



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра морских информационных систем

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
БАКАЛАВРА**

На тему: «Исследование, оптимизация и проектирование индуктивных элементов
мощных преобразовательных устройств корабельных ГАС»

Исполнитель: Гриценко Роман Алексеевич

Руководитель: доктор технических наук, профессор

Никитин Константин Константинович

«К защите допускаю»

и.о. заведующего кафедрой: _____

кандидат географических наук, доцент

Фокичева Анна Алексеевна

«17» 08 2017 г.

Санкт-Петербург

2017

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

**«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»**

Факультет Информационных систем и геотехнологий

Кафедра «Морские информационные системы»

К защите допустить

И.О. Зав. кафедрой к.г.н. _____ /А. Фокичева/

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА

**«ИССЛЕДОВАНИЕ, ОПТИМИЗАЦИЯ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ
ИНДУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ МОЩНЫХ
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ КОРАБЕЛЬНЫХ ГАС»**

Направление подготовки – 17.03.01 «Корабельное вооружение»

Профиль - «Морские информационные системы и оборудование»

Исполнитель:

Гриценко Роман Алексеевич

Руководитель:

Д.т.н. профессор

Никитин Константин Константинович

Санкт-Петербург – 2017

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
**РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ (РГГМУ)**
Факультет ИС и ГТ
Кафедра Морские информационные системы
Направление подготовки 17.03.01 Корабельное вооружение
Профиль Морские информационные системы и оборудование

ЗАДАНИЕ

на дипломное проектирование
студента Гриценко Романа Алексеевича

1. Тема дипломного проектирования: Исследование, оптимизация и проектирование индуктивных элементов мощных преобразовательных устройств корабельных гидроакустических систем.
2. Цели исследований:
Проведение исследований, дающих разработчику возможность эффективной разработки электромагнитных компонентов.
3. Перечень подлежащих разработке разделов по теме:
 - Анализ электромагнитных компонентов современного мощного электро-технического тракта и проблем их разработки;
 - Методика расчета дросселей, пример расчета;
 - Исследование потерь в магнитных материалах.
4. Разработка методик оптимизации и расчета дросселей большой мощности при различных исходных данных.
 - Методика расчета дросселей.
 - Методика анализа потерь в магнитных материалах
4. Основные ожидаемые результаты:
 - Анализ электромагнитных компонентов современного мощного электро-технического тракта и проблема их разработки;
 - Методика расчета дросселей;
 - Методика анализа потерь в магнитных материалах.
5. Состав технической документации проекта в соответствии с методическими указаниями.

Задание утверждено на заседании кафедры МИС «__» _____ 2016 года
Дата выдачи задания «__» _____ 2016 года

Зав. кафедрой МИС _____ (_____)

Руководитель _____ (_____)

Студент _____ (_____)

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ КОМПОНЕНТОВ СОВРЕМЕННОГО МОЩНОГО ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО ТРАКТА И ПРОБЛЕМ ИХ РАЗРАБОТКИ.....	6
1.1. Типы материалов, используемые для изготовления магнитопровода дросселя. Индивидуальность дросселей в силовой электронике, основные принципы , закладываемые при разработке и производстве дросселей элек- тромагнитных компонентов.....	6
1.2. Проектирование электромагнитных компонентов для гидроаку- стических целей.....	15
Выводы.....	19
2. ДРОССЕЛЬ	23
2.1. Методика расчета дросселя.....	23
2.2. Пример расчета дросселя	27
Выводы.....	32
3. ИССЛЕДОВАНИЕ ПОТЕРЬ В МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛАХ.....	33
Выводы.....	43
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	45
ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ	51

ВВЕДЕНИЕ

Современная силовая электроника активно использует современные электромагнитные компоненты для выполнения различных задач и достижения различных целей. Отличия электромагнитных компонентов от других линейных элементов электрорадиотехнического тракта состоит в значительной мере в том, что современная промышленность, как правило, не выпускает электромагнитные компоненты в том ассортименте и в том объеме, как она выпускает резисторы и конденсаторы. Что же касается электромагнитных компонентов, то доля индивидуальных проектов в общем объеме их использования в силовой электронике достигает 98%. Таким образом, разработчик вынужден не только уметь использовать готовые электромагнитные компоненты, но в полной мере должен быть готов к тому, что ему придется их разрабатывать, испытывать и производить большими сериями, именно поэтому тема данного диплома является актуальной.

Данная работа является комплексной.

Структура комплексной работы представлена на рисунке 1.

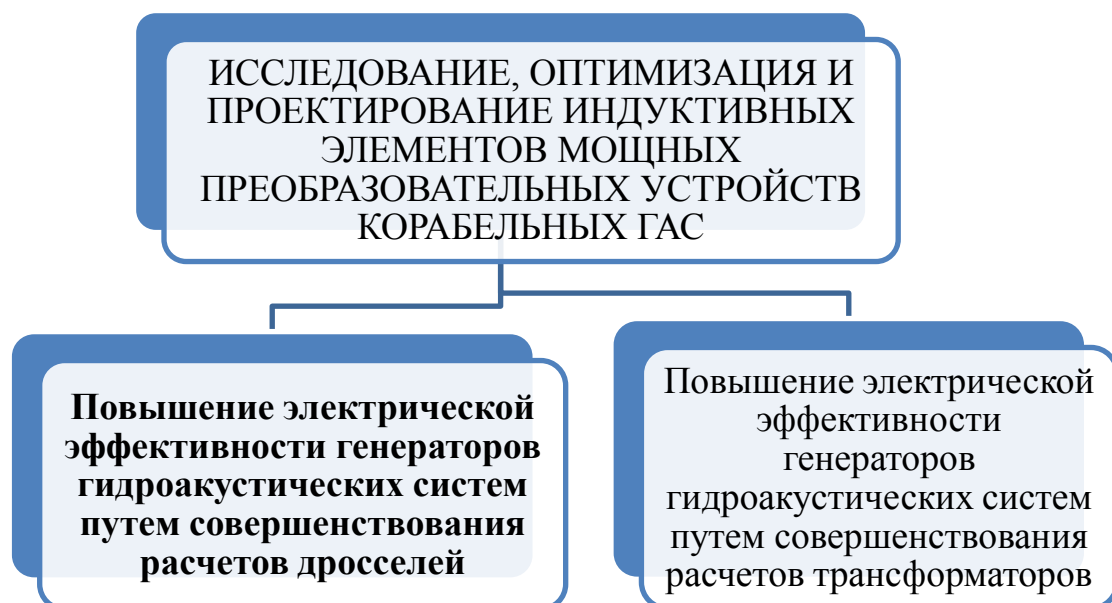


Рис. 1

Выполнено автором

Объектом исследования являются мощные преобразовательные устройства корабельных гидроакустических систем, предметом исследования - индуктивные элементы мощных преобразовательных устройств корабельных гидроакустических систем. Целью данной работы является проведение исследований, которые дадут разработчику возможность эффективной разработки электромагнитных компонентов. Решаемы задачи:

- Разработка эффективного метода расчета дросселя, по критерию максимальной эффективности
- расчет и экспериментальное обследование дросселя;
- представление эффективного метода определения потерь

1. АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ КОМПОНЕНТОВ СОВРЕМЕННОГО МОЩНОГО ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО ТРАКТА И ПРОБЛЕМА ИХ РАЗРАБОТКИ.

1.1. Типы материалов, используемые для изготовления магнитопровода дросселя. Индивидуальность дросселей в силовой электронике.

В соответствии с определением, заданным в ГОСТе, подавляющее большинство дросселей, используемых в силовой электронике, являются дросселями фильтров. Трудно предположить такую ситуацию, когда используемый дроссель напрямую либо косвенно не является частью частотно-избирательной цепи. В подавляющем большинстве случаев дроссели напрямую используются в качестве элементов различных фильтрующих систем, состоящих из дросселей, конденсаторов и резисторов. В остальных случаях эти фильтрующие свойства проявляются косвенно, например, если дроссели установлены в различных демпфирующих цепях, помехозащищающих цепях, в цепях, формирующих траекторию переключения мощных силовых полупроводниковых элементов. Однако в любом случае, эксплуатируется само определение индуктивности, как основного параметра дросселя.

Индуктивность - это такой физический прибор, напряжение на котором пропорционально скорости изменения тока через этот прибор, именно на этом факте основаны все возможности и все реальные случаи использования дросселей. Известно, что любая токопроводящая электрическая система обладает индуктивностью и уже может быть отнесена к разряду дросселей. Однако в подавляющем большинстве случаев, дроссель представляет собой обмотку из большого количества магнитосвязанных друг с другом витков, намотанных на замкнутый магнитопровод. Примером замкнутого магнитопровода может служить тороидальный магнитопровод, чем-то напоминающий бублик. Возможно использование и незамкнутых магнитопроводов, равно как и магнитопроводов совершенно других типов и конфигураций. Однако

их использование происходит не так часто и не так широко, как использование замкнутых магнитопроводов. Преимущество замкнутого магнитопровода заключается в возможности достижения максимальной величины индуктивности дросселя, при создании минимального внешнего магнитного поля.

Замкнутые магнитопроводы производятся из нескольких **типов магнитных материалов**:

Металлические магнитные материалы, как правило, обладают так называемыми ферромагнитными свойствами. Эти магнитные материалы являются хорошими проводниками и имеют структуру, которую физики называют доменной структурой, т.е. внутри магнитопровода существует огромное количество некоторых микроскопических образований, либо входящих в кристаллическую структуру, либо для аморфных материалов, не входящих в кристаллическую структуру и обладающих единичными магнитными свойствами. Под действием магнитного поля происходят физические, а может и химические изменения этой магнитной структуры, в результате чего магнитное поле в магнитопроводе многократно усиливается по сравнению с внешним приложенным магнитным полем и это явление усиления приводит к созданию в магнитопроводе так называемой магнитной индукции (индукция в переводе с иностранного языка так и означает – наведение). Индукция отличается от напряженности магнитного поля на множитель ($\mu_0 \cdot \mu$), μ_0 - это магнитная постоянная в системе СИ, μ как раз и имеет смысл магнитной проницаемости материала, которая и определяет его магнитные свойства и показывает во сколько раз поле, в толще материала, превышает то поле, которое и явилось причиной возникновения индукции. В целом, величина μ является частотно зависимой, зависимой от внешнего поля, однако в ряде случаев, можно считать величину μ в достаточной степени независимой от этих величин и тогда исследования принимают наиболее простую структуру. Индукция - это внутренний параметр дросселя, относящийся к его магнитопроводу. В общем же, создавая дроссель, разработчик стремится к получению совершенно определенной величины индуктивности, определяющий

инертные свойства создаваемого прибора и способность его к потокоцеплению магнитного поля. Чем больше магнитное поле оказывается соединено с протекающим током, тем больше величина индуктивности характеризует данный дроссель.

Таким образом, следующие параметры для расчета являются исходными:

- величина требуемой индуктивности;
- величина и частота протекающего через дроссель тока (в данном случае расчет будет разделен на две составляющие: по постоянному току для расчета электромагнитных потерь и по переменному току);
- задается габарит, то есть такие параметры, как площадь сечения магнитопровода и длина средней магнитной линии. В произведении эти две величины дают объем магнитопровода.

