



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования

«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра морские информационные системы

## ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

На тему Разработка инженерной методики расчета электромагнитных элементов гидроакустических систем (трансформаторы)

Исполнитель Козлов Павел Алексеевич

(фамилия, имя, отчество)

Руководитель доктор технических наук, профессор

(ученая степень, ученое звание)

Никитин Константин Константинович

(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»

Заведующий кафедрой

(подпись)

(ученая степень, ученое звание)

(фамилия, имя, отчество)

«\_\_\_»\_\_\_\_\_2018 г.

Санкт–Петербург 2018

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	3
1. ДРОССЕЛИ.....	4
1.1 Электромагнитные компоненты современного мощного электрического тракта и проблема их эффективной работы.....	8
1.2. Применение дросселей в устройствах силовой электроники и гидроакустических передающих комплексах .....	11
1.3 Основные принципы, закладываемые при разработке и производстве дросселей электромагнитных компонентов.....	18
1.4 Трансформатор .....	21
1.5 Эффективная методика определения потерь в магнитных материалах.....	27
Выводы.....	31
2. РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТРАНСФОРМАТОРОВ ДЛЯ УСТРОЙСТВ СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ И ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b> 2
2.1 Индуктивность рассеивания .....	36
2.2 Внешнее поле дросселя и трансформатора.....	38
Выводы.....	39
3. ЭФФЕКТИВНАЯ МЕТОДИКА АНАЛИЗА ПОТЕРЬ В МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛАХ .....	40
Выводы.....	46
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	49
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	511

## ВВЕДЕНИЕ

Данная современная силовая электроника активно и четко использует современные электромагнитные компоненты для выполнения различных задач, а так же достижения различных целей. Использование электромагнитных компонентов в современной силовой электронике имеет видимые отличия от использования этих компонентов в других областях электротехники, например в энергетической электронике. И это отличие состоит в том, что современная силовая электроника использует электромагнитные компоненты, иными словами трансформаторы и дроссели фильтров, не только для передачи электроэнергии на большом уровне мощности, но и для передачи мощных сигналов и их обработки. Отличия электромагнитных компонентов от других линейных элементов электротехнического тракта состоит в значительной мере в том, что современная промышленность, как правило, не выпускает электромагнитные компоненты в том объеме и в том ассортименте, как она выпускает резисторы и конденсаторы. Хотя, надо сказать, что для определенных целей и резисторы и в особенности конденсаторы так же приходится заказывать на заводах по индивидуальным проектам. 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 и в полной мере должен быть готов к тому, что ему придется их разрабатывать, испытывать и производить большими сериями. Вот эти 3 момента, на которые мы обратили внимание и требуют проведения некоторых исследований, которые дадут разработчику возможность эффективной разработки электромагнитных компонентов и оптимизации их по определенному кругу параметров. Настоящая дипломная работа будет посвящена исследованию и разработке эффективных инженерных методик проектирования дросселей,

трансформаторов, а так же исследования потерь в материалах сердечников электромагнитных компонентов.

Объектом исследований в представленной дипломной работе являются гидроакустические системы.

Предметом исследований в представленной дипломной работе являются непосредственно электромагнитные компоненты.

Целью дипломной работы является разработка инженерной методики расчета электромагнитных элементов гидроакустических систем (трансформаторы).

В дипломной работе решены следующие задачи:

1. Предложена методика эффективного инженерного анализа и расчета мощных широкополосных трансформаторов, предназначенных для передачи сигналов в радиотехнике, гидроакустике и связи.
2. Разработан алгоритм инженерного расчета трансформатора, основанный на экспертной оценке габарита трансформатора, расчете магнитной системы и энергетическом расчете. Главным итогом реализации этого алгоритма является расчет КПД трансформатора и его сравнение с заданным.
3. Разработаны эффективные методы практического анализа потерь в магнитных материалах.

## **1. ДРОССЕЛИ**

Как уже отмечалось различные ГОСТы предполагают различные наименования индуктивных электромагнитных элементов. ГОСТ, касающийся

энергетической электроники, называет их электрическими реакторами, радиотехнический ГОСТ- дросселями фильтров.

Под определением дроссель здесь будем понимать ЭМЭ, практически реализующий электрическую величину индуктивности, причём будем рассматривать наиболее часто встречающуюся конструкцию дросселя - катушку (обмотку) на замкнутом сердечнике из магнитного материала (рис.1). 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;  $\mu_0$ , равное  $4\pi \cdot 10^{-7}$ , - магнитная постоянная;  $\mu$  - 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 не объективной 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 ( $\mu$  - 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:

$$B = \frac{0_{шг}}{w} \quad (2.2)$$

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  $\mu$ . 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  $\mu$ .

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

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

$$w = \frac{0_{шг}}{B} \quad (2.5)$$

Анализ (2.5) показывает, что при заданном значении  $\mu$  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  $\mu$  может использовать разработчик.

2) Если рост  $V_c$  достигнут увеличением  $S_c$ , то согласно (2.1) индуктивность  $L$  будет расти пропорционально  $Ош$ , 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  $\mu$  и  $w$  должны быть соотнесены с представлением разработчика об ожидаемых значениях. Если значения данных параметров не укладываются в отведённые разработчиком рамки, то 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  $\mu$  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 очевидное соотношение:

$$H = \frac{i \cdot w}{l} \quad (2.6)$$

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

Внутри магнитопровода индукция будет равна:

$$B = \mu \mu_0 H = \mu \mu_0 \frac{i w}{l} \quad (2.7)$$

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

Эта индукция создаст поток:

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

Здесь  $S_c$  – площадь поперечного сечения магнитопровода.

Производная потока по току есть индуктивность:

$$L = \frac{d\Phi}{di} \quad (2.9)$$

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.

## **1.1 Электромагнитные компоненты современного мощного электротехнического тракта и проблема их эффективной работы.**

Электромагнитные элементы реализуют одну из трех главных величин ряда линейных элементов: резисторов, реализующих сопротивление, электрических конденсаторов, реализующих емкость, и дросселей фильтров, реализующих индуктивность. Если говорить о дросселях, следует подчеркнуть, что терминология в данной сфере образована двумя основополагающими документами и несколько отличается от других разделов. Так, 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 путаница в терминологии. Мы же будем считать, что такие понятия как, собственно, индуктивность, как электрический элемент, катушка индуктивности, дроссель, дроссель фильтра, реактор электрический - есть одна и та же разновидность общей приборной секции, реализующая 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 беден. Это характерно для бывшей территории Советского союза, а в странах Европы, Америки и Японии выбор практически отсутствует, и разработчик, собираясь реализовать дроссель, либо иной электромагнитный компонент, обычно приобретает магнитный материал в виде магнитопровода, проводов обмоток и сопутствующих материалов и изделий. Такая особенность дросселей приводит к необходимости их расчета, исходя из ряда предварительных условий и требуемых параметров. Учитывая то, что подобными условиями может оказаться довольно широкий круг, и возможность вариативности параметров значительна, как правило, разработчик пытается сузить круг параметров, которые не-

обходимо изменять в процессе выбора решения. Для нас, как правило, это сужение происходит в ходе общего проектирования изделия. Проектировщик изделия, будь то прибор, блок, узел, плата, в состав которого входят электромагнитные компоненты, уже в ходе начальных этапов проектирования, как правило, имеет представление о том, какие габариты, исходя из решаемых задач, должны иметь электромагнитные компоненты. Хороший проектировщик на этой стадии совершает 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 занимаемых обмотками. Следует отметить, что в ряде других задач подобного упрощения может и не произойти, и решение будет проводиться по другим правилам, выходящим за рамки предстоящего диплома.

Итак, в соответствии с изложенным, в дипломе будут решаться следующие основные задачи:

1. Разработка эффективной методики расчета дросселей фильтров исходит из заданных габаритов по критерию максимальной эффективности. В данном случае мы понимаем эффективность, как совокупность параметров, определяющих энергетические характеристики дросселей, зная тот факт, что дроссель является двухполюсником, т.е. не имеет входа и выхода. Его работа не может быть в полной мере описана таким важным параметром, как коэффициент полезного действия, хотя понятие энергетических потерь в дросселе вполне может быть сформулировано. Таким образом, будем пытаться разрабатывать дросселя с минимальными энергетическими потерями. При этом речь может идти как о статических потерях (которые произойдут в обмотках дросселя), так и о динамических потерях (когда при расчете придется учитывать потери, возникающие из-за магнитных процессов в магни-

топроводе сердечника). То же самое может быть сказано в отношении трансформатора.

