



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 гидроакустических систем»

Исполнитель: Фомин Святослав Юрьевич 

Руководитель: доктор технических наук, профессор

Никитин Константин Константинович 

«К защите допускаю»

и.о. заведующего кафедрой: \_\_\_\_\_ 

кандидат географических наук, доцент

Фокичева Анна Алексеевна

«12» 06 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»

Допустить к защите

зав. каф МИС

А. Фокичева

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА**

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

Направление подготовки – 17.03.01 «Корабельное вооружение»

Профиль - «Морские информационные системы и оборудование»

Исполнитель:

Фомин Святослав Юрьевич

Руководитель:

д.т.н. профессор

Никитин Константин Константинович

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
1. Разработка методов оптимизации и расчета широкополосных трансформаторов при различных исходных данных для расчета .....	5
1.1 Индуктивность рассеивания .....	21
1.2 Внешнее поле дросселя трансформатора .....	23
Выводы.....	24
2. Расчет и экспериментальное обследование широкополосных трансформаторов .....	25
Выводы.....	30
3. Анализ магнитных материалов.....	32
Выводы.....	48
Заключение .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
Список использованных источников .....	53

## ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день индуктивные элементы широко используются во всех технических сферах и существует множество книг, которые содержат методики расчетов и интернет программы, которые позволяют рассчитать тот или иной электромагнитный компонент будь то дроссель или трансформатор, и надо сказать, что большинство из этих программ дают довольно точные результаты, но они не учитывают большинство физических процессов из-за чего нередко возникают ошибки. Если говорить о книгах, то ни в одной нет четкой и структурированной методики расчета электромагнитных компонентов. Поэтому требуется создать простой алгоритм расчета электромагнитного компонента, который будет более точен и инженер, приступая к проектированию и взяв наш алгоритм смог создать трансформатор или дроссель, который успешно будет выполнять свои функции. Также анализ потерь в магнитных материалах очень важен так как производитель или производители электромагнитных материалов или поставщики магнитных материалов, интернет данные, и т.д. как правило либо не точно регламентируют данные о потерях в магнитопроводах, либо вообще не регламентируют их, и потребитель должен пользоваться, либо результатом собственного измерения, либо какими то, побочно найденными результатами.

Данная работа является составной частью комплексной выпускной квалификационной работы. Структура данной работы представлена на рисунке 1.

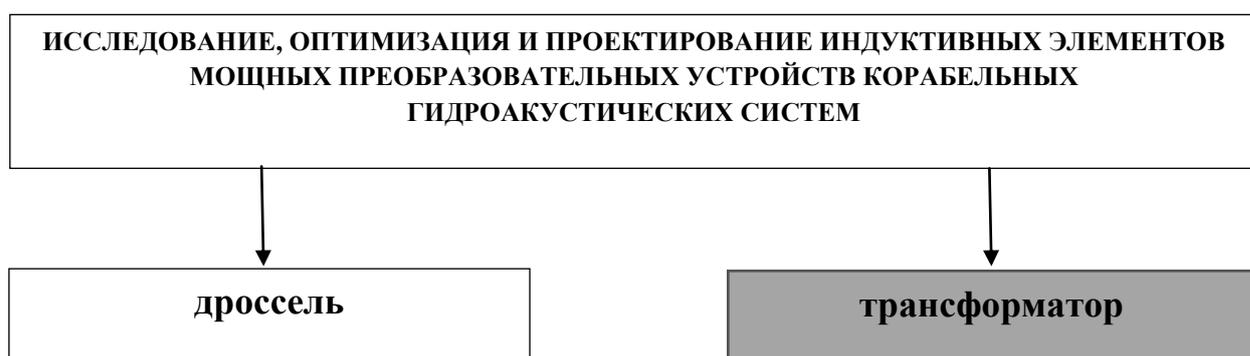


Рисунок 1-Структура комплексной ВКР – (выполнено автором)

Объект исследования - мощные преобразовательные устройства корабельных гидроакустических систем.

Предмет исследования – индуктивные элементы мощных преобразовательных устройств корабельных гидроакустических систем

Цель работы – повышение энергетической эффективности генераторов для гидроакустики.

В работе решены следующие задачи:

- 1.Разработаны методы оптимизации и расчета широкополосных трансформаторов при различных исходных данных для расчета.
- 2.Рассчитаны и экспериментально обследованы широкополосные трансформаторы.
- 3.Проанализированы магнитные материалы.

# 1. РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ОПТИМИЗАЦИИ И РАСЧЕТА ШИРОКОПОЛОСНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ РАСЧЕТА

Начнем с того, что разницы в расчете дросселя и трансформатора нет. Дроссель и трансформатор рассчитывается по одинаковым принципам. И в данном отношении первичная обмотка трансформатора может считаться дросселем. Откуда же возникает эта разница, о которой все говорят? Она возникает от того что основной расчет дросселя происходит при работе дросселя от генератора тока и ток в дросселе считается заданным. Следует обратить внимание что в ряде случаев могут существовать ситуации, когда дроссель работает не от генератора тока, а от генератора напряжения и расчет будет заметно другим. Трансформатор же в 99 процентах случаев является трансформатором напряжения и работает от генератора напряжения, и лишь в 1 проценте случаев является трансформатором тока и работает от генератора тока и вот этим и определяется разница в расчете дросселя и трансформатора. Расчет дросселя основан на том, что и индуктивность дросселя, и индукция внутри магнитного материала дросселя зависят от одних и тех же величин от геометрии дросселя от числа витков от магнитной проницаемости и т.д. В этом случае оказывается, что если дроссель должен быть рассчитан на определенную величину индуктивности определенную величину тока при определенных габаритах и должен достигать определенной индукции в задании вот этих 4 параметров однозначно определяет не один из двух следующих параметров а целую пару параметров а именно магнитную проницаемость  $\mu$  и число витков  $W$ . Таким образом расчет дросселя при заданных габаритах сводится к расчету пары  $\mu$  и  $W$ . Любая другая пара этих параметров может обеспечить только один из заданных требуемых величин либо индуктивность либо индукцию но не оба одновременно. В этом и есть суть