На выходе расчетов должны появиться две величины:

- величина магнитной проницаемости;
- величина количества витков.

Так как рассчитывается два параметра, и возможность их вариаций будет влиять на индуктивность и еще на какой-то параметр, то возможен выбор этого второго параметра в виде индукции. Таким образом, мы получаем информацию о том, что варьируя магнитную проницаемость и число витков при заданной конфигурации и объеме, занимаемым магнитопроводом в соответствии с этим дросселем в целом, мы можем выбирать величину индуктивности, создавая при этом различные индукции магнитного поля в сердечнике. В дальнейшем будет показано, что, чем большую величину магнитной проницаемости при заданном габарите мы используем, тем больше при заданной индуктивности будет величина магнитной индукции. Последний факт свидетельствует о том, что нельзя необдуманно строить дроссели, исходя лишь из величины достигаемой индуктивности. Если мы хотим влиять на индуктивность и индукцию одновременно, то это потребует, как было уже сказано, одновременного изменения, как магнитной проницаемости, так и числа вит-

ков. Существует лишь единственная комбинация магнитной проницаемости и числа витков, приводящих к достижению требуемой индуктивности в условиях заданной индукции. Далее рассмотрим магнитные материалы.

Металлические материалы, как на постоянном токе, так и на переменном, как правило, применяются в виде тонких лент, свитых в определенные конструкции. В качестве металлических материалов могут использоваться холоднокатаные и горячекатаные электротехнические стали, причем ассортимент их достаточно большой и разброс качества так же достаточно большой. Последние десятилетия на рынок выходят аморфные и нанокристаллические материалы. Особенностью этих материалов является то, что металлическая и кристаллическая структуры в них выражены в меньшей мере и эти материалы на долговременной основе сохраняют свои некристаллические свойства. Технология создания этих материалов основана на быстром охлаждении сверхтонких лент из расплава, приводящем к тому, что переход в твердое состояние происходит, минуя кристаллическую стадию. Главным преимуществом аморфных материалов являются чрезвычайно низкие, по сравнению с обычными сталями, потери на повышенных частотах. Так, если мы проектируем электромагнитный элемент, предназначенный для работы в широком диапазоне частот, начинающемся с низкочастотной области (например: от 100 Гц), целесообразность применения аморфных материалов сомнительно. В дросселях же, если широкополосность затрагивает высокочастотные области, применение аморфных материалов может быть оправдано и в этом случае. Если же нижней частотой рабочего диапазона оказывается величина порядка единиц, а то и десяткой КГц, применение аморфных материалов становится единственно возможным способом избежать значительных потерь, связанных с работой магнитопроводов на переменном токе, т.е. в динамическом режиме. Как, например, у современного нанокристаллического материала, производимого Ашинским металлургическим заводом, удельные потери на частоте 15 КГц в несколько десятков раз меньше, чем у лучшей электротехнической стали. Следует отметить, что, в связи с высокой на-

чальной проницаемостью аморфных материалов и сталей, использование их в дросселях фильтров, возможно, как правило, если в сердечнике организуется немагнитный зазор. В этом случае эффективная магнитная проницаемость снижается, расчеты не представляют большой сложности, но и склонность материала к насыщению в значительной степени снижается в связи с падением эффективной магнитной проницаемости.

Ферриты являются следующей большой группой материалов для использования в технике дросселей. Исходно считается, что феррит является более высокочастотным материалом, нежели остальные. Следует отметить, что частотные свойства ферритов действительно высоки, однако это никак не мешает использовать их на более низких частотах в случаях необходимости. Но следует отметить, что предельная магнитная индукция в самых лучших ферритах, редко превышает 0,5 Тл (как правило, 0,2-0,3). Аморфные материалы имеют (0,8-1,2), стали (1,6 – 2,2).. Таким образом, в ряде случаев, свойства стали оказываются предпочтительней. Ферриты так же могут иметь весьма различные проницаемости от единиц до единиц миллионов. Наиболее употребляемые в судовой электронике ферриты с проницаемостью от 1000 до 10000, типичный феррит марки N87, производства фирмы Magnetics имеет проницаемость в районе 2000-2500 единиц. Таким образом, его использование в дросселях фильтров, как правило, становится возможным, так же после введения немагнитного зазора. Надо сказать, что опыт разработки устройств с использованием ферритовых сердечников, показывает, что наиболее совершенные из них, использующие наилучшие, с точки зрения потерь марки ферритов выигрывают по выделяемому, непосредственно в теле магнитопровода, теплу практически у всех магнитопроводов, включая такие энергоэффективные магнитопроводы, как приборы из Карбонильного железа, отечественного и лучшего импортного производства. Однако необходимость использования немагнитного зазора приводит к тому, что электромагнитное излучение из этого зазора может оказаться достаточно большим, что плохо сказывается на общей электромагнитной совместимости создаваемых устройств,

а так же приводит к безвозвратным потерям энергии, улетающей в пространство.

Следующая большая группа магнитопроводов – это *металлические порошковые материалы*, объединяют достаточно большим количеством различных типов веществ, включая так называемый Сендаст (в транскрипции производителя Magnetics - это материал CoolMμ (Кул ммю)), включая молибденовый пермаллой (активно производимы за границей под маркой MPP – порошковый материал, так у нас в стране под маркой МП), так же активно применяются материалы Hflux, Hightlux. Свойства этих материалов различны, однако следует иметь в виду что, как правило, чем большая индукция насыщения оказывается характерной для данного материала, тем большие потери на высоких частотах наблюдается в этом материале. Следует отметить, что в подавляющем большинстве применений в современной силовой электронике, для которой характерны высокие переменные подмагничивающие поля, применение большинства из этих материалов оказывается затруднительным. Так же к этим материалам относятся сердечники из чистого железного порошка, так называемого карбонильного железа. Производство этих сердечников, как в России, так и во всем мире весьма и весьма ограничено, что связано со сложностью технологий, так например, на территории России в очень ограниченном ассортименте этот материал производит один единственный завод. Можно сделать выводы, что подбор металлических порошковых материалов, для использования в современных изделиях силовой электроники, в настоящее время весьма и весьма затруднителен.

Следует отметить, что материалы последнего рассмотренного вида, применяемые для изготовления магнитопроводов, уже по своей сути являются материалами, с так называемым не сосредоточенным или рассредоточенным магнитным зазором. Будучи материалами, в которых ферромагнитные частицы, в отличие от феррита, достаточно отдалены друг от друга за счет того, что порошок металлического типа, из которого они сделаны, спечен в присутствии немагнитного материала. Эти материалы характеризуются за-

метно меньшей величиной проницаемости. Эффект образования меньшей проницаемости чем у исходного магнитного материала достаточно просто объясняется, так называемым, распределенным магнитным зазором, при котором основная масса частиц, из которых состоит магнитопровод, разнесена друг от друга в пространстве. За счет большего либо меньшего разнесения этих частиц в пространстве, т.е. за счет изменения концентрации магнитного материала в общей массе материала сердечника, удается достичь широкого изменения магнитной проницаемости сердечника. Так, практически для всех магнитных материалов, которые предлагает на отечественном рынке фирма Magnetics, присутствует десятикратная градация магнитной проницаемости, от наименьшей до наибольшей, а в ряде случаев и большая градация. Подобные свойства позволяют не только оптимальным образом подбирать магнитные материалы, но и избегать их насыщения в сильных магнитных и электромагнитных полях.

Индивидуальность дросселей в силовой электронике. Электромагнитные элементы реализуют одну из трех главных величин ряда линейных элементов:

резисторов,

электрических конденсаторов, реализующих емкость,

и дросселей фильтров, реализующих индуктивность.

Если говорить о дросселях, следует отметить, что терминология в данной сфере образована двумя основополагающими документами и несколько отличается от других разделов. Например, общероссийские стандарты, регламентирующие приборы и технику энергетической электроники, определяют прибор, обладающий индуктивностью, как «реактор электрический». ГОСТ же, относящийся к радио-электротехнике, определяет этот прибор, как дроссель фильтра, с чем и связана некоторая неразбериха в терминологии. Мы же будем считать, что такие понятия, как индуктивность, как электрический элемент, катушка индуктивности, дроссель, дроссель фильтра, реактор

электрический - есть одна и та же разновидность общей приборной секции, реализующий индуктивность, как физический параметр.

В отличие от резисторов и конденсаторов, которые в огромном ассортименте представлены на рынке электротехнических компонентов и могут быть куплены и использованы в различных изделиях, ассортимент дросселей достаточно скуден, причем это характерно для бывшей территории Советского союза, а в странах Европы, Америки и Японии он практически вообще отсутствует, и разработчик, собираясь реализовать дроссель, либо иной электромагнитный компонент, обычно приобретает магнитный материал в виде магнитопровода, провода обмоток и сопутствующие материалы и изделия. Доля индивидуальных проектов в общем объеме их использования в силовой электронике достигает 98%. Таким образом, разработчик вынужден не только уметь использовать готовые электромагнитные компоненты, но в полной мере должен уметь их разрабатывать, испытывать. Такая особенность дросселей приводит к необходимости их расчета, исходя из ряда предварительных условий и требуемых параметров. Учитывая то, что подобными условиями может явиться круг, который оказывается очень широк, и возможность вариативности параметров значительна, как правило, разработчик пытается обуздать круг параметров, которые необходимо изменять в процессе выбора решения. Для нас, как правило, это обуздание происходит в ходе общего проектирования изделия. Проектировщик изделия, будь то прибор, блок, узел, плата, в состав которого ходят электромагнитные компоненты, уже в ходе первых этапов проектирования, как правило, имеет представление о том, какие габариты, исходя из решаемых задач, должны иметь электромагнитные компоненты. Хороший проектировщик на этой стадии дает очень незначительную ошибку, ошибаясь, как правило, не в разы, а на единицы, либо десятки процентов. В этих условиях, первичный габарит, а, может, и масса, отданные электромагнитному компоненту, определяют весь дальнейший ход его расчета, заранее задавая такие важные параметры, как, прежде всего, сечение применяемого магнитопровода и размеры окон, впоследствии зани-

маемых обмотками. Следует заметить, что в ряде других задач подобного упрощения может и не произойти, и решение будет проводиться по другим правилам, выходящим за рамки предстоящего диплома.

