

На правах рукописи



ИЛЮШОВ НИКОЛАЙ ЯКОВЛЕВИЧ

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСТОТОЗАВИСИМОГО
УСТРОЙСТВА ДЛЯ ПОДАВЛЕНИЯ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ
ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ**

Специальность 05.14.12 – Техника высоких напряжений

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Новосибирск – 2014

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Новосибирский государственный технический университет»

Научный руководитель: **Коробейников Сергей Миронович**
доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Халилов Фирудин Халилович,**
доктор технических наук, профессор,
Национальный исследовательский Санкт-Петербургский политехнический университет, профессор кафедры «Электротехники и техники высоких напряжений»

Зубков Александр Сергеевич,
кандидат технических наук, ЗАО «Феникс-88»,
ведущий инженер

Ведущая организация: Национальный исследовательский Томский политехнический университет

Защита состоится 25 декабря 2014 г. в 10⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.173.01 при Новосибирском государственном техническом университете по адресу: 630073, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета и на сайте http://www.nstu.ru/science/dissertation_sov/dissertations/view?id=1661.

Автореферат разослан « » ноября 2014 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



А.Г. Русина

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Высокочастотные перенапряжения, воздействующие на изоляцию оборудования подстанций, являются следствием ударов молнии в линию, либо коммутации выключателей и разъединителей. Частотный диапазон грозовых перенапряжений составляет 200-300 кГц, при коммутациях разъединителями – около и выше 1 МГц. При этом высокочастотные перенапряжения наиболее опасны для устройств, имеющих индуктивный характер, в первую очередь для трансформаторов. Основной причиной выхода из строя изоляции объектов электроэнергетики до настоящего времени является поражение молнией.

Следует отметить, что с ограничением амплитуды грозовых перенапряжений успешно справляются современные защитные аппараты – нелинейные ограничители перенапряжений (ОПН) и при правильном выборе на стадии проектирования их параметров и взаимного расположения с защищаемым оборудованием, проблем по обеспечению надежной эксплуатации оборудования, как правило, не возникает. Вместе с тем, ОПН не могут повлиять на крутизну фронта воздействующих грозовых перенапряжений, они ограничивают лишь амплитуду перенапряжений.

Таким образом, если например, рассматривать силовые трансформаторы, то ОПН снижают уровень грозовых перенапряжений, воздействующих на главную изоляцию (между обмоткой высокого напряжения и заземленным баком), но не снижают градиентные перенапряжения, воздействующие на продольную изоляцию (между витками). Также следует отметить, что эффективность ограничения высокочастотных перенапряжений с помощью ОПН снижается из-за наличия индуктивности собственно защитного аппарата и его присоединений.

В качестве одной из мер, позволяющей повысить эффективность работы ОПН, а также снизить опасность возникновения грозовых перенапряжений, можно рассматривать применение частотозависимого устройства, включаемого последовательно в рассечку между проводом воздушных линий (ВЛ) и ошиновкой подстанции (ПС).

Целью работы является повышение эффективности защиты изоляции электрооборудования подстанций от высокочастотной составляющей грозовых перенапряжений.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

- провести теоретические и экспериментальные исследования по выбору эффективных электрических и конструктивных параметров частотозависимого устройства;
- провести математическое и физическое моделирование реальных конструкций отдельных модулей частотозависимого устройства;
- проанализировать эффективность снижения высокочастотной составляющей грозовых перенапряжений при варьировании сопротивления и

индуктивности частотозависимого устройства для различных типов подстанций напряжением 110 кВ;

- разработать конструкцию частотозависимого устройства;
- разработать и испытать устройства подавления грозовых перенапряжений для Ноябрьских сетей ОАО «Тюменьэнерго»;
- провести высоковольтные испытания опытного образца и его частей.

Объект исследования

Устройство для подавления высокочастотных перенапряжений.

Предмет исследования

Частотная зависимость параметров активно-реактивных элементов.

Методы исследования

Решение поставленных задач осуществлялось на основе теоретического и экспериментального методов исследования.

Теоретический метод включает: анализ существующих методов подавления высокочастотных перенапряжений в сетях 110 кВ; оценка влияния скин-эффекта на различные материалы; математическое моделирование для определения оптимальных размеров и формы частотозависимого устройства; оценка эффективности действия частотозависимого устройства по защите оборудования подстанции от грозовых перенапряжений.

Экспериментальный метод включает: измерение частотных зависимостей параметров макетов частотозависимого устройства, разработку конструкции частотозависимого устройства; определение электрических параметров опытных образцов частотозависимого устройства; проведение высокоточных измерений, разработку технических требований на частотозависимое устройство.