расчета дросселя на заданный параметр при заданных габаритах. Суть расчета трансформатора заключается в том, что, как и в дросселе требуется обеспечить определенную индукцию за счет протекания тока холостого хода, но при этом не стоит задача создания определенной индуктивности первичной обмотки или по крайней мере может не стоять. Т.к. ток холостого хода будет зависеть от этой индуктивности, то получившееся при этом необходимое число витков оказывается не зависимым от магнитной проницаемости. Иными словами, если взять сердечник с большей проницаемостью, то уменьшится ток холостого хода. Соответственно напряженность магнитного поля в сердечнике тоже уменьшится, а индукция останется прежней. Таким образом индукция магнитного поля не зависит от проницаемости магнитного материала. Отметим что это реализуется только в том случае если трансформатор работает от генератора напряжения. Если трансформатор будет работать от генератора тока, то с точностью до буквы все формулы, написанные для дросселя, у нас оказываются справедливыми и для трансформатора. В этом и есть принципиальная разница в расчете. Но разница эта определяется не разницей физических свойств дросселя и трансформатора, а всего лишь условиями их применения.

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 трансформаторы 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 100Вт 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 400Гц, 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 частоты 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 стоить сколько угодно много, если мы обосновываем эту стоимость, то заказчик у нас ее принимает. Другое дело, мы должны обосновывать, почему мы имеем дорогую стоимость. Вот в этих условиях мы и занимаемся проектированием.

Наличие всех этих условий говорит о том, что традиционные безотносительные методы проектирования, 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, то что мы рассчитываем на проектирование трансформаторов и дросселей, квалифицированными, имеющие опыт, сотрудниками. Сотрудники, даже при наличии алгоритма, занимаются не простым перебором факторов в соответствии 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 устройства 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, фракционность процесса, 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

заданных 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 габарита заданными являются: а) мощность трансформатора; б) частотный диапазон; в) ожидаемая индукция в магнитопроводе и сам тип магнитопровода. Помимо этого, рассчитываются такие характеристики, как индуктивность холостого 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 эта магнитная проницаемость может варьироваться 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 потерь 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.

Трансформатор является вторым, более сложным электромагнитным компонентом по отношению к дросселю [3, 6]. Наилучшим определением трансформатора будем считать следующее: Трансформатор – это электромагнитный прибор, электромагнитный компонент, состоящий из двух или более дросселей, объединенных общей магнитной цепью [1]. 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 электромотор, питающийся от первичной цепи, передаточное звено от электромотора 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 оптронные развязки, однако, оптронная 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, 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 магнитопроводетрансформатора 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, налицо возникновение 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 отличии 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 незначительные, 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:  $P_L = a * f^c * B^d$ , 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 технологическими расчетами, с расчетами надежности и с расчетами тепловыделения выходят далеко за рамки настоящей работы [1].

Итак, мы описали основные принципы, заложенные в основу инженерной методики 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).

$$i_{xx} = U / (w \cdot L_{xx}) \quad (1.1)$$

где  $U$  - величина приложенного напряжения,  $f$  - частота,  $L_{xx}$  - 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 ( $U, f$ ):

$$w = U / (f \cdot S \cdot B) \quad (1.2)$$

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:

$$L = \lambda \cdot \mu \quad (1.3)$$

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 ( $L_{xx}$ ). Последнее утверждение позволяет разрабатывать трансформаторы с близкими характеристиками (габариты, мощность, КПД), однако отличающимися величинами индуктивности  $L_{xx}$  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

$\xi = S_{mn} \cdot S_{окна}$ , 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.

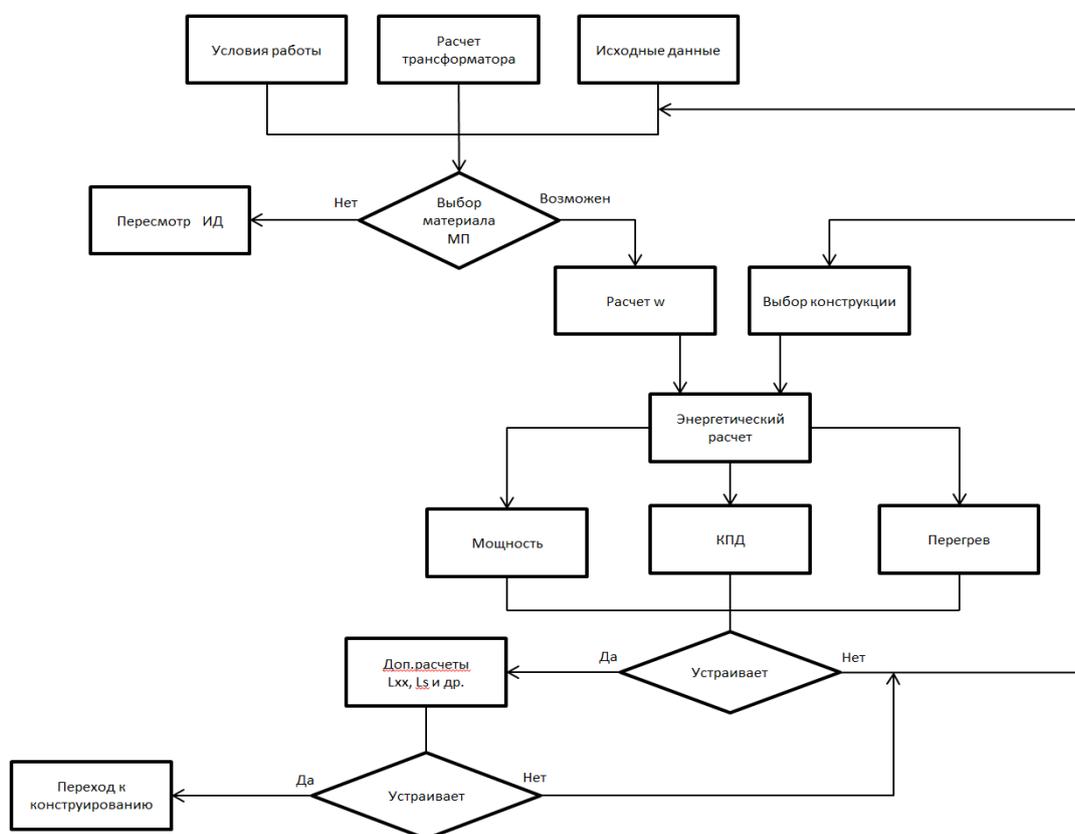
Так как мощность потерь определяется потерями не только в обмотках, но и потерями в магнитопроводе, вызванными наличием поля холостого хода, не существует простой однозначной зависимости КПД от габаритов и геометрии трансформатора. В этих условиях проектирование

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 [1, 4] и другие.