Основные принципы, закладываемые при разработке и производстве дросселей электромагнитных компонентов. Конструктивно, дроссели могут выполняться в самых различных конфигурациях, однако в подавляющем большинстве случаев дроссель представляет собой совокупность обмотки и замкнутого магнитопровода. Расчет дросселя, в особенности на постоянном токе, может оказаться достаточно простой процедурой, но следует обратить внимание на некоторые нюансы. Ясно, что если взять магнитопровод определенных габаритов с характерными габаритными размерами, такими как площадь сечения магнитопровода, как длина средней магнитной линии, то индуктивность, выполненная на этом дросселе, будет характеризоваться самой простейшей величиной и будет пропорциональна магнитной проницаемости, площади сечения магнитопровода, будет пропорциональна квадрату числа витков. Эта пропорциональность квадрату числа витков, весьма характерная для дросселей и для первичных обмоток трансформаторов, определяется тем, что все витки, намотанные на магнитопроводе, считаются абсолютно магнитосвязанными друг с другом. Все витки, в том приближении, которое мы рассматриваем, пронизывает одно и то же поле, существующее внутри магнитопроводов. Понятно, что часть поля замыкается вне магнитопровода, но это небольшая величина, поэтому можно с уверенностью говорить, что квадратичная зависимость характерна для высоких проницаемостей, превышающих несколько десятков. Отклонение от этой зависимости достаточно хорошо заметно на малых проницаемостях в единицы. Общим коэффициентом пропорциональности в системе СИ является абсолютная магнитная проницаемость вакуума $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$. Однако данная формула даже при задании габаритных размеров допускает свободу в выборе магнитной проницаемости μ и числа витков w , чем больше выбрана величина μ , тем меньше требуется количество витков. Вот эта свобода, она выбирается тем,

уничтожается тем, что пропорциональное изменение μ и w приводит к изменению важнейшей характеристики дросселя, такой как индукция магнитного поля внутри магнитного материала. Как в дальнейшем будет показана в данной работе величина магнитной индукции, зависит, прежде всего, от магнитной проницаемости μ , чем больше величина магнитной проницаемости выбрана, тем большей величина индукции при заданной величине индуктивности и заданной величине протекающего тока реализуется. Вот этот факт, оказывается, не столько не известен, сколько часто пренебрежим в проведении расчетов специалистами, разрабатывающими магнитные элементы. В результате, как правило, достигаются слишком большие величины магнитной индукции и электромагнитный элемент не выполняет возложенных на него функций.

Таким образом, расчет дросселя, должен начинаться с выбора магнитной проницаемости материала, обеспечивающего заранее выбранный уровень электромагнитной индукции. Чем меньше будет выбрана величина μ , тем меньшую величину электромагнитной индукции удастся получить, что в ряде случаев приводит к достижению ряда положительных эффектов, таких как уменьшение потерь на перемагничивание сердечников в переменных магнитных полях. Однако тем большую величину витков обмотки w придется применить, что естественно при заданных габаритах магнитопровода, что приводит к увеличению потерь в материале обмотки.

1.2. Проектирование электромагнитных компонентов для гидроакустических целей.

Электромагнитные компоненты известны очень давно и все это время разработчики занимались их расчетом и проектированием. И в различных литературных источниках, как в зарубежных, так и отечественных, среди которых можно отметить монографию Х.Б. Роблена «Трансформаторы для радиоэлектроники», так и Г.С. Цикин «Трансформаторы», а так же В.Г.Велешин «Транзисторные преобразовательные устройства» раздел трансформаторы и раздел дросселя. Представлены элементы возможного

расчета трансформаторов. Однако не один из этих авторов не представил разработчику обоснование тех подходов, которыми он пользуется и, как правило, воспользовался уже известными подходами.

Мы тоже не претендуем на новое слово в разработке трансформаторов, но в первую очередь хотим отметить, что разработка трансформаторов сама по себе она не может быть положена в основу какого-то описательного процесса, алгоритма и т.д. Разработчик для того, чтобы создать систему разработки трансформаторов и дросселей должен обязательно знать, для чего делаются эти индуктивные элементы и какие сопутствующие технические условия оказывают на это влияние. Если говорить о гидроакустике, то для гидроакустических целей в первую очередь для работы в мощных усилительных, генераторных и электропитательных устройствах трансформаторы и дроссели должны обладать тремя основными характеристиками: 1. Это мощность, то есть это мощные трансформаторы, которые имеют мощность от 100 Вт до единицы, а может до двух десятков кВт. 2. Высокая энергетическая эффективность, то есть малая величина потерь (высокий КПД, который превышает 99%) 3. Широкополосность трансформаторов, то есть эти трансформаторы рассчитаны на работу ни на чистоте 50 Гц, ни на чистоте 400 Гц, а в широком диапазоне частот, например, допустим от 700 Гц до 11 КГц. Также дроссели предназначены не для работы на постоянном токе, а в широком диапазоне частот.

Существуют дополнительные особенности, которые характеризуют наши устройства, но они уже не носят столь принципиального характера. Такими особенностями являются требования высокой надежности, прочности, высокой климатической стойкости. Вторая особенность она характеризуется тем, что устройства работающие в приборах с ключевым преобразованием должны благополучно противостоять наличию мощной импульсных помех, которые вызываются наличием факторной частоты, частоты переключения мощных ключевых устройств, мощных ключевых транзисторов этих преобразовательных устройств. То есть помимо составляющих тока основной час-

тоты в этих устройствах может присутствовать достаточно большая составляющая тока с частотой в десятки раз превышающие основную частоту. Третья особенность у нас нет экономических ограничений, то есть наши изделия могут стоять сколько угодно много, если мы обосновываем эту стоимость, то заказчик у нас ее принимает. Другое дело, мы должны обосновывать, почему у нас так дорого. Вот в этих условиях мы и занимаемся проектированием.

Наличие всех этих условий говорит о том, что традиционные безотносительные методы проектирование, например, проектирование трансформаторов на заданную мощность и сопутствующие этому методики нас не устраивают. Для того чтобы создать простую и эффективную методику расчета трансформаторов и дросселей нам нужно придумать более точные и более устойчивые к окружающим факторам характеристики, которые являются отправной точкой для нашего расчета.

Вот такими характеристиками являются в первую очередь габариты создаваемого нами устройства. И второе, на что надо обратить внимание, что мы рассчитываем на проектирование трансформаторов и дросселей квалифицированными, имеющими опыт, сотрудниками. Сотрудники, даже при наличии алгоритма, занимаются не простым перебором факторов в соответствие с данным алгоритмами, а идут по тому пути, который им показывает наша методика и сопутствующий имеющий у него опыт. Поэтому разработчик устройства вместе с разработчиком электромагнитных компонентов на самом первом этапе выбирают реальные габариты трансформаторов и дросселей, которые встанут в это устройство и будут выполнять необходимые функции. Заметим, что в современности трансформаторы и дроссели занимают до 30% габаритов и до 50% массы всего устройства. От правильности этого выбора зависит, что, чем правильнее выбран исходный габарит, тем более коротким является путь к успеху.

В дальнейшем в наших исследованиях будет показано, что выбранный габарит трансформатора и выбранный габарит дросселя при прочих задан-

ных параметров однозначно определяют энергетические характеристики этих приборов и в первую очередь КПД для трансформаторов и мощность потерь для дросселя. Так, например, при проектировании трансформатора помимо габарит заданными являются: а) мощность трансформатора; б) частотный диапазон; в) ожидаемая индукция в магнитопроводе и сам тип магнитопровода. Помимо этого рассчитываются такие характеристики, как индуктивность хода и индуктивность рассеивания, но они уже не входят в наш энергетический расчет, то есть никак на него не влияют.

Если речь идет о дросселе, то вопросами выбора является помимо всего прочего еще и магнитная проницаемость магнитного материала, в трансформаторе это магнитная проницаемость может варьировать в широких пределах. После того, как эти параметры установлены, идет расчет согласно нашим разработкам и далее изложенным методикам. В результате чего, для дросселя рассчитывается число витков и магнитная проницаемость, а так же параметры магнитопровода, такие как тип магнитопровода, характер магнитного материала, средняя длина магнитной линии и площадь сечения магнитопровода. Так же рассчитывается индуктивность и на основе этого рассчитывается, при выборном характере обработки, мощность потерь в дросселе.

Для трансформатора практически происходит тоже самое, но магнитная проницаемость принимается во внимание только в расчете индуктивности холостого хода, в котором было сказано при энергетическом расчете она во внимание не принимается. И на выходе расчета трансформатора оказывается КПД трансформатора. Обращаю внимание, что КПД трансформатора является более универсальной величиной, нежели мощность потерей в трансформаторе или тем более мощность передаваемая трансформатором. Дело в том, что большинство изделий гидроакустической техники работает в импульсном режиме не с импульсным преобразованием, именно в импульсном режиме, то есть посылки сигнала идут импульсами, допустим 1 с импульс 15 с отдых. Вот в этих условиях мощность потерь в трансформаторе

не является решающей, даже если она достаточно велика, трансформатор не успевает нагреться за эту 1 с, а за 15 секунд отдыха успевает остыть.

Однако, если КПД трансформатора не достаточен, то он уменьшает, даже в условии этого кратковременной работы, КПД всего устройства, а вот с этим мы уже никак не можем смириться. Потому что если КПД усилителя 92 %, то дополнительно потерять в дросселе и трансформаторе можем примерно максимум по проценту, и КПД суммарного устройства опуститься до 90 %. Если же КПД трансформатора тоже 92 %, то итоговый КПД упадет до 82-83% с этим никак нельзя смириться. То есть КПД трансформатора должен быть примерно на несколько процентов больше чем КПД всего устройства в целом без трансформатора. И только тогда использование трансформатора является энергетически выгодным. Вот поэтому при расчете трансформатора самым главным параметром, который мы рассчитываем, и к которому мы стремимся, является КПД, а не передаваемая мощность. Вот такой подход упрощает существенно расчет трансформатора, так как перегрев трансформатора при малых выделяемых мощностях можно не считать и можно не решать сложных термодинамических задач, которые этому сопутствуют.

Расчеты, которые проведены в нашей дипломной работе они не противоречат, тому что сказано в книгах авторов классиков и могут считаться лишь небольшим развитием их идей.

Выводы.

Выполнен анализ типов материалов:

- *Металлические магнитные материалы.* Как правило, применяются в виде тонких лент, свитых в определенные конструкции. Способны при наименьших затратах энергии достигнуть наибольшей индукции. Обладают ферромагнитными свойствами. Эти магнитные материалы являются хорошими проводниками и имеют доменную структуру.

- *Ферриты.* Имеет высокие частотные свойства. Но предельная магнитная индукция в самых лучших ферритах редко превышает 0,5 Тл (как правило, 0,2-0,3). Аморфные материалы имеют (0,8-1,2), стали (1,6 – 2,2).. Таким

образом, в ряде случаев, свойства стали оказываются предпочтительней. Ферриты так же могут иметь весьма различные проницаемости от единиц до единиц миллионов. Таким образом, его использование в дросселях фильтров, становится возможным, так же после введения немагнитного зазора. Наиболее совершенные, с точки зрения потерь, марки ферритов выигрывают по выделяемому теплу практически у всех магнитопроводов, даже у энергоэффективных магнитопроводов из карбонильного железа. Однако необходимость использования немагнитного зазора приводит к тому, что электромагнитное излучение из этого зазора может оказаться достаточно большим, что плохо сказывается на общей электромагнитной совместимости создаваемых устройств, а так же приводит к безвозвратным потерям энергии, улетающей в пространство.