## 2. Разработка эффективной методики расчёта трансформаторов.

Трансформатор будет рассчитываться по таким же основным критериям, что и дроссель: в условиях ограниченности габаритов требуется получить трансформатор, выполняющий заранее назначенные функции и обладающий максимальной энергетической эффективностью, т.е. максимальным коэффициентом полезного действия.

Следует отметить, что между дросселями и трансформаторами существует, как правило, принципиальная разница с точки зрения подходов к расчету и проектированию. Дроссель обычно эксплуатируется в цепи протекающего тока, таким образом, источником энергии для дросселя является генератор тока, хотя возможны и другие варианты. Наоборот, трансформатор, своей первичной обмоткой, как правило, подключен к генератору напряжения. Эта особенность определяет существенное различие при расчете дросселей и трансформаторов, при расчете режимов этих приборов, влияющих на индукцию магнитного поля в сердечнике, при расчете коэффициента полезного действия, а также при необходимых расчетах, результатами которых являются параметры используемых обмоток.

## 3. Разработка эффективной методики практического анализа потерь в магнитных материалах.

### **1.2. Применение дросселей в устройствах силовой электроники и гидроакустических передающих комплексах.**

В соответствии с определением, заданным в ГОСТе, подавляющее большинство дросселей, используемых в силовой электронике, являются дросселями фильтров. Трудно представить такую ситуацию, когда исполь-

зуемый 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, или в цепях, формирующих траекторию переключения мощных силовых полупроводниковых элементов. Однако в любом случае, используется само определение индуктивности, как основного параметра дросселя. Индуктивность - это такой физический прибор, напряжение на котором пропорционально скорости изменения тока, проходящего 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, также 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:

1. Металлические магнитные материалы, как правило, обладают так называемыми ферромагнитными свойствами. Эти магнитные материалы являются хорошими проводниками и имеют структуру, которую физики называют до-

менной структурой, т.е. внутри магнитопровода существует большое 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. Это явление усиления приводит к созданию в магнитопроводе так называемой магнитной индукции (индукция в переводе с иностранного языка так и означает – наведение). Согласно известной формуле, индукция отличается от напряженности магнитного поля на множитель ( $\mu_0 \cdot \mu$ ),  $\mu_0$  - это магнитная постоянная в системе СИ,  $\mu$  как раз и имеет смысл магнитной проницаемости материала, которая и определяет его магнитные свойства и показывает во сколько раз поле, в толще материала, превышает поле, порождающее индукцию. В целом, величина  $\mu$  является частотно зависимой, зависимой от внешнего поля, однако в ряде случаев, можно считать величину  $\mu$  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, определяющей 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:

1. величина требуемой индуктивности

2. 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).

3. 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 (которая будет рассчитана) и величина количества витков (которая так же должна быть рассчитана). 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, исходя из самых простейших математических предположений, 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 витков. Существует лишь единственная комбинация магнитной проницаемости и числа витков, приводящих к достижению требуемой индуктивности в условиях заданной индукции. Далее рассмотрим магнитные материалы [1].

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 структура в них выражена 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 сомнительна, в особенности, если речь идет о трансформаторах. В дросселях же, если широкополосность затрагивает высокочастотные области, применение аморфных материалов может быть оправдано и в данном случае. Если же нижней частотой рабочего диапазона оказывается величина порядка единиц, а то и десятков 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. Отметим, что в связи с высокой начальной 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.

2. Следующей большой группой материалов для использования в технике дросселей, а так же трансформаторов являются ферриты. Изначально считается, что феррит является более высокочастотным материалом, нежели остальные. Следует отметить, что частотные свойства ферритов действительно высоки, однако это никак не мешает использовать их и 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 индукцию 0,8-1,2, стали 1,6 – 2,2 Тл. 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 Magnetix (Магнетикс) 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, и приводит к безвозвратным потерям энергии, улетающей в пространство.

3. Следующая большая группа магнитопроводов – это металлические порошковые материалы. Их объединяют достаточно большим количеством различных типов веществ, включая так называемый Сендаст (в транскрипции

производителя Магнетикс - это материал CoolMμ (Кул мю)), включая молибденовый пермаллой (активно производимы как за границей под маркой MPP – порошковый материал, так и у нас в стране под маркой МП), так же активно применяются материалы Flux, 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. Это связано со сложностью технологий, так например, на территории России в очень ограниченном ассортименте этот материал производит один единственный завод. Таким образом, подытоживая сказанное, можно заявить, 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. За счет того порошок металлического типа из которого они сделаны, спечен в присутствии немагнитного вещества, в этих порошковых материалах, в отличии от феррита, ферромагнитные частицы, достаточно отдалены друг от друга. По этой причине материалы характеризуются заметно меньше 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, удастся достичь широкого изменения магнитной проницаемости сердечника. Так, практически для всех магнитных материалов, которые предлагает на отечественном рынке фирма Магнетикс, существует десятикратная градация магнитной проницаемости от наименьшей до наибольшей, а в ряде существует и более обширная градация. Подобные свойства позволяют не только оптимальным образом подбирать магнитные материалы, но и избегать их насыщения в сильных магнитных и электромагнитных полях.

### **1.3 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. Несколько забегаая вперед, можно заявить о том, что и трансформатор, как правило, делается таким же образом, только является совокупностью нескольких дросселей выполненных на одном и том же магнитопроводе. С первого взгляда может показаться, что расчет дросселя, в особенности на постоянном токе, может оказаться достаточно простой процедурой [2, 5]. Это действительно так, однако некоторые моменты следует отметить с особым вниманием. Ясно, что если взять магнитопровод с характерными габаритными размерами, такими как площадь сечения магнитопровода и длина средней магнитной линии, то индуктивность, выполненная на этом дросселе, будет характеризоваться самой простейшей величиной и будет пропорциональна магнитной проницаемости, площади сечения магнитопровода, и квадрату числа витков. Эта пропорциональность квадрату числа вит-

ков, 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. Какая это часть? Например, для магнитопровода с проницаемостью 500 – это 1/500 часть. Это не большая величина, поэтому можно с уверенностью сказать, что квадратичная зависимость характерна для высоких проницаемостей, превышающих несколько десятков. Отклонение от этой зависимости достаточно хорошо заметно на малых проницаемостях в единицы и в пределах первых двух десятков. 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  $\mu$  и числа витков  $w$ , чем больше выбрана величина  $\mu$ , тем меньше требуется количество витков. Вот эта свобода, она выбирается тем, уничтожается тем, что пропорциональное изменение  $\mu$  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  $\mu$ . Чем больше величина магнитной проницаемости выбрана, тем большая 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, прежде всего, должен начинаться с выбора магнитной проницаемости материала, обеспечивающего заранее выбранный уровень электромагнитной

индукции. Чем меньше будет выбрана величина  $\mu$ , 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.

Далее раздел, посвященный исследованию 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. Это очень важный факт, который впоследствии неоднократно будет использован при разработке трансформаторов. В сравнительно небольшом разделе, характерном для данного диплома, показано, что 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 такое 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.

На этом раздел, посвященный дросселям и первичным обмоткам трансформаторов, так же, по сути, являющихся дросселями, может считаться законченным.

