели броневых типа при $m_1=1,3$ и $v_p=0$

x	y	z	K_{Ic}	K_{Io}	K_{Qc}	K_{Qo}	K_{hk}	K_{sc}	K_{so}	β_s
3,0	0,6	1,0	4,77	9,88	3,0	0,60	1,0	39,58	10,43	3.79
3,0	0,8	1,0	5,17	10,51	3,0	0,80	1,0	42,78	14,24	3.00
3,0	0,96	1,0	5,49	11,01	3,0	0,96	1,0	45,34	17,66	2.57
3,0	1,1	1,0	5,77	11,45	3,0	1,10	1,0	47,58	20,91	2.28
2,8	1,2	1,0	5,97	11,37	2,8	1,20	1,0	46,56	23,38	1.99
2,6	1,3	1,14	6,45	11,28	2,6	1,48	1,14	46,40	27,40	1.69
2,5	1,5	1,29	7,15	11,71	2,5	1,94	1,29	48,87	34,86	1.40
3,0	0,5	1,0	4,57	9,57	3,0	0,50	1,0	37,98	8,71	4.36

Окончание таблицы Б.2

x	y	z	K_A	K_B	K_D	K_{vc}	K_{vo}	K_V	B
3,0	0,6	1,0	3,2	4,2	2,0	14,31	5,93	26,88	4.82
3,0	0,8	1,0	3,6	4,6	2,0	15,51	8,41	33,12	4.02
3,0	0,96	1,0	3,9	4,9	2,0	16,47	10,57	38,57	3.59
3,0	1,1	1,0	4,2	5,2	2,0	17,31	12,60	43,68	3.30
2,8	1,2	1,0	4,4	5,2	2,0	16,72	13,64	45,76	3.00
2,6	1,3	1,14	4,6	5,2	2,1	16,77	16,72	51,19	2.70
2,5	1,5	1,29	5,0	5,5	2,3	17,88	22,66	62,98	2.41
3,0	0,5	1,0	3,0	4,0	2,0	13,71	4,79	24,00	5.39

Таблица Б.3 – Дроссели стержневые двухкатушечные при $m_1=1$ и $\nu_p=0$

x	y	z	K_{Ic}	K_{Io}	K_{qc}	K_{qo}	K_{hk}	K_{sc}	K_{so}	β_s
2,0	0,7	1,5	7,54	7,10	2,0	1,05	1,5	24,44	25,73	0.95
2,2	0,9	1,8	8,54	7,81	2,2	1,62	1,8	27,66	35,40	0.87
2,2	1,0	2,0	9,14	7,97	2,2	2,00	2,0	28,50	40,90	0.80
2,2	1,0	2,2	9,54	7,97	2,2	2,20	2,2	28,50	43,84	0.65
2,1	1,1	2,4	10,14	7,93	2,1	2,64	2,4	28,49	49,08	0.58
2,2	1,3	2,7	11,14	8,44	2,2	3,51	2,7	31,02	60,95	0.51
2,2	1,4	2,9	11,74	8,60	2,2	4,06	2,9	31,86	67,77	0.47
2,6	0,6	3,0	10,34	8,14	2,6	1,80	3,0	28,13	45,55	0.62

Окончание таблицы Б.3

x	y	z	K_A	K_B	K_D	K_{vc}	K_{vo}	K_V	B
2,0	0,7	1,5	3,4	2,7	3,5	15,08	7,45	32,13	1.74
2,2	0,9	1,8	3,8	3,1	3,8	18,79	12,66	44,76	1.60
2,2	1,0	2,0	4,0	3,2	4,0	20,11	15,94	51,20	1.54
2,2	1,0	2,2	4,0	3,2	4,2	20,99	17,53	53,76	1.50
2,1	1,1	2,4	4,2	3,2	4,4	21,29	20,93	59,14	1.45
2,2	1,3	2,7	4,6	3,5	4,7	24,51	29,63	75,67	1.40
2,2	1,4	2,9	5,6	3,6	4,9	25,83	34,91	84,67	1.36
2,6	0,6	3,0	3,2	3,2	5,0	26,82	14,66	51,20	1.48

Таблица Б.4 – Дроссели стержневые двухкатушечные при $m_1=1,3$ и $\nu_p=0$

x	y	z	K_{Ic}	K_{Io}	K_{oc}	K_{oo}	K_{hk}	K_{sc}	K_{so}	β_s
2,3	1,1	1,0	7,34	8,33	2,3	1,10	1,0	30,18	28,77	1.05
2,2	1,3	1,0	7,74	8,44	2,2	1,30	1,0	31,02	32,79	0.95
2,1	1,5	1,2	8,54	8,56	2,1	1,80	1,2	31,77	40,51	0.78
2,0	1,6	1,4	9,14	8,51	2,0	2,24	1,4	31,64	46,11	0.69
2,0	1,7	1,6	9,74	8,67	2,0	2,72	1,6	32,44	52,56	0.62
1,9	1,9	1,9	10,74	8,78	1,9	3,61	1,9	33,03	63,65	0.52
1,8	2,1	2,2	11,74	8,90	1,8	4,62	2,2	33,54	75,54	0.44
2,6	0,6	3,0	10,34	8,14	2,6	1,80	3,0	28,13	45,55	0.62