-металлические порошковые материалы включают в себя большое количество различных типов веществ: Сендаст, молибденовый пермаллой, активно применяются материалы Nflux, Hightflux. Свойства этих материалов различны, однако следует иметь в виду что, как правило, чем большая индукция насыщения оказывается характерной для данного материала, тем большие потери на высоких частотах наблюдается в этом материале. Следует отметить, что в подавляющем большинстве применений в современной силовой электронике, для которой характерны высокие переменные подмагничивающие поля, применение большинства из этих материалов оказывается затруднительным. Так же к этим материалам относятся сердечники из чистого железного порошка, так называемого карбонильного железа. Производство этих сердечников, как в России, так и во всем мире весьма и весьма ограничено, что связано со сложностью технологий. Можно сделать выводы, что подбор металлических порошковых материалов, для использования в современных изделиях силовой электроники, в настоящее время весьма и весьма затруднителен. Данный материал имеет не сосредоточенный (или рассредоточенный) магнитный зазор. Будучи материалом, в которых ферромагнитные частицы, в отличие от феррита, достаточно отдалены друг от друга за счет

того, что порошок металлического типа, из которого они сделаны, спечен в присутствии немагнитного материала. Эти материалы характеризуются заметно меньшей величиной проницаемости, благодаря чему можно избежать их насыщения в сильных магнитных и электромагнитных полях.

Представлена индивидуальность каждого разрабатываемого дросселя - в отличие от резисторов и конденсаторов, которые в огромном ассортименте представлены на рынке электротехнических компонентов и могут быть куплены и использованы в различных изделиях, ассортимент дросселей достаточно скуден, причем это характерно для бывшей территории Советского союза, а в странах Европы, Америки и Японии он практически вообще отсутствует, и разработчик, собираясь реализовать дроссель, либо иной электромагнитный компонент, обычно приобретает магнитный материал в виде магнитопровода, провода обмоток и сопутствующие материалы и изделия. Доля индивидуальных проектов в общем объеме их использования в силовой электронике достигает 98%. Разработчик вынужден не только уметь использовать готовые электромагнитные компоненты, но в полной мере должен уметь их разрабатывать, испытывать.

Принципы, закладываемые при разработке и производстве дросселей электромагнитных компонентов. При задании габаритных размеров допускается свобода в выборе магнитной проницаемости μ и числа витков w , чем больше выбрана величина μ , тем меньше требуется количество витков. Пропорциональное изменение μ и w приводит к изменению важнейшей характеристики дросселя, такой как индукция магнитного поля внутри магнитного материала. Величина магнитной индукции, зависит, от магнитной проницаемости μ - чем больше величина магнитной проницаемости выбрана, тем большей величина индукции, при заданной величине индуктивности и заданной величине протекающего тока, реализуется. Вот этот факт, оказывается, не столько не известен, сколько часто пренебрежим в проведении расчетов специалистами, разрабатывающими магнитные элементы. В результате, как

правило, достигаются слишком большие величины магнитной индукции и электромагнитный элемент не выполняет возложенных на него функций.

Таким образом, расчет дросселя, должен начинаться с выбора магнитной проницаемости материала, обеспечивающего заранее выбранный уровень электромагнитной индукции. Чем меньше будет выбрана величина μ , тем меньшую величину электромагнитной индукции удастся получить, что в ряде случаев приводит к достижению ряда положительных эффектов, таких как уменьшение потерь на перемагничивание сердечников в переменных магнитных полях. Однако тем большую величину витков обмотки w придется применить, что естественно при заданных габаритах магнитопровода, что приводит к увеличению потерь в материале обмотки.

Разработчик для того, чтобы создать систему разработки трансформаторов и дросселей должен обязательно знать, для чего делаются эти индуктивные элементы и какие сопутствующие технические условия оказывают на это влияние. Для гидроакустических целей, в первую очередь для работы в мощных усилительных, генераторных и электропитательных устройствах, трансформаторы и дросселя должны обладать тремя основными характеристиками: 1. мощность, 2. Высокая энергетическая эффективность, то есть малая величина потерь (высокий КПД, который превышает 99%) 3. Широкополосность трансформаторов(работа на частоте, например, 700 Гц - 11 КГц.)

2. ДРОССЕЛЬ.

2.1. Методика расчета дросселя.

Под термином дроссель будем понимать наиболее часто встречающуюся конструкцию дросселя - катушку (обмотку) на замкнутом сердечнике из магнитного материала (рис.1), реализующую электрическую величину индуктивности. Сначала рассмотрим работу дросселя на постоянном токе, учитывая, что все изложенное легко применимо и для других форм тока.

Индуктивность такого дросселя известна:

$$L = \frac{\mu\mu_0 S_c w^2}{l_c} \quad (2.1)$$

здесь L - индуктивность в Гн; μ_0 , равное $4\pi \cdot 10^{-7}$, - магнитная постоянная; μ - величина относительной магнитной проницаемости материала магнитопровода (сердечника); S_c - площадь поперечного сечения магнитопровода (МП); w - число витков обмотки (катушки) дросселя; l_c - средняя длина магнитной линии МП. Следует иметь в виду, что зависимость (2.1) носит приближенный характер, неточности могут возникать из-за необъективной оценки S_c и l_c в случае использования МП произвольной конфигурации. Также зависимость L от квадрата w оказывается справедливой только при идеальной магнитной связи витков обмотки, что характерно для дросселей, выполненных на материале с высокой магнитной проницаемостью (μ - велико).

Разрабатывая дроссель, следует иметь в виду, что знание зависимости (2.1) и, соответственно, умение получить нужную величину индуктивности недостаточно.

Ток, протекающий через дроссель, вызывает в его МП магнитное поле, способное насытить материал МП. Следовательно, помимо (2.1), необходимо пользоваться еще и зависимостью для индукции магнитного поля:

$$B = \frac{LI}{wS_c} \quad (2.2)$$

Суть предлагаемой методики расчёта дросселей заключается в следующем:

Этап 1. Исходными данными для расчёта являются индуктивность дросселя L , величина рекомендованной индукции B , величина протекающего тока I .

Этап 2. Данными выбора являются габаритные параметры дросселя l_c и S_c , то есть, соответственно и объем V_c , а также величина относительной магнитной проницаемости μ . Выбор происходит на основании опыта разработчика и является в значительной степени произвольным.

Этап 3. Используя (2.1 и 2.2) разработчик имеет возможность оценить отношение объёма МП к относительной магнитной проницаемости:

$$\frac{V_c}{\mu} = \mu_0 \frac{LI^2}{B^2} \quad (2.3)$$

Выбрав l_c и S_c , разработчик, используя (2.4) получает возможность нахождения μ .

$$\mu = \frac{B^2 V_c}{\mu_0 LI^2} \quad (2.4)$$

И, используя (2.2), находится зависимость для w :

$$w = \frac{LI}{S_c B} \quad (2.5)$$

Анализ (2.5) показывает, что при заданном значении μ нет прямой зависимости w от L, i, B , так как габарит V_c распадается на произведение $V_c = S_c l_c$.

Таким образом, все параметры дросселя оказываются рассчитанными.

Для понимания сути важным оказывается следующее:

1) Исходя из (2.3) следует то, что чем большая величина индукции B допустима, тем меньший объём магнитопровода V_c может быть использован, а также чем больший объём МП V_c выбран, тем большую величину μ может использовать разработчик.

2) Если рост V_c достигнут увеличением S_c , то, согласно (2.1), индуктивность L будет расти пропорционально μS_c , то есть, пропорционально S_c^2 . Иными словами, во сколько раз больше величина S_c применена, во столько раз можно уменьшить число витков w . Как правило, это позволяет снизить сопротивление провода обмотки и, тем самым, снизить потери в дросселе, увеличив его добротность (если угодно, КПД).

Коэффициент увеличения длины витка зависит от формы МП: для круглого МП увеличение S_c в N раз увеличивает длину витка в \sqrt{N} раз. Для прямоугольного в сечении МП с большим отношением длины сечения к ширине, как в конструкциях типа "бинокль", увеличение длины сечения в N раз пропорционально увеличивает S_c , но также с коэффициентом, близким к N , увеличивает длину витка.

3) Рассчитанные величины μ и w должны быть соотнесены с представлением разработчика об ожидаемых значениях. Если значения этих парамет-

ров не укладываются в отведённые разработчиком рамки, следует провести расчёт повторно, задавшись откорректированными значениями l_c и S .

4) Глубокое понимание того факта, что попытка использования в дросселях материалов МП с большей величиной проницаемости μ неминуемо влечёт за собой требование наращивания габаритов дросселя не в полной мере имеется у большинства разработчиков.

Если дроссель выполнен на замкнутом магнитопроводе, то напряженность магнитного поля, создаваемого обмоткой, известна. Следуя [1], запишем соотношение:

$$H = \frac{iw}{l_c} \quad (2.6)$$

здесь H – напряженность, i – ток, создающий поле, w – число витков, l – средняя длина магнитной линии.

Внутри магнитопровода индукция будет равна:

$$B = \mu\mu_0 H = \mu\mu_0 \frac{iw}{l_c} \quad (2.7)$$

здесь μ – магнитная проницаемость материала, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ – магнитная постоянная.

Эта индукция создаст поток:

$$\Phi = S \cdot w \cdot B = \mu\mu_0 S_c \frac{iw^2}{l_c} \quad (2.8)$$

Здесь S_c – площадь поперечного сечения магнитопровода.

Производная потока по току есть индуктивность:

$$L = \frac{d\Phi}{di} = \mu\mu_0 \frac{S_c w^2}{l_c} \quad (2.9)$$

Таким образом, как следует из (2.6) – (2.9), индукция и индуктивность порождаются одними и теми же физическими процессами и оказываются тесно связанными друг с другом.

2.2 Дроссель. Пример расчёта

Пусть требуется рассчитать дроссель индуктивностью 100 мкГн на ток 50 А, частоту 50 кГц, максимальную индукцию 0,2 Тл.

Выполним оценку необходимого объема сердечника, учтём $K_A = \sqrt{2}$.

$$\frac{V_c}{\mu} = \mu_0 \frac{LI^2}{B^2} = \frac{12,57 \cdot 10^{-7} \cdot 100 \cdot 10^{-6} \cdot (50\sqrt{2})^2}{0,2^2} = 15,7 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$$

Для работы на такой частоте выберем феррит фирмы Magnetics марки R с начальной магнитной проницаемостью около 2300.

В начальном приближении выберем $\mu = 26$, отсюда

$$V_c = 15,7 \cdot 10^{-6} \cdot 26 = 4,08 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3 = 408 \text{ см}^3.$$

Исходя из полученного объема, выберем МП, состоящий из 4-х сердечников E70/33/32 (47133ЕС). Характеристики одного сердечника E70/33/32:

$$l_c = 149\text{мм}; S_c = 683\text{мм}^2; V_c = 102\text{см}^3; m = 495\text{г}$$

По формуле:

$$A_L = \mu\mu_0 S_c / l_c \quad (2.2.1)$$

определим необходимую индуктивность единичного витка:

$$A_L = 26 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 683 \cdot 10^{-6} / 0,149 = 149,8 \text{ нГн}$$

Сердечники E70/33/32 имеют вариант с зазором с индуктивностью единичного витка $A_L = 150\text{нГн}$, вариант 47133ЕС150, который является приемлемым.