## **1.4 Трансформатор**

Трансформатор является вторым, более сложным электромагнитным компонентом по отношению к дросселю. Наилучшим определением трансформатора будем считать следующее: Трансформатор – это электромагнитный прибор, электромагнитный компонент, состоящий из двух или более дросселей, объединенных общей магнитной цепью. Это определение весьма емкое, т.к. определяет трансформатор как сущность, характеризуя его определенным составом подкомпонентов, а во вторых это определение не затрагивает свойств трансформатора, которые должны быть оговорены отдельно. Итак, для чего применяется трансформатор? Главным свойством трансформатора, определяющим основной принцип его применения, является то, что трансформатор оказывается неэлектрической вставкой в электрическую цепь, т.е. передача энергии, и не только энергии, но и сигнала на большом уровне

мощности, из одной электрической системы, цепи, в другую происходит, минуя электрическую стадию, то есть посредством магнитного поля. Многие изделия позволяют передавать как сигнал, так и энергию, минуя электрическую стадию. Например, это электромашинная вставка, в составе которой присутствует электродвигатель, питающийся от первичной цепи, передаточное звено от электродвигателя к электрогенератору, имеющее механическую природу, и энергию во вторичной цепи вырабатывает электрический генератор, однако, посредством такой системы невозможно передавать сколько-нибудь сложные сигналы. Широкий класс компонентов используют другие неэлектрические вставки, например, оптические вставки либо линии связи, на этом принципе функционируют многочисленные оптоэлектронные развязки, однако, оптоэлектронная развязка не способна передавать энергию, она способна передавать только сигнал на сверхмалом уровне мощности. Таким образом, единственным из легко реализуемых элементов, передающих сигнал на большом уровне мощности в условиях гальванической развязки, является трансформатор. Понятие гальванической развязки достаточно важно для радиотехники и электротехники и оно определяется следующим: две системы электрических токов, либо две цепи называются гальванически развязанными, если между любыми двумя точками, из них одна точка в одной системе, а другая точка в другой системе, невозможно протекание никакого тока. Таким образом, любые две точки этих систем могут быть безопасным образом соединены друг с другом. Отметим, что такие признанные изоляторы по постоянному току как конденсаторы никак не обеспечивают гальванической развязки. Как известно, через конденсатор может уверенно протекать емкостной ток, или как его раньше называли – ток смещения, и изолятор конденсатора, полностью препятствующий проникновению электронов из одной цепи в другую, не является препятствием и не является элементом, образующим гальваническую развязку.

Второй важнейшей функцией трансформатора является его способность изменять напряжение, либо ток. Иногда с этим свойством возникают определенные трудности у электротехников. Что же меняет трансформатор? Ток или напряжение? Однако, надо признать, что эти два параметра электрической цепи абсолютно связаны между собой и в данном случае, трансформатор изменяет то, от генератора чего он работает. Если трансформатор работает от генератора напряжения, он изменяет напряжение, а если трансформатор работает от генератора тока, он изменяет ток. Соответственно, такие трансформаторы называют трансформаторами напряжения и трансформаторами тока. Никакой физической разницы между ними нет. Вопрос только в процессе и сути подключения этих изделий к электротехнической цепи. В дальнейшем будем говорить только о трансформаторах напряжения, хотя расчет и использование трансформаторов тока никаких принципиальных отличий от трансформаторов напряжения не имеет. По первичной цепи трансформатор представляет один из дросселей, связанных общей магнитной цепью, т.е. с точки зрения стороннего наблюдателя, находящегося на позиции первичной цепи, трансформатор это дроссель и вся его первичная цепь может быть рассчитана именно как элемент дросселя по правилам расчета дросселей. Однако, стоит отметить, что если расчет дросселей, о котором говорилось в предыдущем разделе и который более подробно будет рассмотрен позже, ведется, исходя из заданного, протекающего через этот дроссель тока, то ток холостого хода трансформатора, исходя из которого ведется первичный расчет дросселя трансформатора, включенного в сеть, определяется напряжением, приложенным к трансформатору и сопротивлением первичной обмотки трансформатора. Т.к. это сопротивление носит индуктивный характер и является частотно зависимым, то ток первичной обмотки трансформатора также является частотно зависимым и в этой связи расчет трансформатора и расчет дросселя оказывается несколько различными. Далее будет показано, что в отличие от дросселя, индукция холостого хода трансформатора, похожая на аналогичный параметр

индукции в дросселях, теряет зависимость от величины магнитной проницаемости в нём, столь характерной для дросселя и на этот факт мы обращаем особое внимание. Отметим квадратичную зависимость индуктивности холостого хода трансформатора. Заметим, что все определения будут даны позже, в данном случае отметим лишь то, что индуктивность холостого хода – это индуктивность трансформатора со стороны зажимов первичной обмотки при разомкнутой вторичной, либо вторичных обмотках. Эта квадратичная зависимость, определяя как индуктивность, так и индукцию магнитного поля, в основном и обеспечивает возможность работы трансформатора при ограниченных индукциях. Иными словами нетрудно показать, что чем большее количество витков первичной обмотки будет использовано в трансформаторе, тем меньше величина индукции магнитного поля будет наблюдаться в сердечнике. И это будет происходить в отличие от дросселя для любых величин магнитной проницаемости материала, применяемого в трансформаторе. Вот с учетом этой особенности ведется первый этап расчета трансформатора. Выбирается число витков первичной обмотки, обеспечивающее заданную величину магнитной индукции. Обратим внимание, что необходимо внести некоторые ограничения на процесс расчета трансформатора. Самым удобным, как и в случае с дросселем, является первичная экспертная конструктивная оценка габаритов трансформатора, применяемого в данном узле, и в дальнейшем расчет трансформатора ведется с учетом заранее выбранных габаритных размеров, в первую очередь определяющих такие параметры, как площадь сечения магнитопровода и площадь окна, предназначенного для заполнения обмоткой. В литературных источниках неоднократно показывалось, что мощность трансформатора, которая определяется способностью трансформатора передавать энергию в единицу времени и при этом допускать лишь определенный нагрев своих обмоток, зависит от многих параметров, но более всего при заданной плотности тока в обмотках эта мощность определяется пропорциональностью как площади магнитопровода,

так и площади окна трансформатора, предназначенного для заполнения обмоткой.

Таким образом, мощность трансформатора будет пропорциональна четвертой степени габаритных размеров, в отличие от аналогичных параметров дросселя, где мощность пропорциональна лишь третьей степени габаритных размеров. В нашем случае целесообразно оперировать не параметром мощности трансформатора, либо как её еще называют габаритной мощностью трансформатора, а параметром коэффициента полезного действия трансформатора. Нетрудно показать, что этот коэффициент полезного действия будет возрастать с ростом габаритов трансформатора при прочих заданных параметрах и потери в трансформаторе будут быстро убывать, вплоть до пропорциональности четвертой степени габаритных размеров, хотя, в принципе, эти заявления полезно было бы доказать математически и это доказательство может оказаться не сложным. Особо следует учесть, что как в дросселе, так и в трансформаторе часть потерь, связанных с передачей энергии, может происходить в магнитопроводе трансформатора. Однако здесь следует сделать одну оговорку, про то, что в той модели трансформатора, которую мы сейчас разрабатываем, которую используем, передача энергии от первичной обмотки к вторичной, происходящая посредством электромагнитного поля, идет, практически, без потерь энергии, т.к. первичная и вторичная обмотки трансформатора под воздействием рабочих токов создают электромагнитные поля, а точнее магнитные поля, равные по величине и противоположные по знаку. Таким образом, единственной причиной магнитных потерь в трансформаторе является поле холостого хода трансформатора, которое определяется только током холостого хода первичной обмотки, никак не зависит от рабочих параметров трансформатора и его рабочих токов, и присутствует в магнитопроводе трансформатора в любом режиме его использования. Для уменьшения поля холостого хода трансформатора и потерь, связанных с наличием этого поля, следует выбирать большее число витков в трансформаторе и уменьшать индукцию поля холостого

хода трансформатора. Однако увеличение числа витков приведет к необходимости уменьшения сечения провода, в котором ведется намотка, и неизбежно повлечет за собой увеличение потерь в проводе. Таким образом, наличие возникновения проблемы по типу оптимизационной задачи. И критерием оптимизации может служить уменьшение суммарных итоговых потерь, как в обмотке, так и в магнитопроводе трансформатора в условиях достижения других, определенных другими принципами, свойств трансформатора, таких, например, как надежность, стоимость, технологичность и т.д. Заметим, что избежав потерь в проводнике, например, обеспечив сверхпроводящие условия работы трансформатора, возможно получение трансформатора сверхбольшой мощности. То же самое можно сказать и о других магнитных элементах. И последнее, на что следует обратить внимание разработчику при проектировании трансформаторов. Выбор магнитного материала для трансформатора происходит по целому ряду критериев. В первую очередь – это частотные свойства материала и величина возможных потерь, во-вторых – это максимальная индукция, которую способен терпеть этот материал. Так, например, ферриты обладают великолепными малыми потерями на достаточно высоких частотах, однако, они не способны противостоять большой величине индукции, следовательно, в отличие от расхожего мнения, бытующего даже в среде некоторых специалистов по трансформаторам и электропитанию, использование ферритовых трансформаторов оказывается возможным на любых частотах, в том числе и на низких, нельзя говорить, что феррит – это высокочастотный материал для трансформаторов, но при проектировании трансформаторов на ферритах следует иметь в виду, что величины индукции в этих материалах в разы меньше, чем аналогичные в электротехнических сталях, и использование ферритов на низких частотах окажется совершенно нецелесообразным. То же самое можно сказать и про современные высококачественные аморфные и нанокристаллические материалы. Если трансформатор предназначен для работы на низких частотах, где в любых материалах потери в магнитопроводе от индукции холостого хода будут не-