Достоверность и обоснованность полученных результатов обеспечивается сочетанием теоретических исследований с проведением экспериментов, при этом результаты теоретических расчётов не противоречат экспериментальным данным.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- предложен новый метод защиты оборудования подстанций за счет увеличения как активного, так и реактивного сопротивлений защитного устройства с ростом частоты;
- выявлено, что реактивное сопротивление частотозависимого устройства (ЧЗУ) всегда оказывается выше, чем активное сопротивление.
- экспериментально показано, что частотная зависимость сопротивления ЧЗУ сохраняется с ростом тока вплоть до килоамперного диапазона.

Практическая ценность и реализация результатов работы:

- разработана конструкция частотозависимого устройства на основе скин-эффекта для подавления грозовых перенапряжений в сетях 110 кВ;
- проведен анализ эффективности использования частотозависимого устройства для защиты оборудования подстанции.

Результаты работы позволяют повысить надежность защиты оборудования подстанций в сетях 110 кВ путём:

- уменьшения амплитуды входного импульса перенапряжения, что уменьшает опасность для основной изоляции оборудования;
- увеличения длины его фронта, что снижает опасность пробоя продольной изоляции оборудования.

Разработанные, изготовленные и испытанные опытные образцы частотозависимого устройства установлены на подстанции Сугмутская ОАО «Тюменьэнерго», филиал Ноябрьские электрические сети.

Личный вклад

Постановка цели работы и задач исследования выполнены совместно с научным руководителем С.М. Коробейниковым. Научные результаты, представленные в диссертации, получены автором. Низковольтные и сильноточные измерения образцов частотозависимого устройства проведены автором совместно с А.С. Мелеховым и С.В. Шевченко. Компьютерное моделирование оптимальной формы ЧЗУ проводилось автором по пакету прикладных программ, созданных Д.В. Вагиным и Ю.Г. Соловейчиком. Эффективность применения ЧЗУ для подавления перенапряжений оценена автором совместно с Ю.А. Лавровым. Сборка опытных образцов ЧЗУ проводилась совместно со студентами.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Теоретическое обоснование возможности подавления грозовых перенапряжений с помощью устройства, работающего по принципу скин-эффекта.
2. Результаты компьютерного моделирования оптимальной конструкции частотозависимого устройства.
3. Конструкция частотозависимого устройства.
4. Оценка эффективности опытного образца ЧЗУ для подавления грозовых перенапряжений в сетях 110 кВ.

Апробация работы

Диссертационная работа и её основные положения докладывались и обсуждались на первой Российской конференции по молниезащите, г. Новосибирск 2007, XI Всероссийской научно-технической конференции «Наука. Промышленность. Оборона». – Новосибирск: НГТУ. 2010, на 8 и 9 заседаниях научно-практического семинара Общественного Совета специалистов Сибири и Дальнего Востока по диагностике электрических установок, Тюмень, 2013, Красноярск 2014, на XVI Международной научной конференции «Физика импульсных разрядов в конденсированных средах» г. Николаев, 2013 год, на международном научном конгрессе «Совершенствование системы управления, предотвращения и демпфирования последствий чрезвычайных ситуаций регионов и проблемы безопасности жизнедеятельности населения», Сиббезопасность–СпасСиб–2011, 2013,2014, Новосибирск.

Публикации

По результатам работы опубликовано 9 печатных работ, в том числе 3 в изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

Получен патент РФ на полезную модель №132633 «Устройство для подавления высокочастотных перенапряжений».

Работа выполнялась в рамках научно-исследовательской работы по договору № 8/12-СИЗП от 28.08.2012 г. «Разработка частотозависимого устройства для подавления высокочастотных перенапряжений» (Руководитель Коробейников С.М., ответственный исполнитель Илюшов Н.Я.)

Объём и структура работы

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованных работ из 95 наименований и приложений А и Б. Работа изложена на 162 страницах основного текста, иллюстрируется 96 рисунками и 32 таблицами.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулирована цель и основные задачи исследования, отражены научная новизна работы, ее практическая значимость и основные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** «Анализ литературных данных по высоковольтным перенапряжениям в сетях 110 кВ» рассмотрены основные виды грозовых перенапряжений и их воздействие на изоляцию электрооборудования подстанции.

Условно грозовые волны перенапряжения в зависимости от их энергетического потенциала и крутизны можно разделить на три группы:

- *полные волны*, образованные в результате прорыва молнии сквозь тросовую защиту ВЛ и не приведшие к перекрытию линейной изоляции с амплитудой, не превышающей 50%-ное импульсное разрядное напряжение линейной изоляции ВЛ;

- *срезанные волны*, образованные в результате прорыва молнии сквозь тросовую защиту с последующим перекрытием линейной изоляции ВЛ;

- *короткие волны*, образованные при обратных перекрытиях с тела опоры на провод при ударах молнии в опору или грозотрос.