Используя формулу:

$$L = A_L \cdot w^2 \quad (2.2.2)$$

и учитывая, что мы применили четыре сердечника, (т. е. $A_{L\text{эфф}} = 4 \cdot A_L$) определим необходимое количество витков:

$$w = \left(\frac{L}{A_{L\text{эфф}}} \right)^{\frac{1}{2}} = \left(\frac{100 \cdot 10^{-6}}{4 \cdot 0,15 \cdot 10^{-6}} \right)^{\frac{1}{2}} = 12,9$$

Зададим число витков $w = 13$ и вычислим получившиеся значения L и B :

Используя (2.2.2), находим $L = 4 \cdot 0,15 \cdot 10^{-6} \cdot 13^2 = 101,4 \text{ мкГн}$.

Используя (2.2), находим $B = \frac{101,4 \cdot 10^{-6} \cdot \sqrt{2} \cdot 50}{13 \cdot 4 \cdot 683 \cdot 10^{-6}} = 0,202 \text{ Тл}$

Определим удельные потери в сердечнике, взяв характеристики из таблицы, по формуле:

$$P_L = af^c B^d \quad (2.2.3)$$

где P_L в мВт/см³; f в кГц; B в кГс (1 кГс = 0,1 Тл).

Для частот $f < 100$ кГц $a = 0,074$; $c = 1,43$; $d = 2,85$

$$P_L = 0,074 \cdot 50^{1,43} \cdot 2,02^{2,85} = 147,6 \text{ мВт/см}^3.$$

Мощность потерь в магнитопроводе $P_c = V_c \cdot P_L = 4 \cdot 102 \cdot 0,148 = 60,4$ Вт.

Получение требуемой величины μ может достигаться разными способами с учетом фактического наличия магнитных материалов заданной конфигурации.

В случае использования материалов с высокой магнитной проницаемостью $\mu_{нач} \gg (10 \div 20)\mu$ требуемое $\mu_{эфф}$ достигается введением одного или нескольких немагнитных зазоров суммарной величиной g , в этом случае $\mu_{эфф} \approx l_c/g$, поскольку в зависимости $\frac{1}{\mu_{эфф}} = \frac{1}{\mu_{нач}} + \frac{g}{l_c}$ первым слагаемым можно пренебречь. Приемлемая величина единичного зазора не превышает 30% от минимального размера в сечении магнитопровода, что даёт возможность получать $\mu_{эфф}$ до 26..30.

Использование современных ферритов с зазором, как правило, даёт приемлемые результаты по тепловыделению в МП, причём, применение более высокочастотных ферритов с $\mu_{нач} = 200 \div 500$ даёт лучшие результаты.

Применение порошковых материалов по типу карбонильного железа или молибденовых пермаллоев малой проницаемости при работе на переменном токе повышенной частоты даёт худшие результаты по тепловыделению, однако существенно снижает излучение из сосредоточенного зазора (в связи с отсутствием последнего).

Получив зависимость для μ и w , можно наметить план намотки. Например, считая, что под обмотку выделено 55 мм по длинной стороне, интересным может оказаться вариант намотки диаметром 5 мм ЛЭНК $57 \times 0,5 \emptyset 5,12 S_r = 11,2$ м (эффективная площадь меди $8,2 \text{ мм}^2$. При средней длине витке 15 см длина провода составит 6,6 м, а сопротивление около 0,012 Ом, что приведёт к потерям на токе 50 А около 30 Вт.

Эта величина может считаться приемлемой либо при наличии обдува, либо при работе со скважностью 3...4.

Следующим этапом следует рассчитать потери в МП. Определяя $P_0 = 1 \frac{\text{Вт}}{\text{кг}}$, $\rho = 55 \frac{\text{кг}}{\text{дм}^3}$ ($f = 10 \text{кГц}$, $B = 0,1 \text{Тл}$; $\alpha = 1,5$; $\beta = 2,0$); имеем $P \simeq 45 \text{Вт}$.

Соизмеримость потерь в МП и обмотках дополнительно свидетельствует в пользу обоснованности основных допущений и предположений.

На этом расчёт дросселя можно считать завершённым.

Вот такой алгоритм расчета дросселя можно предложить на основе наших результатов рис.2 :

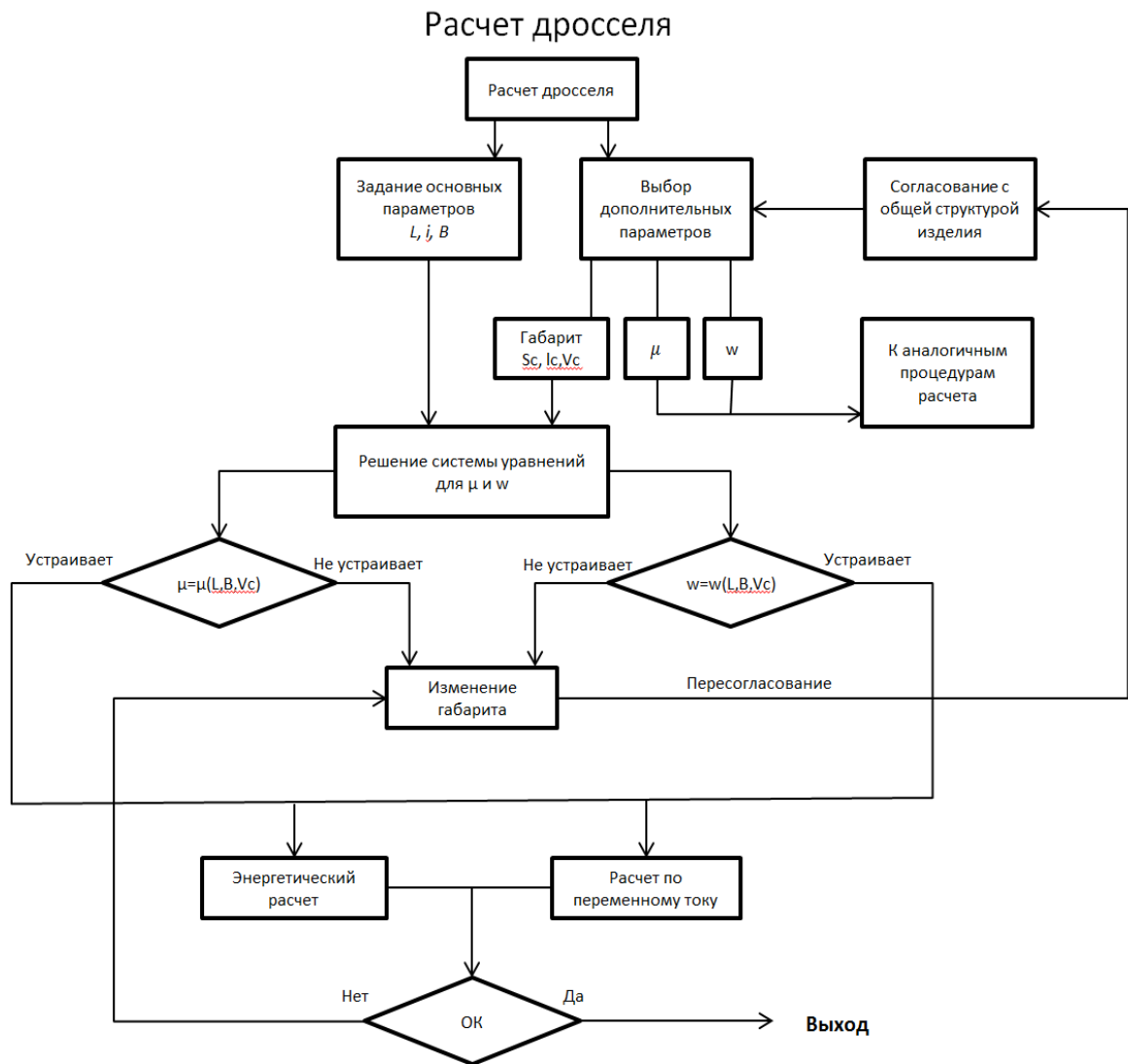


Рис. 2

Выполнено автором

Выводы.

Методика расчёта дросселей включает:

1. Получение исходных данных: индуктивность дросселя L , , величина рекомендованной индукции B , величина протекающего тока I .
2. Осуществляется выбор разработчиком нужного нам объема V_c дросселя и величину магнитной проницаемости μ , исходя из опыта разработки дросселей и области его применения.
3. Расчет количества витков w .

Особенности расчетов:

- 1) Чем большая величина индукции B допустима, тем меньший объём магнитопровода V_c может быть использован, а также чем больший объём МП V_c выбран, тем большую величину μ может использовать разработчик.
- 2) Во сколько раз больше величина S_c применена, во столько раз можно уменьшить число витков w . Как правило, это позволяет снизить сопротивление провода обмотки и, тем самым, снизить потери в дросселе, увеличив его добротность (если угодно, КПД).
- 3) Рассчитанные величины μ и w должны быть соотнесены с представлением разработчика об ожидаемых значениях. Если значения этих параметров не укладываются в отведённые разработчиком рамки, следует провести расчёт повторно, задавшись откорректированными значениями l_c и S_c .
- 4) При использовании в дросселях материалов МП с большей величиной проницаемости μ неминуемо влечёт за собой требование наращивания габаритов дросселя.

3. ИССЛЕДОВАНИЕ ПОТЕРЬ В МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛАХ.

Исследование потерь в магнитных материалах в переменных полях, позволит констатировать следующие факты. Общей зависимостью удельных потерь в магнитном материале является простейшая зависимость приведенная ниже. Мощность удельных потерь $P_{\text{п}} = P_0 f^\alpha B^\beta$, при этом $1 < \alpha < \beta < 3$. Таким образом, видно, что потери в магнитном материале будут достаточно резко возрастать с ростом как частоты, так и магнитной индукции, будут возрастать по-разному для различных материалов, и если в качестве дросселя выступает первичная обмотка трансформатора, подключенная к генератору напряжения, то с ростом частоты, при заданном числе витков, потери в магнитопроводе будут лишь уменьшаться. Исследование удельных потерь в различных магнитных материалах, с использованием ключевых методов импульсного преобразования, может проводиться по существенно упрощенным методикам. Так, например, традиционные методы исследования потерь базируются на создании экспериментальной установки, обеспечивающей определенную величину частоты и индукции в магнитном материале с неэлектрическим, например, калориметрическим методом определения мощности, выделяемой в магнитном материале. Любые калориметрические методы измерения, связанные с необходимостью ожидания установившегося режима выделения тепла, являются достаточно сложными для реализации и требуют затрат большого количества времени на их проведение. В связи с этим, предложен и исследован метод оценки потерь в магнитопроводе, основанный на том, что, в отсутствие потерь в предлагаемой установке, отсутствует и потребление от первичной сети. Это связано с тем, что сама по себе установка включает в себя усилители, либо генераторы, имеющие коэффициент полезного действия близкий к 100%, следовательно, если отсутствует место, где выделяется тепло, то отсутствует и потребление энергии и наоборот, если та-

кое место появляется, то выделенная в магнитопроводе энергия в точности равна той энергии, которая будет при этом потреблена из первичной сети. На этой основе, проведено исследование достаточно большого количества магнитных материалов и будут сделаны определенные выводы.