На основе наших результатов предлагается данный алгоритм расчета трансформатора:



## Рисунок2-Алгоритм расчета трансформатора(выполнено автором)

Опишем данный алгоритм: Первое что у нас имеется это исходные данные. Они включают следующие величины:  $U, f, S, B$ . Далее нужно выбрать материал магнитопровода это может быть феррит, порошково-молибденовый пермаллой, порошковое железо Highfluxсендасты (Coolmu). Далее нужно выбрать конструкцию трансформатора, например, (кольцо П-образный) и рассчитать число витков первичной обмотки. Затем идет энергетический расчет нужно найти потери по раннее данным формулам и КПД. Перегрев в данной работе не рассчитывается. После того, как мы рассчитали КПД и потери мы можем рассчитать  $L_{xx}$  и  $L_s$ . Индуктивность рассеивания в данной работе описывается небольшим разделом ниже. Далее, если нас все устраивает мы приступаем к проектированию.

### 1.1 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, это 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.

## 1.2 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 рассеяния трансформатора отсутствовала, компенсация полей создаваемых рабочими токами первичной и вторичной обмоток, была бы полной и вкладывала 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

Разработан алгоритм расчета, который включает в себя следующее: Первое что у нас имеется это исходные данные. Они включают следующие величины:  $U_{вх}$ ,  $f$ ,  $S$ ,  $B$ . Далее нужно выбрать материал магнитопровода это может быть феррит, порошково-молибденовый пермаллой, порошковое железо Highfluxсендасты - (Coolmu). Далее нужно выбрать конструкцию трансформатора, например, (кольцо П-образный) и рассчитать число витков первичной обмотки. Затем идет энергетический расчет нужно найти потери по раннее данным формулам и КПД. Перегрев в данной работе не рассчитывается. После того, как мы рассчитали КПД и потери мы можем рассчитать  $L_{xx}$  и  $L_s$ . Индуктивность рассеивания в данной работе описывается небольшим разделом ниже. Далее, если нас все устраивает мы приступаем к проектированию.

## 2.РАСЧЕТ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБСЛЕДОВАНИЕ ШИРОКОПОЛОСНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Трансформаторы, так-же как и дроссели могут работать во многих режимах. Исторически сложилось так что дроссели работают в цепи тока протекающего через дроссель  $I_{др}$  и этот ток задан внешним устройством. Другими словами, не дроссель определяет этот ток. Трансформатор работает в цепи поданного напряжения  $U_{вх}$  и это напряжение определяется не трансформатором, а внешним устройством. В этом существует некоторая разница. С точки зрения контактов  $AA'$  рисунок 3и  $BB'$  рисунок 4видно, что они оба являются дросселями.

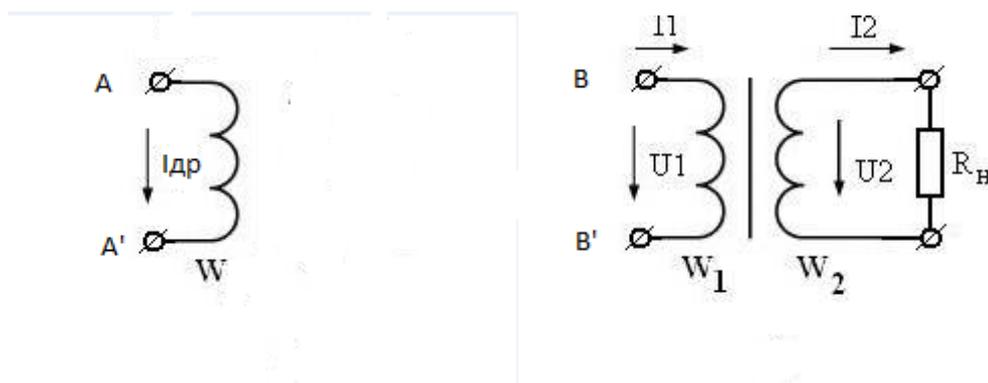


Рисунок 3-дроссель Рисунок 4-трансформатор

Следовательно, расчет трансформатора может быть начат с расчета дросселя  $BB'$  с той лишь разницей что ток через этот дроссель есть не  $I_{др}$  как в дросселе  $AA'$ , а есть:

$$I_{xx} = U_{вх} / \omega * L_{xx} \quad (2.1)$$

Таким образом если ток задан, то никакой разницы в расчете дросселей  $AA'$  и  $BB'$  не будет. Единственное что при расчете дросселя трансформатора есть связь между индуктивностью и индукцией так как чем больше индуктивность, тем больше сопротивление чем больше сопротивление, тем меньше ток чем меньше ток, тем меньше индукция. А в

дросселе все наоборот: чем больше ток, тем больше индукция, чем больше индуктивность, тем больше индукция. Далее в трансформаторе ближайшее рассмотрение показывает, что индукция вообще не зависит от индуктивности. Если посмотреть все формулы для дросселя, то отчетливо можно заметить, что индукция пропорциональна индуктивности, а трансформаторе индукция не пропорциональна индуктивности. Почему так происходит? Потому что вместе с этой индуктивностью растет сопротивление и падает ток только потому, что в трансформаторе первичная обмотка включена не в цепь протекающего постоянного тока а в цепь тока убывающего с ростом индуктивности. Следует заметить, что в данном случае речь идет о режиме холостого хода, рабочий режим в данном случае не рассматривается. Данный режим никак не сказывается на расчете трансформатора. Потому что в рабочем режиме магнитные поля, создаваемые первичной и вторичной обмоткой одинаковы и противоположны по знаку и вообще никак не вмешиваются в магнитные поля дросселей. Т е в каком бы режиме не находился трансформатор в режиме холостого хода, в рабочем режиме внутри сердечника существует только поле холостого хода и никакого другого поля в нем нет. Если в формулу для индукции:

$$B = \frac{L \cdot I}{W \cdot S \cdot c} \quad (2.2)$$

подставить формулу для тока холостого хода то можно получить значение для числа витков у дросселя:

$$W = \frac{U_{BX}}{2\pi \cdot f \cdot S \cdot B} \quad (2.3)$$

где  $f$ - частота,  $S$ - площадь сечения замкнутого магнитопровода,  $B$ –принятая индукция. Исходя из этого имея какой-либо сердечник можно получить число витков. Пусть требуется рассчитать трансформатор со следующими входными данными:

$U_{вх}=300В$ ,  $f=1кГц$ ,  $S=4см^2$ ,  $B=0.4Тл$ . Рассчитаем число витков по формуле

$$(2.3) \quad W = \frac{2 \cdot 10^2}{6 \cdot 10^3 \cdot 4 \cdot 10^{-4} \cdot 4 \cdot 10^{-1}} = 300 \text{ (витков)}. \quad \text{Мы получили число витков,}$$

которые мы должны намотать на первичную обмотку. Определение числа витков есть первый этап расчета трансформатора. Любой расчет начинается с каких-либо исходных данных. В нашем случае исходными данными для расчета трансформатора является заданный габарит. Габарит приводит к тому что мы должны выбрать конфигурацию сердечника чтобы впоследствии вписаться в заданный габарит. В последствии заданный габарит ABC дает нам выбор сердечника, который обрстет обмотками и впишется в этот габарит. Когда мы выбираем сердечник мы выбираем площадь и длину средней линии. Совершенно очевидно, что если число витков первичной обмотки задано, число витков вторичной обмотки известно из коэффициента трансформации, легко показать, что площадь занимаемая первичной обмоткой и площадь занимаемая вторичной обмоткой в окне трансформатора одинаковы рисунок 3. Если во вторичной обмотке мало витков, то можно взять более толстый провод. С учетом того что мы знаем длину витка и число витков первичной и вторичной обмотки то мы можем найти сопротивления этих обмоток:

$$R = l_{ср. в.} \cdot W \cdot \rho \cdot 10^{-6} \quad (2.4)$$

где  $l_{ср. в.}$ -средняя длина одного витка,  $\rho$ -удельное сопротивление провода,  $W$ -число витков обмотки.

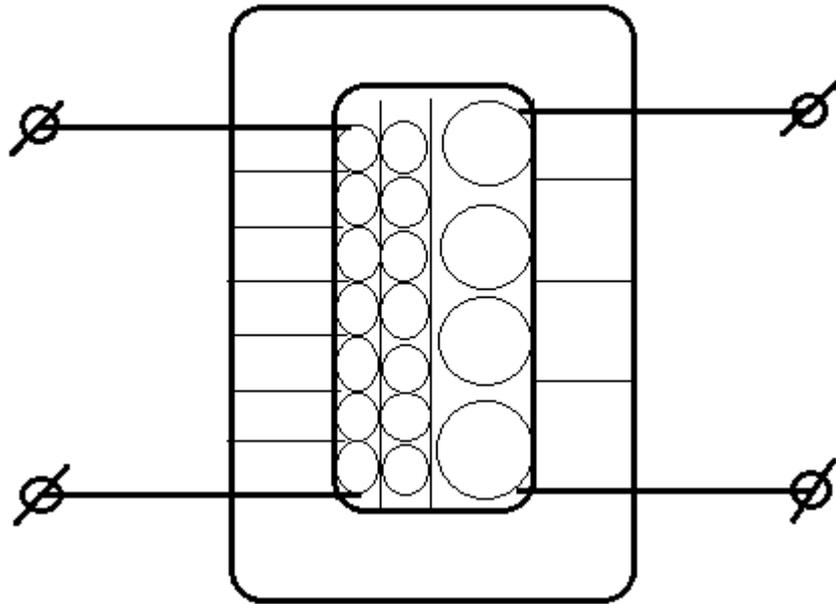


Рисунок 5(трансформатор в разрезе)

Габарит выбор сердечника определение числа витков знание площади окна и знание сопротивлении первичной и вторичной обмотки есть первый этап расчета. Далее режим холостого хода окончен начинается рабочий режим. Известно, что ток первичной обмотки, например равен 10 А. Потери в первичной обмотке рассчитываются по формуле:

$$P = I^2 * R \quad (2.5)$$

$P = 100 * 0,2 = 20 \text{Вт}$ . Если было выбрано правильное соотношение проводов то выяснится что потери во вторичной обмотке также будут 20Вт. Суммарные потери 40Вт. Далее нужно рассчитать потери в магнитопроводе по формуле:

$$P = P_0 * f^\alpha * B^\beta \quad (2.6)$$

где  $\alpha, \beta, P_0$  известны из таблицы. Эти потери равны, также 20вт, тогда суммарные потери 60вт. Рассчитаем сколько у нас всего мощности по формуле:

$$P = U * I \quad (2.7)$$

$P=300\text{В} \cdot 10\text{А} = 3\text{кВт}$ . Имея данные значения можно рассчитать КПД по формуле:

$$\text{КПД} = \frac{P_{\text{полезная}}}{P_{\text{затраченная}}} * 100\% \quad (2.8)$$

отсюда  $\text{КПД} = \frac{3}{3+0.6} * 100 = 98\%$  процентов. Также следует добавить, что число витков рассчитывается исходя из выбранной индукции. Индукция выбирается из 2 параметров 1 индукция должна быть меньше чем индукция насыщения. Индукция насыщения - это максимальная индукция, которую может терпеть данный сердечник. Но, как правило, когда мы рассчитываем высокочастотный трансформаторы там о насыщении речи не идет. У нас к примеру индукция насыщения 0,8Тл, а мы выбираем 0,4Тл и уже при этом значении мы можем получить 20 Вт потерь в сердечнике. Это уже большое значение. А если взять 0,8Тл, то можно получить не 20Вт потерь в сердечнике, а допустим 150Вт потерь. Но нам жалко этих 150Вт т. к. у нас всего 40Вт потерь в проводах и поэтому мы уменьшаем потери в сердечнике. Но заметим, т. к. в формуле (2.3) для числа витков индукция стоит в знаменателе, как только мы уменьшаем индукцию мы вынуждены мотать больше витков. В данных расчетах нет такого что все параметры становятся лучше. Например, если мы улучшаем один параметр ухудшается другой. Поэтому речь идет о компромиссном решении. И данное решение достигается тогда, когда потери в первичной обмотке и во вторичной обмотке в сердечнике близки по значению и в данном случае трансформатор становится близок к оптимальному, т. к. потери во всех его частях почти одинаковы. Несколько по-другому получается, когда у нас имеется трансформатор питания на частоте 50Гц. В данном случае выходит так что даже если мы возьмем индукцию близкую к индукции насыщения если присутствует высококачественная сталь, то индукция насыщения будет примерно 2Тл, а это достаточно большая индукция. Поэтому мы