Окончание таблицы Б.4

x	y	z	K_A	K_B	K_D	K_{vc}	K_{vo}	K_V	B
2,3	1,1	1,0	4,2	3,4	3,0	16,88	9,16	42,84	2.06
2,2	1,3	1,0	4,6	3,5	3,0	17,03	10,97	48,30	1.96
2,1	1,5	1,2	5,0	3,6	3,2	17,93	15,40	57,60	1.79
2,0	1,6	1,4	5,2	3,6	3,4	18,28	19,07	63,65	1.70
2,0	1,7	1,6	5,4	3,7	3,6	19,44	23,58	71,93	1.62
1,9	1,9	1,9	5,8	3,8	3,9	20,41	31,71	85,96	1.52
1,8	2,1	2,2	6,2	3,9	4,2	21,13	41,10	101,56	1.44
2,6	0,6	3,0	3,2	3,2	5,0	26,88	14,66	51,20	1.62

ПРИЛОЖЕНИЕ В

(справочное)

Таблица В.1 – Ряды предпочтительных чисел

Номер предпочтительного числа	Основные ряды предпочтительных чисел			
	R ₅	R ₁₀	R ₂₀	R ₄₀
0	1,00	1,00	1,00	1,00
1			1,06	
2			1,12	1,12
3			1,18	
4		1,25	1,25	1,25
5			1,32	
6			1,40	1,40
7			1,50	
8	1,60	1,60	1,60	1,60
9			1,70	
10			1,80	1,80
11			1,90	
12		2,00	2,00	2,00
13			2,12	
14			2,24	2,24
15			2,36	
16	2,50	2,50	2,50	2,50
17			2,65	
18			2,80	2,80
19			3,00	
20		3,15	3,15	3,15
21			3,35	
22			3,55	3,55
23			3,75	
24	4,00	4,00	4,00	4,00
25			4,25	
26			4,50	4,50
27			4,76	
28		5,00	5,00	5,00
29			5,30	
30			5,60	5,60
31			6,00	
32	6,30	6,30	6,30	6,30
33			6,70	
34			7,10	7,10
35			7,50	
36		8,00	8,00	8,00
37			8,50	
38			9,00	9,00
39			9,50	
40	10,00	10,00	10,00	10,00

ПРИЛОЖЕНИЕ Г
(справочное)

Таблица Г.1 – Диаметры стандартных проводов

Диаметр провода без изоляции, мм	Сечение провода по меди, мм ²	Диаметр провода с изоляцией, мм		K _{кп}	
		ПЭВ-1 ПЭЛ, ПЭЛР-1	ПЭВ-2,ПЭВТЛ -2 ПЭТВ,ПЭТ-155, ПЭЛР-2,ПЭЛУ	ПЭВ-1, ПЭЛ, ПЭЛР-1	ПЭВ-2,ПЭВТЛ -2 ПЭТВ,ПЭТ-155, ПЭЛР-2,ПЭЛУ
0,06	0,00283	0,085	0,09	0,30	0,27
0,07	0,00385	0,095	0,10	0,33	0,30
0,08	0,00503	0,105	0,11	0,36	0,33
0,09	0,0064	0,115	0,12	0,38	0,35
0,10	0,0079	0,125	0,13	0,40	0,37
0,11	0,0095	0,135	0,14	0,42	0,39
0,12	0,0113	0,145	0,15	0,43	0,40
0,13	0,0132	0,155	0,16	0,44	0,40
0,14	0,0154	0,165	0,17	0,45	0,41
0,15	0,0176	0,18	0,19	0,45	0,41
0,16	0,020	0,19	0,20	0,45	0,41
0,17	0,023	0,20	0,21	0,46	0,42
0,18	0,025	0,21	0,22	0,46	0,42
0,19	0,028	0,22	0,23	0,47	0,43
0,20	0,031	0,23	0,24	0,48	0,44
0,21	0,035	0,24	0,25	0,49	0,45
0,23	0,042	0,27	0,28	0,49	0,45
0,25	0,049	0,29	0,30	0,49	0,45
0,27	0,057	0,31	0,32	0,49	0,45
0,29	0,066	0,33	0,34	0,50	0,46
0,31	0,075	0,35	0,36	0,51	0,47
0,33	0,085	0,37	0,38	0,51	0,47
0,35	0,096	0,39	0,41	0,52	0,48
0,38	0,113	0,42	0,44	0,53	0,49
0,41	0,132	0,45	0,47	0,54	0,50
0,44	0,152	0,48	0,50	0,55	0,51
0,47	0,173	0,51	0,53	0,56	0,52
0,49	0,188	0,53	0,55	0,56	0,52
0,51	0,205	0,56	0,58	0,56	0,52
0,53	0,220	0,58	0,60	0,56	0,52
0,55	0,237	0,60	0,62	0,56	0,52
0,57	0,255	0,62	0,64	0,56	0,52
0,59	0,273	0,64	0,66	0,56	0,52