Эффективная методика определения потерь в магнитных материалах. Предлагается следующий, не основывающийся на калориметрических методах исследования, способ определения этих потерь. Установка для определения потерь в этом случае будет состоять из генератора синусоидального, либо прямоугольного напряжения, задающего ток в обмотке исследуемого магнитного компонента, причем этот генератор должен обладать практически стопроцентным коэффициентом полезного действия. Генератор подключен к первичному источнику питания через измеритель мощности, в этом случае измеритель мощности с высокой точностью покажет ту величину потерь, которая происходит в тракте после генератора. Если генератор работает в режиме холостого хода, либо нагружен на чисто реактивную нагрузку, например, индуктивность, либо емкость, величина потерь составит величину, близкую к нулю. Если же появляется активная составляющая мощности на выходе генератора, например, определяемая потерями в магнитном материале, то показания измерителя мощности на входе в точности совпадут с мощностью на выходе, т.е. с мощностью потерь в магнитном материале. Следует отметить, что и в этом случае и в случае калориметрического определения потерь требуется внесение некоторых корректировок, учитывающих потери не в магнитном материале, а в обмотках исследуемого компонента. Однако этими потерями можно будет либо пренебречь, либо несложным образом учесть их при дальнейших расчетах. Генератор, который используется в данном случае, может представлять собой либо генератор прямоугольного напряжения, либо генератор напряжения ступенчатой формы, т.е. квазисинусоидального напряжения, либо генератор чистого синусоидального напряжения, сделанный по принципу широтно-импульсной модуляции. Эксперименты показывают, что данный метод обладает всей точностью калориметриче-

ского метода и в десятки, а то и сотни раз позволяет повысить скорость проведения измерений. С помощью данного метода была продемонстрирована принципиальная возможность исследования потерь в различных материалах, например в ферритах, в аморфных, нанокристаллических материалах, а также в различных порошковых материалах. Некоторые данные в экспериментах представлены на графиках данного раздела. Показано, что для дросселей фильтров наименьшими потерями обладают компоненты, использующие в своем составе отечественные образцы карбонильного железа с проницаемостью около десяти, низкопроницаемые материалы из импортного молибденового пермаллоя, например МРР20, МРР14, а также ферритовые образцы из современных высокочастотных высокопроницаемых ферритов с зазором. При этом, чем больше компонентов, обеспечивающих зазор на магнитопровод замкнутого типа мы применяем и чем меньше при этом величина единичного зазора реализуется, тем меньшая величина потерь регистрируется. Следует отметить, что для компонентов с нераспределенным зазором калориметрический метод и метод, описываемый только что, дает совершенно разные результаты, потому что калориметрический метод регистрирует только потери, непосредственно приводящие к выделению тепла в калориметрической части прибора, а описываемый метод регистрирует потери общего вида, в том числе и те потери, которые определяются безвозвратно покинувшей прибор энергией в виде электромагнитного излучения. Показано, что, в случае использования ферритов с зазором, потери на излучения могут составлять преобладающую долю общих потерь, при этом образец греется не сильно, остается достаточно холодным, а электромагнитная энергия, улетающая в первую очередь из области зазора, способна либо вообще удалиться в пространство, либо выделиться в ближайших расположенных металлических, либо ферромагнитных элементах конструкции, например, в стенках прибора. Данный метод, повсеместно внедренный в практику в концерне «Океанприбор», позволяет весьма оперативно оценивать характер потерь в различных материалах магнитопроводов, что особенно полезно в современ-

ных условиях, когда производитель не сообщает пользователю данных, достоверных сведениях об этих потерях. Так, например, если производители ферритов и порошковых материалов с распределенным зазором, как правило, предоставляют данные, как о стандартных удельных потерях в некотором стандартизированном режиме, так и о коэффициентах α и β , то производители современных аморфных и нанокристаллических материалов, такие как «Гаммамет» и «Ашинский металлургический завод» дают лишь ориентировочные величины потерь и не заботятся о предоставлении потребителю точных данных об упомянутых коэффициентах, в этих условиях оперативное определение параметров магнитопровода становится особенно ценным.

Методика исследования динамических потерь в магнитопроводах дросселей и трансформаторов. Потери в магнитных материалах, используемых в современных дросселях и трансформаторах, составляют заметную долю энергетических потерь, сопутствующих рабочему режиму этих электромагнитных компонентов. И в дросселях, и в трансформаторах потери в магнитном материале являются неотъемлемой частью функционирования компонента и попытка снижения этих потерь, как правило, влечет за собой увеличение потерь в обмотках дросселей, либо трансформаторов. Поэтому мы имеем оптимизационную задачу, и оптимум может заключаться в том, что требуется либо оптимальным, по какому-то критерию, образом распределить потери между магнитопроводом и обмотками, либо стремиться к минимизации общих потерь в приборе. Напомним, что потери в дросселе, сосредоточенные в магнитном материале, характеризуют исключительно режим работы дросселя с переменной составляющей протекающего тока. Чем меньше переменная составляющая тока, чем меньше индукция, определяемая этой переменной составляющей, тем меньше доля потерь, рассматриваемого вида. Таким образом, потери в дросселе характеризует основной рабочий режим дросселя. Потери в трансформаторе носят несколько иную природу. Переменная составляющая поля в трансформаторе, как правило, вызывается исключительно током холостого хода трансформатора. Этот ток не относится к

рабочим токам и присутствует, как в рабочем режиме, так и в режиме холостого хода. Следовательно, потери в магнитопроводе трансформатора, как правило, определяются режимом холостого хода, и сопутствуют любым режимам работы трансформатора. В устройствах с импульсным преобразованием, нередко и в дросселях и в трансформаторах, присутствуют процессы на обеих частотах, как на рабочей частоте, соответствующей протеканию рабочего тока, так и на частоте импульсного преобразования. Поэтому для учета потерь следует анализировать оба процесса и иметь представление о том, какой из процессов имеет определяющее влияние на величину энергетических потерь на переменном токе. Основной целью настоящего раздела является представление предельно простого и эффективного метода исследования магнитных материалов на предмет определения величины потерь на переменном токе.

Как правило, традиционные методы исследования потерь в магнитных материалах базируются на так называемых *калориметрических*, т.е. тепловых *методах* определения величины потерь. При этом на магнитном материале выполняется обмотка, которая определяет ток, а с ним и величину магнитной индукции в магнитопроводе. Данные процедуры и исследования характерны для любых приборов дросселей или трансформаторов и практически не имеют разницы. Установка(рис.3), которая состоит из генератора синусоидального напряжения, определяющего ток и, соответственно, индукцию в магнитном материале, способно управлять как величиной, так и частотой подаваемого синусоидального воздействия.

Структурно-функциональная схема
калориметрического метода
определения мощности



Рис. 3

Выполнено автором

Напомним, что величина потерь в магнитопроводе определяется следующей формулой: $P_{\Pi} = P_0 f^{\alpha} B^{\beta}$, при этом $1 < \alpha < \beta < 3$. В ходе калориметрических опытов следует определить, задавшись частотой и индукцией, как эталонами, прежде всего величину P_0 . Например, при частоте 1 кГц и индукции 1 Тл, потери в материале могут составить 1500 Вт на кг массы, либо соответствующее количество Вт на кубический сантиметр, кубический метр и т.д. Далее, изменяя частоту и изменяя индукцию, следует определить частотную зависимость и индукционную зависимость потерь, ну а также частотно-

индукционную зависимость и построить трехмерные графики зависимости потерь от величины частоты и индукции. В основе метода лежит точное определение частотно-индукционной зависимости потерь, и эти потери определяются посредством измерения количества теплоты, выделенной в образце, за единицу времени.

Калориметрический метод основан на сравнении установившихся режимов и регламентируются следующим образом: происходит экспертная оценка потерь, характерных для определенного режима, для которого известна установившаяся температура колориметра, а калориметр представляет собой термоизолированное пространство с возможностью измерения температуры. Установление тепловых процессов происходит длительное время, возможно несколько часов, после чего происходит отключение образца и подключение нормирующего тепловыделительного элемента, на который подается электрическая мощность, равная экспертной оценке. Если экспертная оценка верна, то установившаяся температура оказывается равной той, которую дали потери в магнитопроводе. Если она не верна, то требуется следующая итерация, возможно не одна, две или несколько, путем которых в термовыделяющий элемент, в конце концов, подается мощность, равная мощности потерь и установившиеся режимы совпадают по тепловыделению. Таким образом, калориметрический метод оказывается достаточно точным, однако длительно реализуемым, учитывая, что трехмерный график зависимости потерь от частоты индукции должен содержать, как минимум, несколько десятков точек, калориметрические измерения могут занять несколько недель. Вот эта особенность, характеризующая длительность процесса измерений и повлекла за собой необходимость разработки таких методов исследований, которые позволяют при сохранении точности в десятки, либо даже в сотни раз ускорить измерение и получать необходимые данные значительно быстрее.

С помощью новой измерительной установки(рис.4) проведено большое количество измерений потерь в магнитных материалах для широкого круга индукций и широкого круга частот.

Структурно-функциональная
схема предлагаемого
измерителя мощности

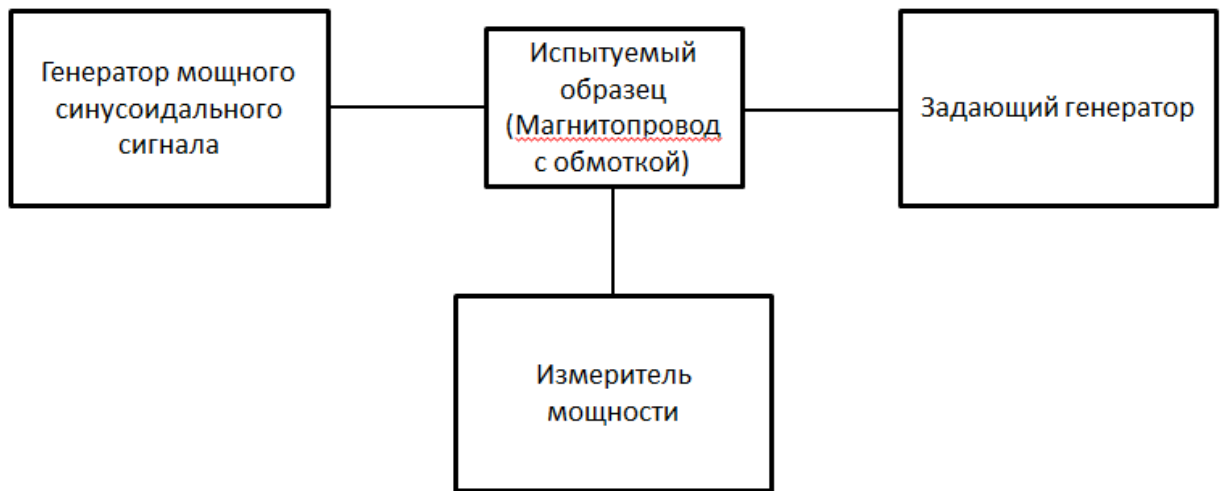


Рис. 4

Выполнено автором

Следует отметить, так как зависимость потерь как от частоты, так и от индукции носит достаточно резкий характер, то построение итоговой зависимости в обычных декартовых координатах представляет определенные сложности, то есть в рабочем диапазоне частот от 1 до 10 кГц и в рабочем диапазоне индукций от 0,1 до 1 Тл, у какого-то магнитного материала, например холоднокатанной стали или у амморфного материала, потери могут отличаться в 1000 раз, и построение графика в декартовых координатах - затруднительно. Поэтому мы выбрали узкие диапазоны изменения индукции и узкие диапазоны изменения частоты. В данных примерах мы строим определенные графики зависимостей потерь в некоторых распространенных материалах.