берем индукцию в сердечнике 1Тл чтобы не при каких обстоятельствах сердечник у нас не насытился, если насытится сердечник, то выбьются предохранители. При данной большой индукции в 1Тл выясняется, что в сердечнике потерь на 50Гц нет в соответствии с формулой. В сетевых трансформаторах, работающих на частоте в 50Гц почти все потери сосредоточены в проводе но как только мы начинаем повышать частоту трансформатора нужно понимать что в какой-то момент появятся потери и в магнитопроводе и их придется учитывать. А на очень высоких частотах, например, если у нас трансформатор рассчитан на диапазон работы начинающийся с высоких частот например от 200КГц то выяснится что в проводе вообще не будет потерь а все потери сосредоточены в магнитопроводе. Иногда может получиться так что мы рассчитываем число витков трансформатора частота у нас очень высокая и получается значение в пол витка. Что в данном случае делать. Можно намотать один виток. Но этого нельзя сделать из-за коэффициента трансформации. Поэтому как правило высокочастотные трансформаторы имеют число витков не поддающиеся формуле (2.3). Но за счет этого уменьшается индукция. Т. к. мы выбираем большее число витков и за счет этого индукция становится меньше. Трансформатор, который питается от источника напряжения он со стороны вторичных разъемов является источником напряжения. Нельзя сказать, что трансформатор понижает напряжение и увеличивает ток. Трансформатор не увеличивает ток. Ток при заданном генераторе напряжения определяется подсоединенным сопротивлением. Если напряжение вторичной обмотки определяется напряжением первичной обмотки и коэффициентом трансформации, то в отношении тока наоборот ток первичной обмотки определяется током вторичной обмотки и коэффициентом трансформации.

## Выводы

В соответствии с предложенным алгоритмом был выполнен расчет трансформатора. Данный расчет включает в себя:

Исходные данные:  $U_{\text{вх}}=300\text{В}$ ,  $U_{\text{вых}}=20\text{В}$ ,  $P_{\text{тр}}=3\text{кВт}$ ,  $f = 1\text{кГц}$ ,  $S=4\text{см}^2$ ,

$B=0,4\text{Тл}$ , материал магнитопровода–нанокристаллический, конфигурация трансформатора – 2-ой сердечник , характер намотки – лента.

Результаты расчета:  $w_1 = \frac{U}{\omega \cdot f \cdot S \cdot B} = 300\text{В}$ ;  $w_2=20\text{В}$ ;  $P_{\text{об1}}=I^2 \cdot R=20\text{Вт}$ ;

$P_{\text{об2}}=I^2 \cdot R = 20\text{Вт}$ ;  $P_{\text{мп}} = P_0 \cdot f^\alpha \cdot B^\beta = 20\text{Вт}$ ;  $P_{\text{п}} = (P_{\text{мп}} + P_{\text{об}})=60\text{Вт}$ ;

$\eta = \frac{P_{\text{тр}}-P_{\text{п}}}{P_{\text{тр}}}=98\%$ ;

Полученные результаты могут быть использованы для проектирования мощных трансформаторов корабельных гидроакустических систем.

### 3. АНАЛИЗ МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Вопрос потерь в электромагнитных материалах особенно важным становится именно применительно к нашей тематике диплома, потому что, мы разрабатываем аппаратуру мощную, т.е. способствующую потерям, аппаратуру энергетически эффективную, т. е. ту, которая чувствительна к этим потерям и требует чтобы эти потери были малы и аппаратуру широкополосную, что предполагает работу на повышенных частотах и опять может привести к повышенным потерям, т.е. исследование потерь в магнитных материалах сверх актуальна для нашей тематики. Традиционно исследование потерь в магнитных материалах ведется калориметрическим способом. Надо сказать, что сейчас в России мало кто этим занимается и даже производители материалов пользуются данными по потерям у фирм аналогов зарубежных. Как там измеряются потери нам не известно. Калориметрический метод, не будем раскрывать подробно, его суть заключается в том, что вся энергия выделяющаяся в магнитопроводе, она может быть измерена т.к. превращается в тепло, а методы измерения тепла в особенности компенсационные хорошо разработаны, т.е. традиционно выглядит это так: запускается процесс согрева путем протекания через него переменного тока, магнитопровод греется, 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 выделяющуюся в образце. Надо сказать, что этот способ требует очень хорошего опыта иначе оказывается весьма и весьма итерационным, т.е. не удается подобрать необходимую мощность

нагревателя в любом случае способ трудоемкий и длительный. Ответ на вопрос можно ли просто померить ваттметром мощность, потребляемую образцом и выделяющуюся в магнитопроводе оказывается отрицательным. Дело в том, что все современные ваттметры, далее будет дано некоторое пояснение, очень плохо измеряют активную мощность на фоне большой протекающей реактивной мощности, а ведь мощность, поданная на образец, на индуктивность, является на 99 процентов реактивной и выудить из этого маленькую активную составляющую оказывается очень и очень проблематично. Поэтому непосредственное измерение мощности, выделяемой на образце с помощью электрического ваттметра практически нереально. Несколько лучшими характеристиками обладают ваттметры статического типа, но и они имеют в данном случае некоторую ошибку и эти ваттметры в настоящее время практически отсутствуют по России. Поэтому в бакалаврской работе рассматривается, но мы не хотим сказать что он предложен, он предложен до нас, но мы его подробно рассмотрели и исследовали. Метод определения потерь в магнитопроводе основанный на том, что энергия в магнитопроводе поступает от особого источника синусоидального либо прямоугольного сигнала, который выполнен с импульсным преобразованием и имеет очень высокий КПД. В идеале можно считать, что КПД этого источника в районе 100 процентов, тогда мощность, которая поступает на образец активная будет в точности равна мощности потребления от источника питания этим генератором, т. е. допустим на образец поступает 1000вт мощности из них грубо говоря 990вт реактивной мощности и 10 ватт активной мощности. При этом генератор не чувствует в силу своих электрических свойств и ключевого режима работы с импульсным преобразованием 990вт реактивной мощности, они просто циркулируют в его узлах, которые имеют малые потери. А вот 10вт мощности он передает и потребляет эти 10вт от источника питания. Конечно это достаточно жесткий случай, т. е. в таком случае и КПД будет несколько меньше, когда такая огромная дистанция