Окончание таблицы Г.1

Диаметр провода без изоляции, мм	Сечение провода по меди, мм ²	Диаметр провода с изоляцией, мм		K _{пк}	
		ПЭЛ, ПЭВ-1, ПЭВТЛ-1	ПЭВ-2, ПЭВТЛ-2, ПЭТВ, ПЭТ-155, ПЭЛР-2, ПЭЛУ	ПЭВ-1, ПЭЛ, ПЭЛР-1	ПЭВ-2, ПЭВТЛ-2, ПЭТВ, ПЭТ-155, ПЭЛР-2, ПЭЛУ
0,62	0,301	0,67	0,69	0,56	0,52
0,64	0,321	0,69	0,72	0,56	0,52
0,67	0,352	0,72	0,75	0,56	0,52
0,69	0,373	0,74	0,77	0,57	0,53
0,72	0,407	0,77	0,80	0,57	0,53
0,74	0,400	0,80	0,83	0,57	0,53
0,77	0,465	0,83	0,86	0,57	0,53
0,80	0,50	0,86	0,89	0,57	0,53
0,83	0,54	0,89	0,92	0,57	0,53
0,86	0,58	0,92	0,95	0,57	0,53
0,90	0,64	0,96	0,99	0,57	0,53
0,93	0,68	0,99	1,02	0,56	0,53
0,96	0,72	1,02	1,05	0,55	0,52
1,00	0,79	1,08	1,11	0,54	0,51
1,04	0,85	1,12	1,15	0,54	0,51
1,08	0,91	1,16	1,19	0,53	0,51
1,12	0,99	1,20	1,23	0,53	0,50
1,16	1,03	1,24	1,27	0,52	0,50
1,20	1,13	1,28	1,31	0,52	0,50
1,25	1,22	1,33	1,36	0,51	0,49
1,30	1,32	1,38	1,41	0,51	0,49
1,35	1,43	1,43	1,46	0,50	0,48
1,40	1,54	1,48	1,51	0,50	0,48
1,45	1,65	1,53	1,56	0,50	0,48
1,50	1,76	1,58	1,61	0,49	0,49
1,56	1,91	1,64	1,67	0,49	0,47
1,62	1,06	1,70	1,73	0,49	0,47
1,68	2,21	1,76	1,79	0,49	0,47
1,74	2,33	1,82	1,85	0,48	0,47
1,81	2,57	1,90	1,93	0,48	0,47
1,88	2,77	1,97	2,00	0,48	0,46
1,95	2,93	2,04	2,07	0,47	0,46
2,02	3,20	2,11	2,14	0,47	0,46
2,10	3,46	2,20	2,23	0,46	0,45
2,26	4,00	2,36	2,39	0,46	0,45
2,44	4,68	2,54	2,57	0,46	0,45

ПРИЛОЖЕНИЕ Д
(справочное)

ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА ПЛАСТМАСС ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КАРКАСОВ, ГИЛЬЗ И ОБОЙМ

Таблица Д.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 трекингостойкость. Тропикостойкость Т	–195...+130 °С. Кл. В	
Фторопласт-3М: А,Б, ТУ 6-05-1812-77	Высокие изоляционные свойства, дуго- и трекингостойкость. 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,		–50...+120 °С.	

ОСТ 6-05-408-85	Окончание таблицы Д.1		Кл. А	
Марка материала, ГОСТ, ТУ	Основные свойства	Интервал рабочих температур. Класс нагревостойкости	Методы переработки	
<u>Композиции</u> полифенилоксида: арилакс 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	
арилакс 101, ТУ 6-05-231-323-83;				
арилакс 2101, ТУ 6-05-231-321-83;				
арилакс 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-, химостойкость.	-100...+150 °С. Кл. F	Литье под давлением, экструзия	
ДВ-105, ДВ-106, ТУ 6-05-211-422-80		-100...+165 °С. Кл. F		

Таблица Д.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 Д.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 Д.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 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.