Первый график(рис.5) изображает типичную зависимость для потерь в известной марке феррита N87.

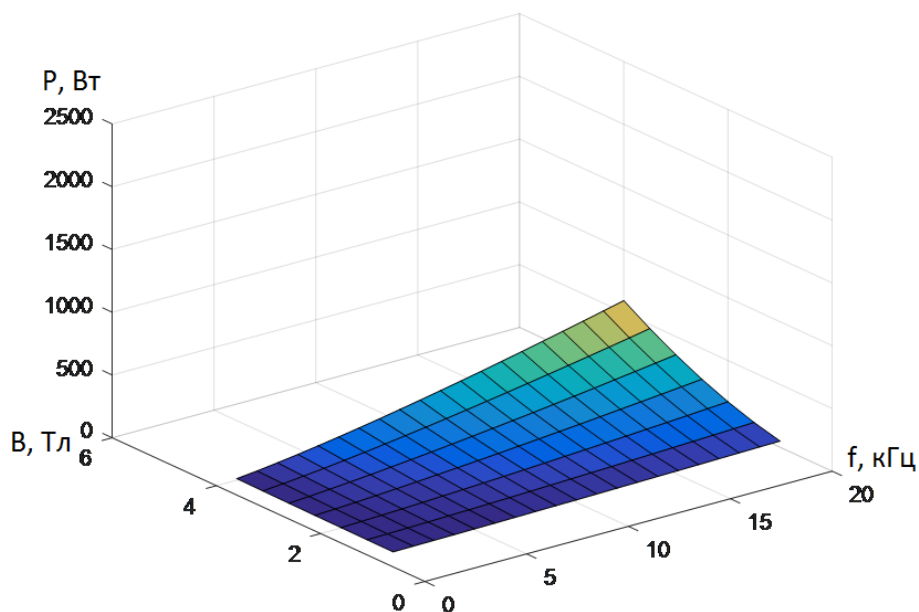


Рис. 5

Выполнено автором

Данная зависимость хорошо известна, она существует в таблицах и ее можно узнать на сайтах производителей и сайтах продавцов феррита. Однако для ряда материалов эти зависимости не известны.

Представлена графическая зависимость(рис.6) для нанокристаллического материала.

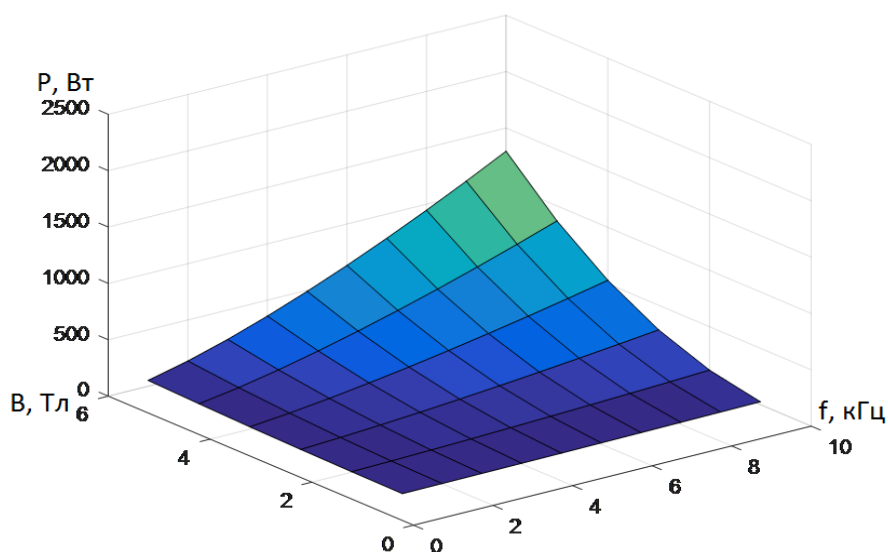


Рис. 6

Выполнено автором

Представлен график зависимости (рис.7) для типичного порошкового материала, карбонильного железа MPS20.

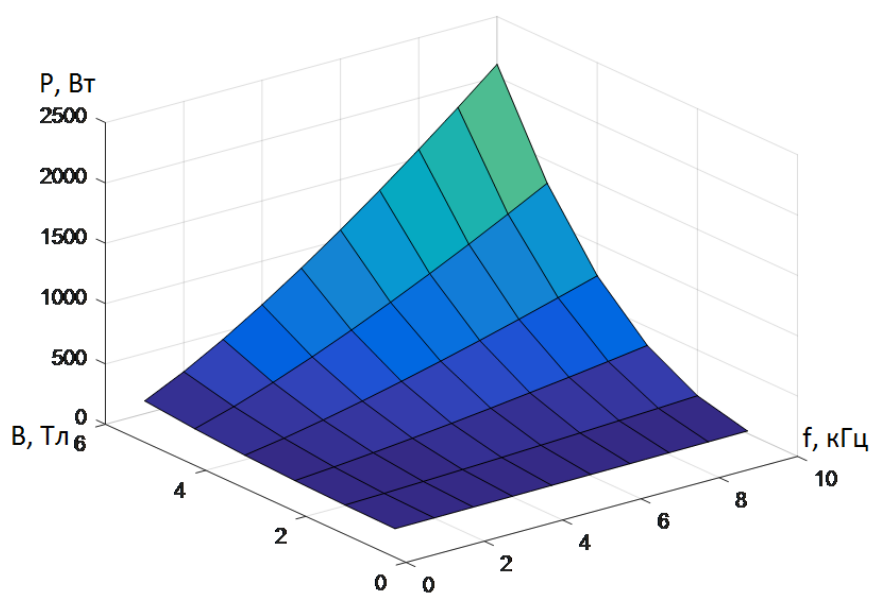


Рис. 7

Выполнено автором

Учитывая что производимые измерения достаточно просты, и для построения такого графика достаточно пары часов работ, то полученные таким простым путем формулы оказываются достаточно ценными, так как в ряде литературных источниках указываются разные зависимости не совпадающие с нашими, тем более производители не поддерживают предоставлением данных в продвижении своей продукции.

Выводы.

Исследованы 2 методики определения потерь:

1. Колориметрический метод: запускается процесс согрева, путем протекания переменного тока через магнитопровод, который греется и передает тепло калориметру, емкой термостатированной системе и за какое-то время наблюдается согрев калориметра до определенной температуры, затем образец удаляется оттуда, термостат приводится в исходное состояние и затем уже с помощью собственного нагревателя делается попытка нагреть его за это же время до этой же температуры. В этом случае собственный нагреватель измеряет собственную выделяемую мощность. Она по сути задачи совпадает с мощностью, выделенной в образце. Надо сказать, что этот способ требует очень хорошего опыта: трудно подобрать необходимую мощность нагревателя, данный способ трудоемкий и достаточно длительный.

2. Способ определения потерь, не основывающийся на калориметрических методах исследования, предложенный нами: установка для определения потерь в этом случае будет состоять из генератора синусоидального, либо прямоугольного напряжения, задающего ток в обмотке исследуемого магнитного компонента, причем этот генератор должен обладать практически стопроцентным коэффициентом полезного действия. Генератор подключен к первичному источнику питания через измеритель мощности, в этом случае измеритель мощности с высокой точностью покажет ту величину потерь, которая происходит в тракте после генератора. Если генератор работает в режиме холостого хода, либо нагружен на чисто реактивную нагрузку, например, индуктивность, либо емкость, величина потерь составит величину, близкую к нулю. Если же появляется активная составляющая мощности на выходе генератора, например, определяемая потерями в магнитном материале, то показания измерителя мощности на входе в точности совпадут с мощностью на выходе, т.е. с мощностью потерь в магнитном материале.

Также следует отметить, что в обеих методиках определения потерь требуется внесение некоторых корректировок, учитывающих потери не в магнитном материале, а в обмотках исследуемого компонента. Однако этими потерями можно пренебречь.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Целью данной работы является проведение исследований, которые дадут разработчику возможность эффективной разработки электромагнитных компонентов. Поставлены следующие решаемые задачи:

- анализ электромагнитных компонентов современного мощного электротехнического тракта и проблема их разработки;
- методика расчета дросселей;
- методика анализа потерь.

В процессе достижения поставленной цели, получены следующие результаты:

1. АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ КОМПОНЕНТОВ СОВРЕМЕННОГО МОЩНОГО ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО ТРАКТА И ПРОБЛЕМА ИХ РАЗРАБОТКИ.

Выполнен анализ типов материалов:

- *Металлические магнитные материалы*. Как правило, применяются в виде тонких лент, свитых в определенные конструкции. Способны при наименьших затратах энергии достигнуть наибольшей индукции. Обладают ферромагнитными свойствами. Эти магнитные материалы являются хорошими проводниками и имеют доменную структуру.

- *Ферриты*. Имеет высокие частотные свойства. Но предельная магнитная индукция в самых лучших ферритах редко превышает 0,5 Тл (как правило, 0,2-0,3). Аморфные материалы имеют (0,8-1,2), стали (1,6 – 2,2).. Таким образом, в ряде случаев, свойства стали оказываются предпочтительней. Ферриты так же могут иметь весьма различные проницаемости от единиц до единиц миллионов. Таким образом, его использование в дросселях фильтров, становится возможным, так же после введения немагнитного зазора. Наиболее совершенные, с точки зрения потерь, марки ферритов выигрывают по выделяемому теплу практически у всех магнитопроводов, даже у энергоэф-

фективные магнитопроводов из карбонильного железа. Однако необходимость использования немагнитного зазора приводит к тому, что электромагнитное излучение из этого зазора может оказаться достаточно большим, что плохо сказывается на общей электромагнитной совместимости создаваемых устройств, а так же приводит к безвозвратным потерям энергии, улетающей в пространство.