между активной и реактивной мощностью, но в большинстве случаев этот метод дает очень хорошие достаточно точные результаты и может быть рекомендован к использованию таким образом вместо того, чтобы измерять активную мощность поступающую непосредственно на образец, мы измеряем активную мощность передаваемую от источника питания на постоянном токе в генератор а это можно сделать с точностью до долей процента. Мощность на постоянном токе измеряется очень и очень легко. Вот таким образом был предложен и проверен и реализован метод исследования потерь в магнитопроводах. Результаты обследования важны не только потому что мы пишем бакалаврскую работу, т. е. интерес, но и имеет большую актуальность потому что производитель или производители электромагнитных материалов или поставщики магнитных материалов, интернет данные, и т.д. как правило либо не точно регламентируют данные о потерях в магнитопроводах, либо вообще не регламентируют их, и потребитель должен пользоваться, либо результатом собственного измерения, либо какими то, побочно найденными результатами. Далее следует сказать, что поставщик должен давать информацию о магнитных материалах в виде трех цифр в паспорте магнитного материала. Первая цифра удельная мощность потерь при определенных условиях. Например, для магнитного материала он должен сказать, что на частоте в 1кГц и при индукции в 1тл потери составляют к примеру - 250вт на 1 кг магнитного материала. Также он должен дать коэффициенты  $\alpha$  и  $\beta$ . Анализ магнитных материалов как раз и заключается в определении коэффициентов  $P_0, \alpha$  и  $\beta$ . Тогда разработчик может ничего не мерить. Но часто оказывается, что потери в магнитном материале либо не даны, либо магнитный материал используется в других условиях. Например, поставщик магнитного материала дает информацию о потерях на перемагничивающем синусоидальном токе. А у нас эксплуатация идет на однополярном треугольном токе в виде импульсов, идущих с определенной скважностью. Поэтому умение измерить потери в

определенных условиях оно очень важно. Далее можно описать компоненты установки для измерения потерь. Установка у нас состоит из генератора синусоидального сигнала или генератор сигнала специальной формы измеритель мощности и далее сам образец магнитопровод и намотанная на него измерительная обмотка. Но данный пример не подходит для измерения потерь в магнитопроводе потому что подавляющее большинство ваттметров не измеряет активную мощность потерь на фоне большой циркулирующей мощности. Если мы наматываем обмотку на магнитопровод то получаем дроссель через который идет большая реактивная мощность. И померить, например - 5ватт мощности активных потерь, на фоне 5кватт реактивной циркулирующей мощности практически не один из измерителей не может. Поэтому поступило такое предложение мерить не мощность импульсов и не мощность высокочастотного синусоидального сигнала, а мерить ту мощность, которую потребляет генератор этого сигнала считая, что КПД этого генератора очень большой. В этом случае мощность, которую потребляет генератор и мощность, которую он отдает совпадают, а мощность, которую он отдает это и есть мощность потерь в магнитном материале. Мощность потребления генератора измеряется очень просто - это мощность на постоянном токе поэтому никаких проблем здесь не возникает. Но точность этого метода получается не очень высокая, средняя, но если ввести все поправочные коэффициенты, то она получается в любом случае гораздо выше чем если мерить какими-либо другими методами. Единственным адекватным другим методом является калориметрический метод. В этом случае мощность, которая выделяется в магнитопроводе она безвозвратно уходит в тепло и эту теплоту надо померить. У нас нет такого прибора, который измеряет тепло поэтому тепло в данном случае измеряется методом замещения. Мы допустим снимаем кривую нагрева какого-либо объекта с помощью этого эксперимента затем мы эксперимент прекращаем охлаждаем все приводим все в нормальное равновесное состояние и путем подбора известных

выделении мощности мы создаем условия, когда мощность, выделяемая известным образом, является той же и тогда определяем эту мощность методом прямого расчета. Возьмем прямой калориметрический метод он очень сложен дорогостоящий и измерения, которые можно сделать предложенным методом за 10 минут там могут занять несколько дней. Поэтому метод, который мы предложили он очень хороший. Общей зависимостью удельных потерь в магнитном материале является, простейшая зависимость, приведенная ниже. Мощность удельных потерь-  $P_{\Pi} = P_0 f^{\alpha} B^{\beta}$ , 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 неоднократно используется при разработке трансформаторов. Далее можно сказать, 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 отсутствии 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. 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 как упоминалось ранее. 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 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 MPP20, MPP14, 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 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 «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. Далее 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, 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 о которых говорилось ранее. 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 6 – калориметрический способ определения потерь

Напомним, что величина потерь в магнитопроводе определяется следующей формулой:  $P_{\text{п}} = P_0 f^\alpha B^\beta$ , 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.



Рисунок 7– предлагаемый нами метод измерения потерь

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, холоднокатаной стали или у аморфного 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.