значительные, никакие преимущества эти материалы не получают по сравнению с холоднокатаными либо горячекатаными электротехническими сталями. Более того, если трансформатор предназначен для обслуживания широкого диапазона входных частот, например, от 100 Гц до 10 кГц, то использование электротехнических сталей окажется целесообразнее и в этом случае, потому что, как уже было сказано, как ток холостого хода, так и индукция холостого хода в трансформаторе являются частотно зависимыми и максимальная индукция в данном случае будет наблюдаться на минимальных частотах, т.е. на частоте 100 Гц. Более того, как не трудно показать, используя формулу для зависимости потерь в магнитопроводе от частоты индукции уже введенную нами при рассмотрении дросселей, именно на этой частоте, будучи минимальными по своей величине, потери достигнут максимума. Малые они из-за малости частоты, а максимальные они в соответствии с имеющейся формулой. Следовательно, еще раз подтверждается то, что даже для широкодиапазонных трансформаторов использование современных прогрессивных материалов, имеющих, к сожалению, меньшие величины предельной индукции насыщения, чем у электротехнических сталей, окажется нецелесообразным. Наоборот, если трансформатор предназначен для передачи широкого диапазона частот, нижняя граница которого достаточно велика, например, для частот от 10 до 40 кГц, то здесь применение аморфных материалов станет единственно возможным, и электротехнические стали даже на нижней частоте диапазона в 10 кГц будут иметь очень высокие потери.

Вся совокупность знаний, которая касается данного рассматриваемого приближения работы трансформатора, является весьма не сложной и вполне может стать основой для защищаемой работы. Более сложные вопросы, например, связанные с точным расчетом индуктивности рассеивания, с расчетом внешнего поля трансформатора, с влиянием эффекта близости обмоток трансформатора, восходящего по своей физической сущности к скин-эффекту, с расчетом межэлектродных, межобмоточных емкостей, с техноло-

гическими расчетами, с расчетами надежности и с расчетами тепловыделения выходят далеко за рамки настоящей работы [1].

В заключение этой части следует отметить, что получение разработчиком численного значения числа витков для трансформатора является основой для последующего расчета [3, 2]. Исходя их геометрии магнитопровода и числа витков, нетрудно рассчитать длину обмоток и толщину провода (используя известную площадь окна). Это позволяет определить сопротивление обмоток и, соответственно, потери в них при протекании рабочих токов. Учтя потери в магнитопроводе, можно рассчитать общие потери и КПД, а далее, решая термостатическую задачу – и температуру перегрева, на чем простейший расчет оказывается окончательным.

### **1.5 Эффективная методика определения потерь в магнитных материалах**

С целью ускорения получения информации о частотно-индукционной зависимости потерь в материалах магнитопроводов 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, напри-

мер, 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 калориметрического 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 регистриру-

ет 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 современных условиях, когда производитель не сообщает пользователю данных, достоверных сведений 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  $\alpha$  и  $\beta$ , то производители современных аморфных и нанокристаллических материалов, такие как «Гаммамат» 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.

Данный раздел является наименее важной частью комплексной работы посвященной электромагнитным компонентам. Моя же часть посвящена трансформаторам и будет описана в разделе ниже.

Вот такой алгоритм расчета дросселя можно предложить. Он пояснен моим коллегой.

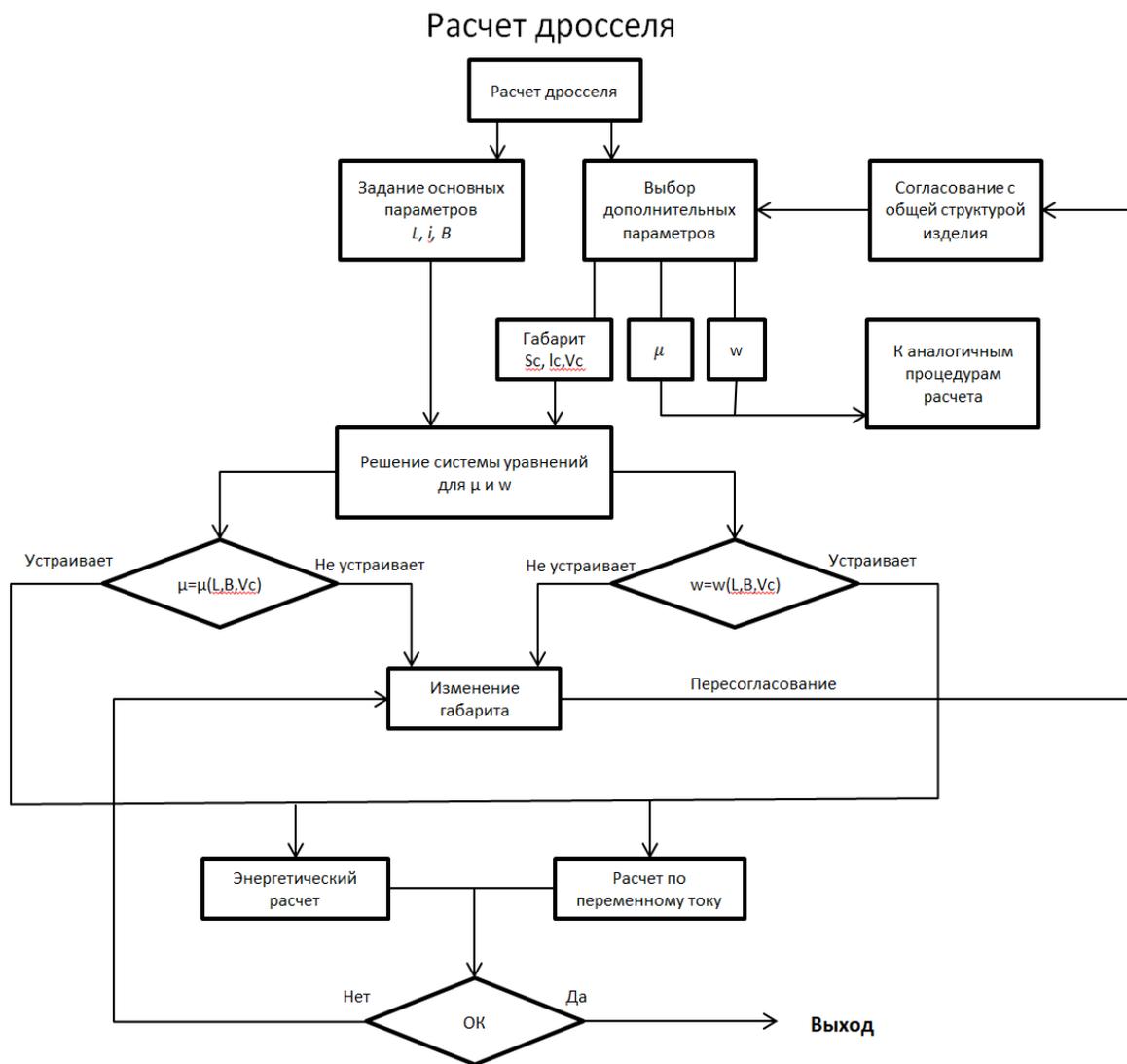


Рисунок 1 - алгоритм расчета дросселя

## Выводы

Разработан алгоритм расчета дросселя, который включает в себя следующее: Первое что у нас имеется это исходные данные. Они включают следующие величины:  $L$ ,  $\mu$ ,  $S_c$ ,  $w$ ,  $l_c$ . После нужно выбрать материал с магнитной проницаемостью. Это может быть феррит, порошковое карбонильное железо или молибденовые пермаллои. Выполняем оценку необходимого объема сердечника. После выбираем МП, состоящий из 4-х сердечников. Затем определяем необходимую индуктивность единичного витка. И измеряем потери в магни-

топроводе, потери МП и потери в сердечнике. И в конце приступаем к проектированию.