-металлические порошковые материалы включают в себя большое количеством различных типов веществ: Сендаст, молибденовый пермаллой, активно применяются материалы Nflux, Hightflux. Свойства этих материалов различны, однако следует иметь в виду что, как правило, чем большая индукция насыщения оказывается характерной для данного материала, тем большие потери на высоких частотах наблюдается в этом материале. Следует отметить, что в подавляющем большинстве применений в современной силовой электронике, для которой характерны высокие переменные подмагничивающие поля, применение большинства из этих материалов оказывается затруднительным. Так же к этим материалам относятся сердечники из чистого железного порошка, так называемого карбонильного железа. Производство этих сердечников, как в России, так и во всем мире весьма и весьма ограничено, что связано со сложностью технологий. Можно сделать выводы, что подбор металлических порошковых материалов, для использования в современных изделиях силовой электроники, в настоящее время весьма и весьма затруднителен. Данный материал имеет не сосредоточенный (или рассредоточенный) магнитный зазор. Будучи материалом, в которых ферромагнитные частицы, в отличие от феррита, достаточно отдалены друг от друга за счет того, что порошок металлического типа, из которого они сделаны, спечен в присутствии немагнитного материала. Эти материалы характеризуются заметно меньшей величиной проницаемости, благодаря чему можно избежать их насыщения в сильных магнитных и электромагнитных полях.

Представлена индивидуальность каждого разрабатываемого дросселя - в отличие от резисторов и конденсаторов, которые в огромном ассортименте

представлены на рынке электротехнических компонентов и могут быть куплены и использованы в различных изделиях, ассортимент дросселей достаточно скуден, причем это характерно для бывшей территории Советского союза, а в странах Европы, Америки и Японии он практически вообще отсутствует, и разработчик, собираясь реализовать дроссель, либо иной электромагнитный компонент, обычно приобретает магнитный материал в виде магнитопровода, провода обмоток и сопутствующие материалы и изделия. Доля индивидуальных проектов в общем объеме их использования в силовой электронике достигает 98%. Разработчик вынужден не только уметь использовать готовые электромагнитные компоненты, но в полной мере должен уметь их разрабатывать, испытывать.

Принципы, закладываемые при разработке и производстве дросселей электромагнитных компонентов. При задании габаритных размеров допускается свобода в выборе магнитной проницаемости μ и числа витков w , чем больше выбрана величина μ , тем меньше требуется количество витков. Пропорциональное изменение μ и w приводит к изменению важнейшей характеристики дросселя, такой как индукция магнитного поля внутри магнитного материала. Величина магнитной индукции, зависит, от магнитной проницаемости μ - чем больше величина магнитной проницаемости выбрана, тем большей величина индукции, при заданной величине индуктивности и заданной величине протекающего тока, реализуется. Вот этот факт, оказывается, не столько не известен, сколько часто пренебрежим в проведении расчетов специалистами, разрабатывающими магнитные элементы. В результате, как правило, достигаются слишком большие величины магнитной индукции и электромагнитный элемент не выполняет возложенных на него функций.

Таким образом, расчет дросселя, должен начинаться с выбора магнитной проницаемости материала, обеспечивающего заранее выбранный уровень электромагнитной индукции. Чем меньше будет выбрана величина μ , тем меньшую величину электромагнитной индукции удастся получить, что в ряде случаев приводит к достижению ряда положительных эффектов, таких

как уменьшение потерь на перемагничивание сердечников в переменных магнитных полях. Однако тем большую величину витков обмотки w придется применить, что естественно при заданных габаритах магнитопровода, что приводит к увеличению потерь в материале обмотки.

Разработчик для того, чтобы создать систему разработки трансформаторов и дросселей должен обязательно знать, для чего делаются эти индуктивные элементы и какие сопутствующие технические условия оказывают на это влияние. Для гидроакустических целей, в первую очередь для работы в мощных усилительных, генераторных и электропитательных устройствах, трансформаторы и дроссели должны обладать тремя основными характеристиками: 1. мощность, 2. Высокая энергетическая эффективность, то есть малая величина потерь (высокий КПД, который превышает 99%) 3. Широкополосность трансформаторов(работа на частоте, например, 700 Гц - 11 КГц.)

2. ДРОССЕЛЬ

Методика расчёта дросселей включает:

1. Получение исходных данных: индуктивность дросселя L , величина рекомендованной индукции B , величина протекающего тока I .

2. Осуществляется выбор разработчиком нужного нам объема V_c дросселя и величину магнитной проницаемости μ , исходя из опыта разработки дросселей и области его применения.

3. Расчет количества витков w .

Особенности расчетов:

1) Чем большая величина индукции B допустима, тем меньший объём магнитопровода V_c может быть использован, а также чем больший объём МП V_c выбран, тем большую величину μ может использовать разработчик.

2) Во сколько раз больше величина S_c применена, во столько раз можно уменьшить число витков w . Как правило, это позволяет снизить сопротивле-

ние провода обмотки и, тем самым, снизить потери в дросселе, увеличив его добротность (если угодно, КПД).

3) Рассчитанные величины μ и w должны быть соотнесены с представлением разработчика об ожидаемых значениях. Если значения этих параметров не укладываются в отведённые разработчиком рамки, следует провести расчёт повторно, задавшись откорректированными значениями I_c и S_c .

4) При использования в дросселях материалов МП с большей величиной проницаемости μ неминуемо влечёт за собой требование наращивания габаритов дросселя.

3. ИССЛЕДОВАНИЕ ПОТЕРЬ В МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛАХ.

Исследованы 2 методики определения потерь:

1. Колориметрический метод: запускается процесс согрева, путем протекания переменного тока через магнитопровод, который греется и передает тепло калориметру, емкой термостатированной системе и за какое-то время наблюдается согрев калориметра до определенной температуры, затем образец удаляется оттуда, термостат приводится в исходное состояние и затем уже с помощью собственного нагревателя делается попытка нагреть его за это же время до этой же температуры. В этом случае собственный нагреватель измеряет собственную выделяемую мощность. Она по сути задачи совпадает с мощностью, выделенной в образце. Надо сказать, что этот способ требует очень хорошего опыта: трудно подобрать необходимую мощность нагревателя, данный способ трудоемкий и достаточно длительный.

2. Способ определения потерь, не основывающийся на калориметрических методах исследования, предложенный нами: установка для определения потерь в этом случае будет состоять из генератора синусоидального, либо прямоугольного напряжения, задающего ток в обмотке исследуемого магнитного компонента, причем этот генератор должен обладать практически стопроцентным коэффициентом полезного действия. Генератор подключен к первичному источнику питания через измеритель мощности, в этом случае

измеритель мощности с высокой точностью покажет ту величину потерь, которая происходит в тракте после генератора. Если генератор работает в режиме холостого хода, либо нагружен на чисто реактивную нагрузку, например, индуктивность, либо емкость, величина потерь составит величину, близкую к нулю. Если же появляется активная составляющая мощности на выходе генератора, например, определяемая потерями в магнитном материале, то показания измерителя мощности на входе в точности совпадут с мощностью на выходе, т.е. с мощностью потерь в магнитном материале.

Также следует отметить, что в обеих методиках определения потерь требуется внесение некоторых корректировок, учитывающих потери не в магнитном материале, а в обмотках исследуемого компонента. Однако этими потерями можно пренебречь.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. В.И. Мелешин. Транзисторная преобразовательная техника. - М: Изд-во "Техносфера", 2005. – 632с.
2. Р.Х. Бальян, В.П. Обрусник . Оптимальное проектирование силовых высокочастотных ферромагнитных устройств. – Томск: Издательство" Том. ун-та", 1987. – 168с.
3. Р.Х. Бальян. Трансформаторы для радиоэлектроники. - М: Издательство "Советское радио", 1971)
4. Р.Х. Бальян. Трансформаторы малой мощности. - Л: Государственное союзное издательство судостроительной промышленности, 1961)
5. В.А. Александров, А.В. Куневич, К.К. Никитин, А.И. Рыбаков. Оптимизация дросселей узлов с импульсным преобразованием электроэнергии по критерию максимального КПД. Гидроакустика/Hydroacoustics. Вып.19 (1), 2014.
6. В.А. . Александров, К.К. Никитин, А.И. Рыбаков. Алгоритмы и методики разработки, расчета и последующего проектирования трансформаторов радиоэлектронной аппаратуры. Гидроакустика / Hydroacoustics. Вып. 20(2).
7. В.А. Михайлов. Расчет трансформаторов и дросселей. Издательство "Госэнергоиздат", 1949.
8. Н.Б. Догадин .Основы радиотехники. Издательство "Лань", 2007.
9. А.М. Бамбас, Ю.А. Савиновский. Дроссели фильтров радиоаппаратуры. Издательство "Советское радио"1962-192 с.
- 10.А.М. Бамбас, Ю.А. Савиновский. Дроссели переменного тока радиоэлектронной аппаратуры(катушки со сталью). Издательство" Советское радио", 1969.

11. И.Н. Белополский, Е.Н. Картеникова, Л.Г. Пикалова. Расчет трансформаторов и дросселей малой мощности. Издательство "Альянс", 2008.
12. И.Н. Сидоров, В.В. Мукосеев, А.А. Христинин. Малогабаритные трансформаторы и дроссели. Издательство "Коллектив", 2015.
13. А.Ф. Свиченков, Л.Г. Фуньтейн. Применение ферритов в радиоаппаратуре. Издательство "Государственное энергетическое издательство", 1956-22с.
14. В. Маклиман. Проектирование трансформаторов и дросселей. Издательство "ДМК Пресс", 2016.
15. А.Н. Евсеев. Расчет и оптимизация тороидальных трансформаторов и дросселей, 1-е издание. Издательство "Линия", 2011.
16. Бурман П.Г., Крайз А.Г. Производство магнитопроводов. 1959.
17. И.Н. Сидоров, А.А. Христинин, С.В. Скорняков. Малогабаритные магнитопроводы и сердечники. Издательство "Радио и связь", 1989-228.
18. А.Н. Евсеев. Расчет и оптимизация тороидальных трансформаторов и дросселей, 2-е издание. Издательство "Линия", 2017.
19. М.А. Березовский, В.М. Писаренко. Краткий справочник радиолюбителя. 2008.
20. Н.Н. Акимов. Резисторы, конденсаторы, трансформаторы, дроссели, коммутационные устройства. Издательство "Беларусь", 1994.
21. Г.А. Матвеев, В.И. Хомич. Катушки с ферритовыми сердечниками. Издательство "Энергия", 2 издание, 1962.
22. Н.Б. Балбашова. Миниатюрные импульсные трансформаторы на ферритовых сердечниках. Издательство "Энергия", 1976.
23. В.Л. Волков. Карбонильное железо. Издательство "ЕЭ Медиа", 1969
24. А.Л. Микаэлян. Теория и применение ферритов. Издательство "Госэнергоиздат", 1963.
25. Д.Д. Мишин. Магнитные материалы. Издательство "Высшая школа", 1981.

26. Б.Ю. Семенов. Силовая электроника. Издательство "ДМК-Пресс", 2017.
27. В.А. Бондарь. Генераторы линейно изменяющегося напряжения. Издательство " Энергоатомиздат", 1988.
28. Е.И. Каретникова, Т.А. Рычина, А.И. Ермаков. Трансформаторы питания и дроссели фильтров для радиоэлектронной аппаратуры. Издательство " Советское радио", 1973
29. В.А. Михайлов. Расчет дросселей. Издательство " Госэнергоиздат", 1988.
30. С.Н. Кризе. Расчет маломощных силовых трансформаторов и дросселей фильтров. Издательство " ЁЁ Медиа", 1950.