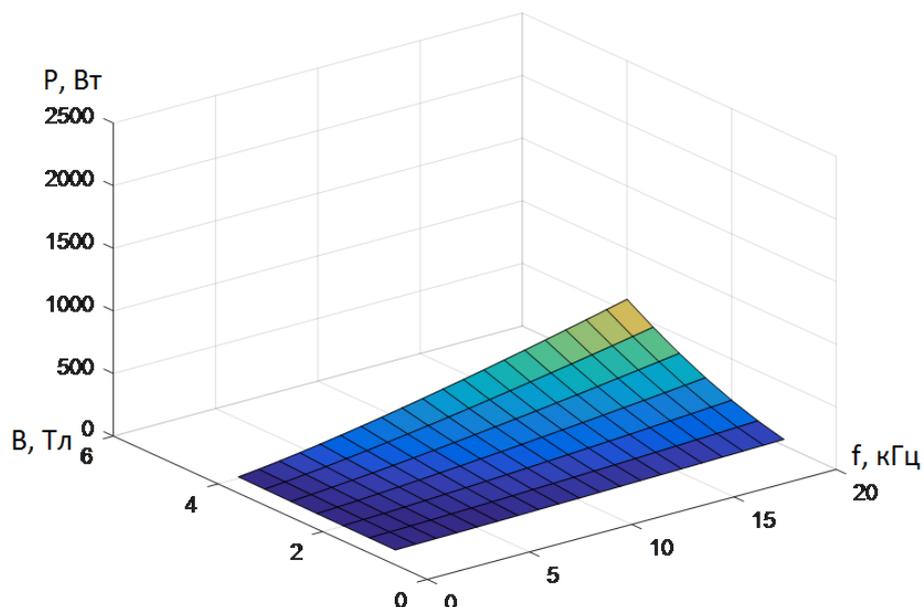


Рисунок 8— зависимость для потерь в феррите N87

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.

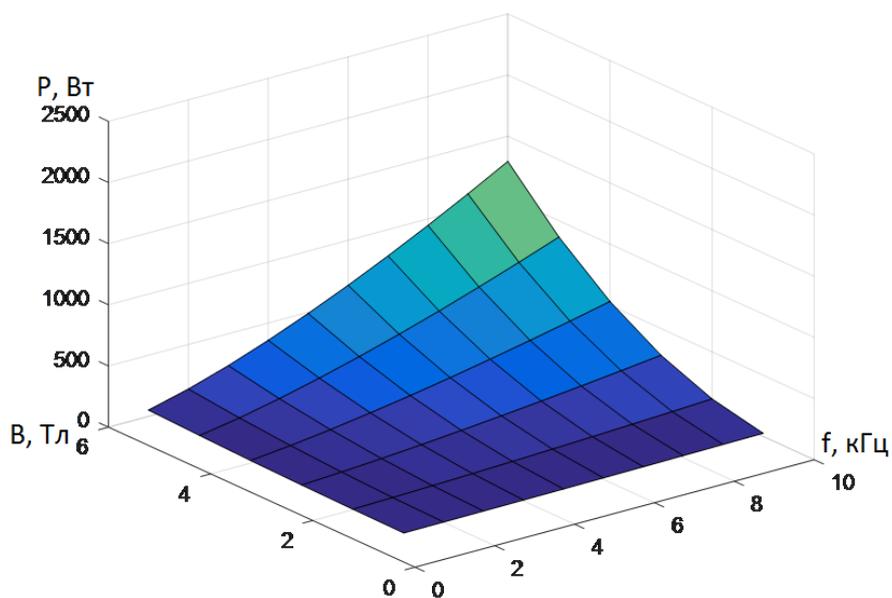


Рисунок 9- зависимость для потерь в нанокристаллическом материале

На втором графике представлена зависимость для типичного порошкового материала, карбонильного железа MPS20.

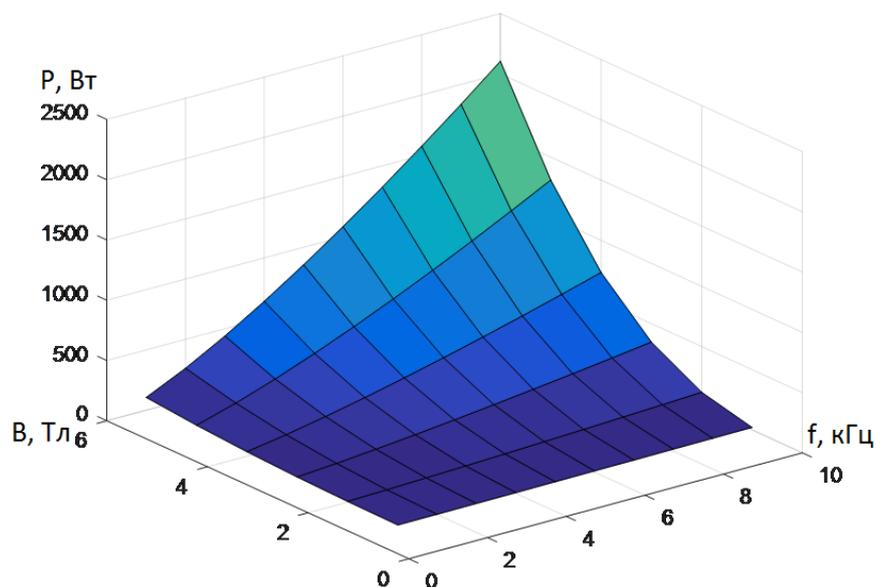


Рисунок 10- зависимость для потерь в карбонильном железе MPS20

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

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 Highfluxсендасты 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 малоприспособленными 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 нагревается. 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 нагрева 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. Например, в нанокристаллическом материале 5бдсм потери на 20 кгц и индукции 0.2тл в 2,5 раза ниже чем в аналогичном аморфном материале того же производителя Ашинского металлургического комбината.

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 переманчивание материала или нет его. Если материал работает на переменном токе с постоянной составляющей, не имея переманчивания потери оказываются одни как правило меньше если в стержне наблюдается переманчивание 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

Целью работы являлось повышение энергетической индуктивности генераторов для гидроакустики.

В процессе достижения цели получены следующие результаты:

1. Разработаны методы оптимизации и расчета широкополосных трансформаторов при различных исходных данных для расчета.

Разработан алгоритм расчета, который включает в себя следующее: Первое что у нас имеется это исходные данные. Они включают следующие величины:  $U_{вх}$ ,  $f$ ,  $S$ ,  $B$ . Далее нужно выбрать материал магнитопровода это может быть феррит, порошково-молибденовый пермаллой, порошковое железо Highfluxсендасты (Coolmu). Далее нужно выбрать конструкцию трансформатора, например, (кольцо П-образный) и рассчитать число витков первичной обмотки. Затем идет энергетический расчет нужно найти потери по раннее данным формулам и КПД. Перегрев в данной работе не рассчитывается. После того, как мы рассчитали КПД и потери мы можем рассчитать  $L_{xx}$  и  $L_s$ . Индуктивность рассеивания в данной работе описывается небольшим разделом ниже. Далее, если нас все устраивает мы приступаем к проектированию.