## **2. РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТРАНСФОРМАТОРОВ ДЛЯ УСТРОЙСТВ СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ И ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ**

Основные принципы, заложенные в основу инженерной методики расчета дросселей и описанные в предыдущем разделе, могут использоваться и для расчета трансформаторов. Еще раз напомним, в чем суть этих принципов.

Первое: если для дросселя заданы основные характеристики (рабочий ток  $i$ , индукция  $B$ ), то в триоде ( $V_c, S_c, l_c$ ),  $w, \mu$  даже два параметра не могут быть заданы произвольно. Так, задание геометрии магнитопровода ( $V_c, S_c, l_c$ ) требует определенного выбора числа витков  $w$  и проницаемости магнитного материала сердечника  $\mu$ . Аналогично задание  $\mu$  определяет геометрию и число витков, а задание  $w$  определяет  $\mu$  и геометрию.

При расчете трансформатора следует учесть, что рабочий ток не может вмешиваться в процесс расчета, так как протекает в двух или нескольких магнитосвязанных обмотках и поля, им создаваемые, компенсируют друг друга в магнитопроводе (МП).

Единственным процессом, создающим в МП нескомпенсированное магнитное поле, является протекание тока холостого хода (ХХ).

$$i_{xx} = U / (w \cdot L_{xx}) \quad (3.1)$$

где  $U$  - величина приложенного напряжения,  $w$  - частота,  $L_{01}$  - индуктивность ХХ, вычисляемая по общим принципам. Нетрудно получить зависимость для числа витков первичной обмотки трансформатора, обеспечивающее заданную величину индукции  $B$  при заданных параметрах входного напряжения ( $U, w$ ):

$$w = U / (w \cdot S \cdot B) \quad (3.2)$$

Последняя зависимость, хорошо известная разработчикам [4, 5], показывает, что требуемое число витков  $w$  оказывается независимым от проницаемости материала магнитопровода  $\mu$  и величины  $l_c$ . Физическая интерпретация этих фактов не сложна и не входит в задачи излагаемого материала. Индукция имеет вид:

$$L = \lambda \cdot \mu \quad (3.3)$$

где  $\lambda = \mu \cdot U^2 / w^2 \cdot B^2 \cdot V^2 = const.$

Анализ последней зависимости показывает, что большинство параметров трансформатора оказываются независимыми от величины магнитной проницаемости (МП)  $\mu$ , а единственным параметром, имеющим такую зависимость, является индуктивность холостого хода (

). } Последнее утверждение позволяет разрабатывать трансформаторы с близкими характеристиками (габариты, мощность, КПД), однако отличающимися величинами индуктивности  $L_{01}$  и, следовательно, тока холостого хода  $i_{xx}$ . Последнее немаловажно при проектировании определенного класса устройств, где заранее выбранная индуктивность холостого хода выполняет

роль дополнительного дросселя, например дросселя компенсации емкостной составляющей нагрузки.

Одновременно следует отметить, что если при разработке дросселя существует определенная свобода в выборе ряда параметров, влияющих на характеристики (геометрия и габарит,  $\mu$ ,  $w$ ), то отсутствие зависимости параметров трансформатора от магнитной проницаемости лишает разработчиков такой свободы и единственным параметром, оказывающим всеобъемлющее влияние на основные характеристики трансформатора, становятся габарит и геометрия магнитопровода, а с ним и габарит трансформатора в целом.

Тот факт, что в соответствии с полученными нами данными такие важные параметры трансформатора, как мощность и коэффициент полезного действия в решающей степени зависят исключительно от размеров трансформатора, позволяют существенно упростить его расчет. Нетрудно показать (строгое доказательство этого факта несложно, но выходит за пределы настоящей работы), что с ростом габарита магнитопровода возможно не только повышение мощности трансформатора, рассчитываемого по тем или иным алгоритмам, но и абсолютное снижение паразитных энергетических потерь как в обмотках трансформатора, так и в его магнитопроводе.

Обычно считают, что так называемая габаритная мощность трансформатора, определяемая при заданной величине допустимой индукции холостого хода  $B$  и максимально допустимой плотности тока в обмотках  $j$ , связано с 4-ой степенью выбранного габарита трансформатора, параметром  $\xi = S_{\text{об}} \cdot S_{\text{окна}}$ , равным произведению площади магнитопровода на площадь так называемого окна предназначенного для заполнения обмотками.[1, 5]. Для нас более важным является зависимость от параметров трансформатора его КПД, определяемого соотношением передаваемой мощности к мощности потерь.

Так как мощность потерь определяется потерями не только в обмотках, но и потерями в магнитопроводе, вызванными наличием поля холостого хо-

да, не существует простой однозначной зависимости КПД от габаритов и геометрии трансформатора. В этих условиях проектирование трансформатора, ведущееся на основе принципов оптимизации по критерию максимизации КПД, является порою непростой оптимизационной задачей, эффективно поддающейся решению с использованием численных методов.

С учетом сказанного, важным умением и большим искусством разработчика становится правильный первичный выбор размеров и геометрии магнитопровода, обеспечивающий при всей совокупности дополнительно воздействующих факторов, заданный термодинамический рабочий режим и коэффициент полезного действия.

В качестве упомянутых дополнительных условий могут выступать надежность, технологические, стоимостные ограничения, а также последствия воздействия на функционирование трансформатора таких процессов и параметров, как емкостные токи, индуктивность рассеивания, скин-эффект, эффект близости и другие.

На основе наших результатов предлагается данный алгоритм расчета трансформатора:

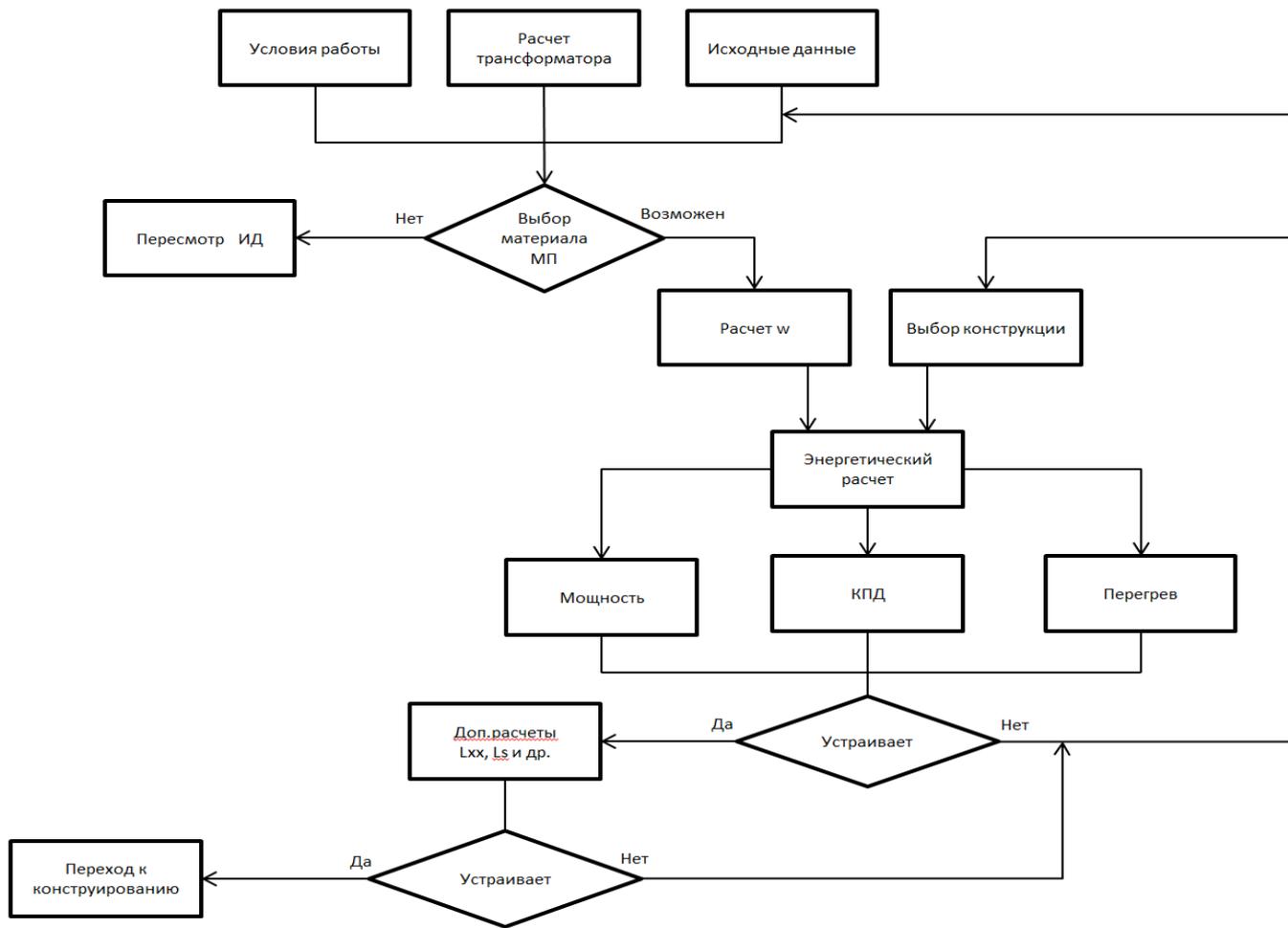


Рисунок 2 - алгоритм расчета трансформатора

## 2.1 Индуктивность рассеивания трансформатора

Индуктивность рассеивания является вторым важнейшим параметром, имеющим размерность индуктивности. В идеальном трансформаторе индуктивность рассеивания равна нулю, поэтому в реальном трансформаторе ненулевая индуктивность считается паразитным параметром.

За исключением небольшого числа случаев, когда индуктивность рассеивания может успешно использоваться как дроссель, соединенный последовательно с вторичной обмоткой трансформатора, эта индуктивность мешает нормальной работе трансформатора, образуя сопротивлением нагрузки фильтр нижних частот первого порядка.

В литературных источниках [1,4], формирующих основные знания в области электромагнитных компонентов, уделено недостаточное внимание отображению физической сущности: явления рассеивания, и собственно индуктивность рассеивания.

В результате более поздние издания, например [1], дают заведомо неверную трактовку физической сущности индуктивности рассеивания. Так в монографии В.И. Мелешина процесс рассеивания связывается с замыканием линий магнитного поля создаваемого обмотками за пределами магнитопровода в связи с не плотным прилеганием обмотки к магнитопроводу.

Нетрудно показать теоретически, что такой подход является ошибочным. Особенно убедительными оказываются экспериментальные данные, свидетельствующие о том, что наличие или отсутствие магнитопровода, равно как и величина проницаемости его, вообще не оказывает никакого воздействия на величину индуктивности рассеивания, измеряемого как индуктивность со стороны зажимов первичной обмотки, при замкнутой вторичной обмотке трансформатора. Опуская возможные теоретические рассуждения, отметим, что эксперимент демонстрирует зависимость индуктивности рассеяния только от двух физических факторов:

- 1) Число витков первичной и вторичной обмоток.
- 2) Геометрическая близость и идентичность объемов, занимаемых в пространстве первичной и вторичной обмоток.

Таким образом, если бы удалось изготовить трансформатор, у которого элементарные объем и пространство, занимаемое первичной и вторичной обмоткой, совпадали, индуктивность рассеивания обращалась бы в 0. Понятно, что с наибольшим успехом реализовать такую ситуацию удастся лишь в трансформаторах с единичным коэффициентом трансформации. Если же трансформатор является повышающим, либо понижающим, то максимальное сближение первичной и вторичной обмоток может достигаться организацией чередования частей первичной и вторичной обмоток в окне магнитопровода. Но полного уничтожения индуктивности рассеивания в этом случае добиться уже невозможно. Однако ее величина может быть снижена в 10 и 100 раз по отношению к тому случаю, когда меры, применяемые к снижению индуктивности рассеивания  $L_s$ , отсутствуют.

## **2.2 Внешнее поле дросселя и трансформатора**

Внешнее поле дросселя (при протекании постоянного тока дросселя - это поле будет магнитным, а в случае переменного тока дросселя - будет электромагнитным) создается протекающим через обмотку дросселя нескомпенсированным током. В этом случае замкнутый сердечник (магнитопровод дросселя) не оказывает на величину этого поля никакого воздействия.

Естественно, что внутри замкнутого магнитопровода может существовать иное магнитное поле существенно превышающее внешнее. В этом случае расчет величины внешнего поля и его конфигурации не представляют существенной проблемы.

Если же сердечник не может считаться замкнутым (например: стержневой сердечник, сердечник с немагнитным зазором, сердечник с несосредоточенным магнитным зазором - из спечённых порошковых магнитных материалов), то внешнее поле получает трудно рассчитываемую дополнительную составляющую.

Вышесказанное определяет единственную составляющую внешнего поля дросселя и в полной мере относится к той составляющей внешнего поля трансформатора, которая определяется протеканием тока холостого хода.

Как правило, для трансформатора эта составляющая является основной, но не единственной, известно, что рабочие токи первичной и вторичной обмоток трансформатора порождают значительные, равные по величине и противоположные по знаку поля в магнитопроводе и вне его. Если бы индуктивность рассеивания трансформатора отсутствовала, компенсация полей создаваемых рабочими токами первичной и вторичной обмоток, была бы полной и вклада во внешнее поле протекания рабочих токов не вносила бы. Понятно, что в реальных условиях полной компенсации не происходит, и в этом случае мы говорим о вкладе во внешнее поле составляющей, связанной с рассеиванием. За исключением особых случаев, когда индуктивность рассеивания трансформатора и используется, вклад в явление рассеивания во внешнее поле оказывается небольшим.

### **Выводы**

В данной главе предложена методика эффективного инженерного анализа и расчета мощных широкополосных трансформаторов, предназначенных для передачи сигналов в радиотехнике, гидроакустике и связи.

Разработан алгоритм инженерного расчета трансформатора, основанный на экспертной оценке габарита трансформатора, расчете магнитной системы и энергетическом расчете. Главным итогом реализации этого алгоритма является расчет КПД трансформатора и его сравнение с заданным

#### **4. ЭФФЕКТИВНАЯ МЕТОДИКА АНАЛИЗА ПОТЕРЬ В МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛАХ**

Рассмотрим методику 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, определя-

ются 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, которая состоит из генератора синусоидального напряжения, определяющего ток и, соответственно, индукцию в магнитном материале, способно управлять как величиной, так и частотой подаваемого синусоидального воздействия.



Рисунок 3 - Структурно-функциональная схема калориметрического метода определения мощности

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 проведено большое количество измерений потерь в магнитных материалах для широкого круга индукций и широкого круга частот.

Структурно-функциональная  
схема предлагаемого  
измерителя мощности

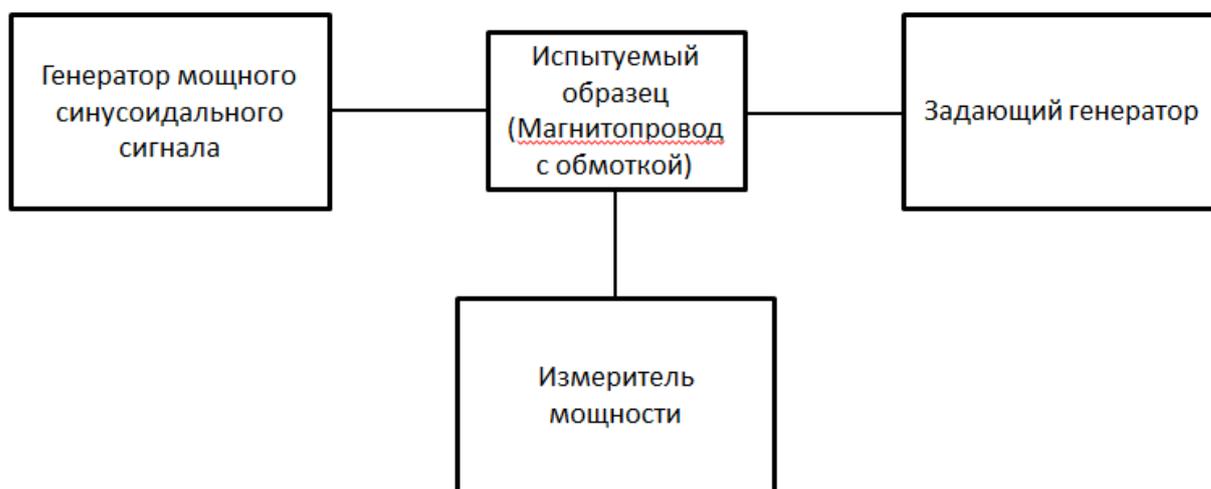


Рисунок 4 - Структурно-функциональная схема предлагаемого измерителя мощности

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 изображает типичную зависимость для потерь в известной марке феррита N87.