2. Рассчитан и экспериментально обследован широкополосный трансформатор используя разработанный алгоритм проведены расчеты широкополосного трансформатора.

В соответствии с предложенным алгоритмом был выполнен расчет трансформатора. Данный расчет включает в себя:

Исходные данные:  $U_{вх}=300В$ ,  $U_{вых}=20В$ ,  $P_{тр}=3кВт$ ,  $f = 1кГц$ ,  $S=4см^2$ ,

$B=0,4Тл$ , материал магнитопровода–нанокристаллический, конфигурация трансформатора – 2-ой сердечник, характер намотки – лента.

Результаты расчета:  $w_1 = \frac{U}{\omega \cdot f \cdot S \cdot B} = 300В$ ;  $w_2=20В$ ;  $P_{об1}=I^2 \cdot R=20Вт$ ;

$P_{об2}=I^2 \cdot R = 20Вт$ ;  $P_{мп} = P_0 \cdot f^\alpha \cdot B^\beta = 20Вт$ ;  $P_{п} = (P_{мп} + P_{об})=60Вт$ ;

$$\eta = \frac{P_{\text{тр}} - P_{\text{п}}}{P_{\text{тр}}} = 98\%;$$

Полученные результаты могут быть использованы для проектирования мощных трансформаторов корабельных гидроакустических систем.

### 3. Проанализированы магнитные материалы

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 Highfluxсендасты. К сендастам относится современный материал Coolmu.

Современные электротехнические стали которые выпускаются в Новгороде на металлургическом комбинате и в некоторых других городах на старых советских заводах оказались весьма и весьма малопригодными 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 и 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. Например, в нанокристаллическом материале 5бдсм потери на 20 кгц и индукции 0.2тл в 2,5 раза ниже чем в аналогичном аморфном материале того же производителя Ашинского металлургического комбината.

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 переманчивание материала или нет его. Если материал работает на переменном токе с постоянной составляющей, не имея переманчивания потери оказываются одни как правило меньше если в стержне наблюдается переманчивание 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.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ 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. Тихомиров, П.Н. Расчет трансформаторов: Учебное пособие для вузов / П.Н. Тихомиров. - М.: Альянс, 2013. - 528 с.
8. Стародубцев, Ю.Н. Теория и расчет трансформаторов малой мощности / Ю.Н. Стародубцев. - М.: Радио и связь, 2012. - 320 с
9. Котенёв, С.В. Расчет и оптимизация тороидальных трансформаторов. / С.В. Котенёв, А.Н. Евсеев. - М.: ГЛТ , 2011. - 287 с.

10. Котенёв, С.В. Расчет и оптимизация тороидальных трансформаторов и дросселей. / С.В. Котенёв, А.Н. Евсеев. - М.: РиС, 2013. - 360 с.
11. Белопольский, И.И. Расчет трансформаторов и дросселей малой мощности: Учебное пособие / И.И. Белопольский, Е.И. Аретникова, Л.Г. Икалова. - М.: Альянс, 2013. - 400 с.
12. В.А.Говорков. Электрические и магнитные поля. Москва: Государственное издательство литературы по вопросам связи и радио, 1951 год
13. Н.И.Булгаков. Расчёт трансформаторов. Москва-Ленинград: Государственное энергетическое издательство, 1950 год.
14. Атабеков Г.И. Основы теории цепей 1968 год, -434с.
15. Афанасьев В.В., Адоньев Н.М., Жалалис Л.В., Сирота И.М., Стогний Б.С. — Л.: Энергия, 1980. — 334 с.
16. Вдовин С. С. Проектирование импульсных трансформаторов. - 2-е изд., перераб. и доп. — Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1991. — 208 с
17. Малинин Р.М. Выходные трансформаторы. Л., Госэнергоиздат, 1963 32 стр. с илл. (Массовая радиобиблиотека Вып 471).
18. А.Кузнецов. Трансформаторы и дроссели для ИИП издательство схемотехника 2002,-33с.
- 19.Матханов П. Н., Гоголицын Л. З. Расчет импульсных трансформаторов.— Л.: Энергия. Ленингр. отд-ние, 1980. — 112 с
20. Подъяпольский А.Н. - Как намотать трансформатор Москва - Ленинград, 1953 год. Госэнергоиздат.1953. 24с
21. Холуянов Ф.И. Трансформаторы однофазного и трехфазного тока. Л., ОНТИ, Энергоиздат. 1953. 24с

22. А. В. Хныков. Теория и расчет трансформаторов источников вторичного электропитания. - Москва: СОЛОН-Пресс, 2004.-125с
23. Куневич А.В. - Трансформаторы для бытовой и офисной аппаратуры. изд Горячая Линия – Телеком 2004 -139с
24. Закс М. И. и др. Трансформаторы для электродуговой сварки /М. И. Закс, Б. А. Каганский, А. А. Печенин. — Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1988. — 136 с: ил.
25. Жучков В. Расчёт трансформатора импульсного блока питания. – Радио, 1987, №11, с. 43.
26. Источники электропитания радиоэлектронной аппаратуры: Справочник / Г. С. Найвельт, К. Б. Мазель, Ч. И. Хусаинов и др.; под редакцией Г. С. Найвельта. – М.: Радио и связь, 1986. – 576 с.
27. Косенко С. Расчёт импульсного трансформатора двухтактного преобразователя. – Радио, 2005, №4, с. 35 – 37, 44.
28. Коретникова Е. И., Рычина Т. А., Ермаков А. И., Трансформаторы питания и дроссели фильтров для радиоэлектронной аппаратуры – М. Советское радио 1973 -180с.
29. Норденберг Г. М., Трансформаторы для радиоэлектронной аппаратуры Л. Энергия 1970 -240с.
30. Сидоров И. Н., Мукосеев В. В., Христинин А. А. Малогабаритные трансформаторы и дроссели. Справочник – М. Радио и связь 1985, -416с.