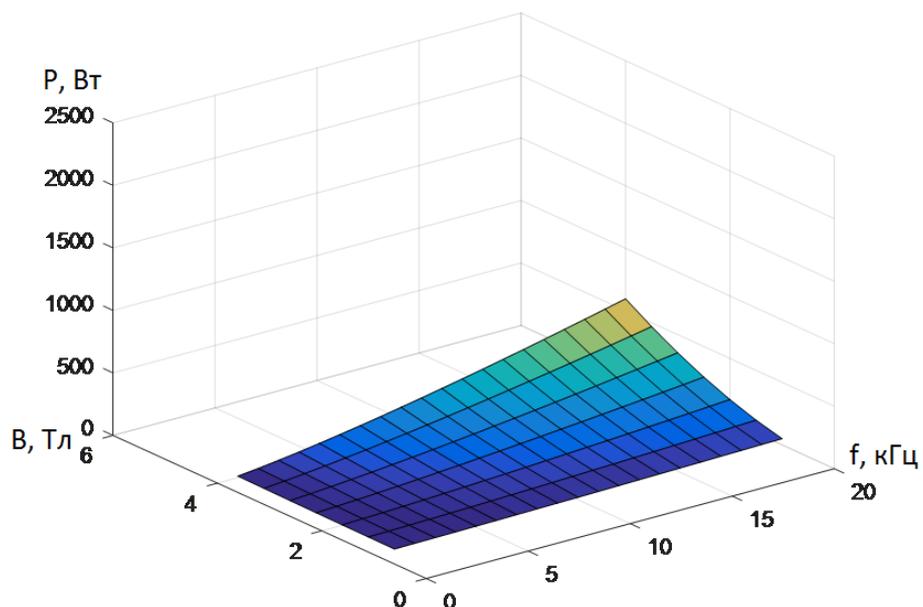


Рисунок 5 - Зависимость потерь феррита N87

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, поэтому в нашей работе представлены еще 2 графика.

На одном из них представлена графическая зависимость для нанокристаллического материала.

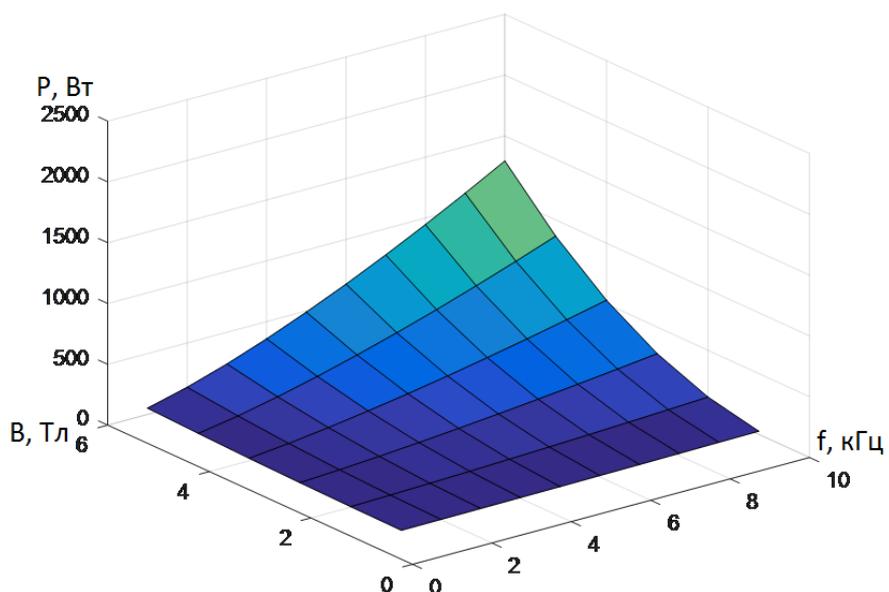


Рисунок 6 – Зависимость потерь нанокристаллического материала

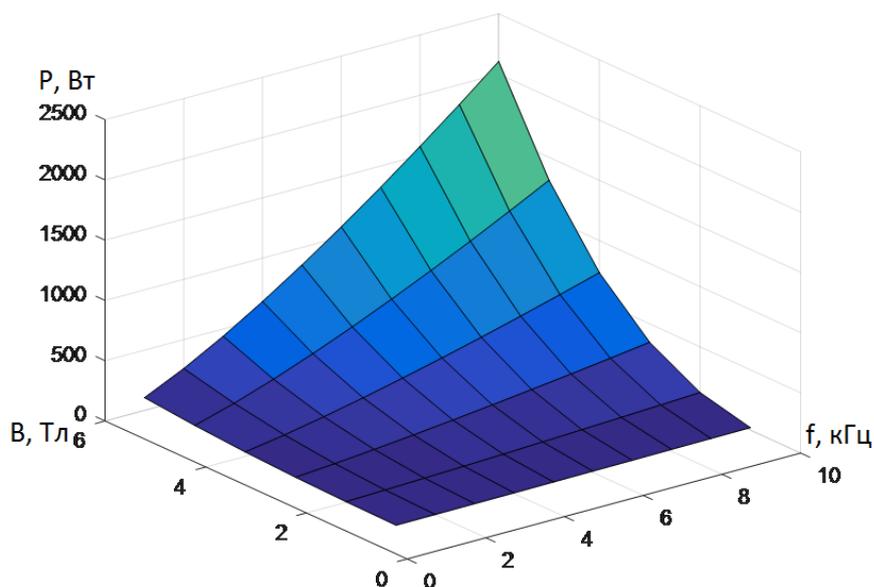


Рисунок 7 - Зависимость потерь карбонильного железа MPS20

Зная, 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

Были рассмотрены методы определения потерь в магнитопроводе. Это калориметрический метод который представляет собой установку (калориметр) генератор мощного синусоидального сигнала и сопутствующие измерительные приборы. Наш образец устанавливается в калориметр и нагревается до определенной температуры затем удаляется и

на его место устанавливается собственный нагреватель и делается попытка нагреть его до той же температуры если температура совпадает то поданная на этот нагревательный элемент мощность и есть мощность потерь. Несмотря на то что этот метод довольно точен недостатком является его длительность. Предложенный нами метод определения потерь более быстро позволяет получить необходимое число потерь в магнитопроводе и он достаточно точен. Установка представляет собой генератор синусоидального сигнала КПД которого близко к 100 процентам источника питания измерителя мощности и испытуемого образца и в данном случае мы мереем мощность передаваемую от источника в генератор. Данный метод уже не один год используется на предприятии ОКЕАНПРИБОР.

Мы определяли экспериментальным путем на данном предприятии мощности потерь, энергии потерь в магнитопроводах следующих классов: первый класс лучшие электротехнические стали. Второй класс аморфные материалы причем аморфные материалы исследовались как французского производства - это стали аморфные материалы imss на самом деле imss - это не аморфные, а нанокристаллические материалы, аналогичные китайские материалы. В России аморфные и нанокристаллические материалы производятся на двух заводах - это Ашинский металлургический комбинат и предприятие Гаммамет, которое расположено в свердловской области на Урале. Материалы обеих фирм оказались при измерении достаточно высокого качества по сравнению с импортными.

Также измерялся энергетический отклик таких материалов как: молибденовый пермаллой, как материалы из порошкового железа, называемого карбонильным железом так называемые Highflux сендасты к сендастам относится современный материал Coolmi. Современные электротехнические стали которые выпускаются в Новгороде на металлургическом комбинате и в некоторых других городах на старых советских заводах оказались весьма и весьма мало пригодными в использовании на повышенных частотах. Уже

на частотах больше 1000гц рост потерь в них настолько велик, что допустить сколь-нибудь заметной индукции на этих частотах невозможно. Например, работа на частоте 5кгц и индукции 0.5тл не возможна, т.к. образец сильно и очень быстро согревается. Тоже самое касается исследования старых образцов 30 и 40 летней давности лучшей электротехнической стали. В этом плане переход на повышенных частотах на аморфные нанокристаллические материалы оказывается выгодным и целесообразным.

Аморфные нанокристаллические материалы практически всех фирм показывают очень хорошие частотные свойства и на частоте 5кгц при индукции 0.5тл сколь-нибудь высокого согрева этих материалов не наблюдается. Потери находятся в пределах единиц ватт на кг магнитопровода и примерно в 10 раз оказывается меньше чем в аналогичных сталях. Заметим, что свойства нанокристаллических и свойства аморфных материалов оказываются несколько иными. Если аморфные материалы допускают на постоянном токе несколько большей индукции и менее склонны к насыщению, то нанокристаллические материалы начиная с некоторой частоты, активно выигрывают у аморфных материалов при заданной индукции.

Далее на повышенных частотах очень интересными результатами обладают современные ферриты при этом были исследованы ферриты: N27, N87, N94, N96. Как говорит разработчик на повышенных частотах, т.е. выше 20кгц, в особенности это заметно при частотах 50-60кгц, потери в ферритах заданных типов заметно снижаются и в современных типах N94 в 2,5 раза оказываются ниже чем в старых ферритах N27 на той же индукции. Однако следует отметить, что при работе на частотах более 100кгц ни один из современных ферритов не дал возможности эффективной работы при индукциях больше 1тл, т.е. потери были значительно больше чем реально в них хотелось бы допускать. Это говорит о том, что до сих пор ниша высокоэффективных материалов при работе в источниках питания на частотах более 100кгц оказывается открытой.

Следующее и последнее, что следует сказать, что во всех материалах относящихся к порошковым материалам неметаллического типа и не являющихся ферритом это перечисленные материалы флюксы, Coolmi, карбонильное железо и т.д. оказывается важным не только то, какая частота и какая индукция, а есть ли перемангничивание материала или нет его. Если материал работает на переменном токе с постоянной составляющей, не имея перемангничивания потери оказываются одни как правило меньше если в стержне наблюдается перемангничивание материала, т.е. ток имеет переменную составляющую превышающую постоянную составляющую, то потери резко возрастают. Вот это то, о чем очень редко говорит производитель и это говорит о том, что данные нашего исследования оказались актуальны.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Проведенные в настоящей работе исследования показали, что современный разработчик электромагнитных компонентов может быть снабжен эффективными методиками их анализа расчета и оптимизации.

Главными выводами дипломной работы стали:

1. Предложена методика эффективного инженерного анализа и расчета мощных широкополосных трансформаторов, предназначенных для передачи сигналов в радиотехнике, гидроакустике и связи.

2. Разработан алгоритм инженерного расчета трансформатора, основанный на экспертной оценке габарита трансформатора, расчете магнитной системы и энергетическом расчете. Главным итогом реализации этого алгоритма является расчет КПД трансформатора и его сравнение с заданным.

3. Была разработана эффективная методика практического анализа потерь в магнитных материалах.

В дипломной работе были достигнута следующая цель:

Исследование и разработка простейшей инженерной методики эффективного расчета основных параметров мощных широкополостных трансформаторов для устройств радиоэлектроники, гидроакустики и связи

В дипломной работе были решены следующие задачи:

Было произведено проектирование трансформаторов для устройств силовой электроники и гидроакустических комплексов.

Была разработана эффективная методика практического анализа потерь в магнитных материалах.

Все поставленные перед дипломной работой задачи были успешно выполнены, что позволяет не только констатировать успех наших исследований, но и открывает пути труднейшей работы.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Мелешин В.И. Транзисторная преобразовательная техника. - М: Изд-во «Техносфера», 2005. – 632с.
2. Бальян Р.Х., Обрусник В.П. Оптимальное проектирование силовых высокочастотных ферромагнитных устройств. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 1987. – 168с.
3. Бальян Р.Х. Трансформаторы для радиоэлектроники. - М: Изд-во «Советское радио», 1971)
4. Бальян Р.Х. Трансформаторы малой мощности. - Л: Государственное союзное издательство судостроительной промышленности, 1961)
5. Александров В.А., Куневич А.В., Никитин К.К., Рыбаков А.И. Оптимизация дросселей узлов с импульсным преобразованием электроэнергии по критерию максимального КПД. Гидроакустика/Hydroacoustics. Вып.19 (1), 2014.
6. Александров В.А., Никитин К.К., Рыбаков А.И. Алгоритмы и методики разработки, расчета и последующего проектирования трансформаторов радиоэлектронной аппаратуры. Гидроакустика / Hydroacoustics. Вып. 20(2).
7. Магнитное поле. Электромагнитная индукция.. Справочные материалы; Айрис-пресс - М., 2013. - 643 с.. Аполлонский С. М., Каляда Т. В., Синдаловский Б. Е. Безопасность жизнедеятельности человека в электромагнитных полях; Политехника - М., 2011. - 264 с.
8. Б. Блейк Левитт Защита от электромагнитных полей; СИНТЕГ - Москва, 2013. - 448 с.
9. Васильев Николай Микроорганизмы в электромагнитном поле; Огни - Москва, 2011. - 112 с.

10. Владимиров С.А. Группы симметрии дифференциальных уравнений и релятивистские поля; [не указано] - М., 2011. - 112 с.
11. Поль Р.В.: Учение об электричестве. - М.: Физматгиз, 1962
12. Гааз А. Введение в теоретическую физику. Механика. Теория электромагнитного поля и света. Термодинамика: моногр. ; Ленанд - М., 2015. - 354 с.
13. Геккер И. Р. Взаимодействие сильных электромагнитных полей с плазмой; Атомиздат - М., 2014. - 312 с.
14. Григорьев В. И., Григорьева Е. В., Ростовский В. С. Бароэлектрический эффект и электромагнитные поля планет и звезд; Мир - Москва, 2014. - 192 с.
15. Тарасюк Ю.Ф. Гидроакустическое телеуправление. (1985)
16. Демирчян, К.С.; Чечурин, В.Л. Машинные расчеты электромагнитных полей; Высшая школа - М., 2015. - 240 с.
17. Новиков Б.К., Руденко О.В., Тимошенко В.И. Нелинейная гидроакустика. (1981)
18. Калашников С.Г.: Электричество. - М.: Наука, 1970
19. Докучаев Денис Воздействие электромагнитного поля на Тиляпию; ИЛ - Москва, 2014. - 550 с.
20. Ивасава К. Локальная теория полей классов; - М., 2015. - 353 с.
21. Красносельский М.А., Перов А.И., Поволоцкий А.И. Векторные поля на плоскости; - М., 2016. - 842 с.
22. Левич В.Г. Курс теоретической физики. В двух томах. Том 1. Теория электромагнитного поля. Теория относительности. Статистическая физика. Электромагнитные процессы в веществе; Книга по Требованию - М., 2012. - 911 с.
23. Лидл Р., Нидеррайтер Г. Конечные поля (том 1, 2); [не указано] - М., 2011. - 548 с.
24. Максвелл Д. Избранные сочинения по теории электромагнитного поля; ЁЁ Медиа - М., 2015. - 823 с.
25. Менский М.Б. Группа путей: измерения, поля, частицы.; [не указано] - М., 2015. - 193 с.

26. Мешков И. Н., Чириков Б. В. Методические указания к курсу "Электромагнитное поле" по теме "Квантовые генераторы электромагнитного излучения"; [не указано] - М., 2012. - 970 с.
27. Леденёв А.Н.: Физика. - М.: Физматлит, 2005
28. Мешков И.Н., Чириков Б.В. Методические указания к курсу "Электромагнитное поле" по теме "Квантовые генераторы, электромагнитные излучения"; [не указано] - М., 2015. - 174 с.
29. Холодов Ю. А. Мозг в электромагнитных полях; Мир - Москва, 2015. - 124 с.
30. Бурдик В.С. Анализ гидроакустических систем. (1988)
31. Клещев А.А. Гидроакустические рассеиватели
32. В.Ю. Ломоносов, К.М. Поливанов, О.П.Михайлов "Электротехника"; Москва; 1990 г.
33. Леденёв А.Н.: Физика. - М.: Физматлит, 2005