Полная волна грозового импульса, возникающая при прямом ударе молнии в провода на расстоянии более 1,5-2 км, уже не опасна для изоляции оборудования подстанции. Опасность представляют только полные волны, образующиеся при прорыве через грозозащитные тросы в непосредственной близости от подстанции, то есть в защищенном подходе, протяженность которого обычно составляет 2 км.

Более серьёзную опасность для оборудования подстанции представляют срезанные импульсы грозового перенапряжения, образующиеся в том случае, если амплитуда напряжения при определенном токе молнии превышает импульсное разрядное напряжение изоляции линии. Короткие импульсы с еще более крутым, практически вертикальным фронтом, образуются при ударе молнии в опору или грозозащитный трос с последующим обратным

перекрытием изоляции ВЛ. Длительность таких импульсов составляет всего $1 \div 2$ мкс. Вероятность обратного перекрытия при ударе молнии в опору или трос составляет 0,13 и 0,04 соответственно, но именно короткие импульсы вызывают среднее удельное отключение линии в год 1,73 и 0,89. Так, например, в обмотке трансформатора под действием импульсного напряжения развивается переходный процесс, приводящий к перенапряжениям на продольной изоляции между соседними элементами обмотки (витками, катушками, слоями) и на главной изоляции, то есть на изоляции обмотки относительно заземленных частей трансформатора. Из-за неравномерности распределения напряжения по виткам катушки, продольная изоляция начальной части обмотки воспринимает большую часть приложенного напряжения. При этом, чем больше значение крутизны фронта, тем на меньшее количество витков распределится напряжение входного импульса и тем вероятнее пробой межвитковой изоляции. Следовательно, для изоляции оборудования подстанции опасность исходит не только от амплитуды импульса перенапряжения, но и от крутизны его фронта.

Этот вывод полностью подтверждает анализ аварийности трансформаторного оборудования серий ТДТН и ТРДН класса напряжения 110 кВ и мощностью от 16 до 40000 кВА, находящимся в эксплуатации ОАО «Тюменьэнерго» в период с 2002 по 2012. Так, в соответствии с данными научно-исследовательской работы (НИР) по разработке программно-аппаратного комплекса диагностики активных частей трансформаторов, выполненной Лавриновичем В.А., Мытниковым А.В в 2013 году, основной причиной инцидентов с трансформаторным оборудованием в условиях Крайнего Севера является образование межвитковых коротких замыканий – 80% (рисунок 1).

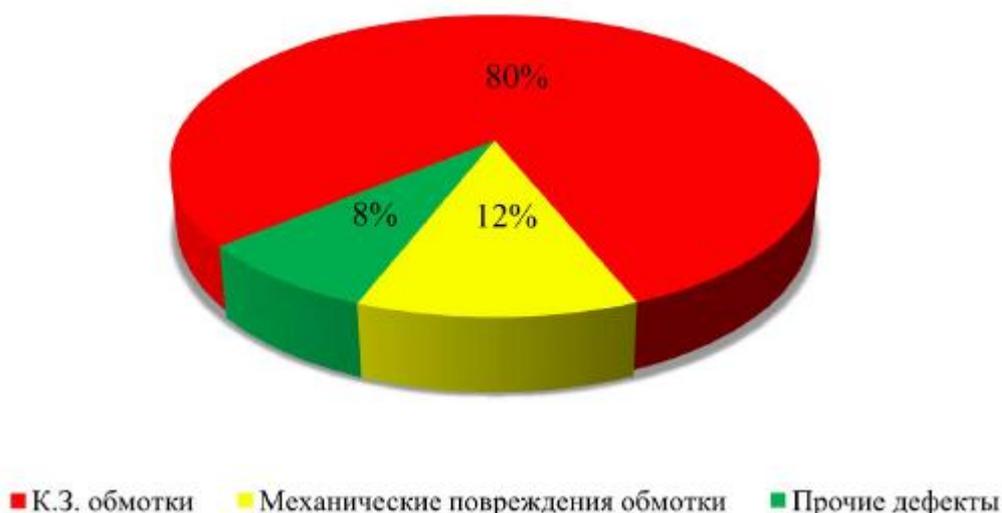


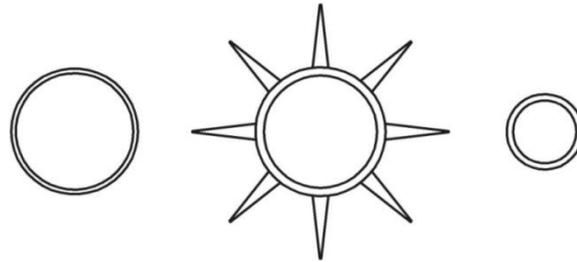
Рисунок 1 - Диаграмма распределения дефектов в процентном отношении для трансформаторного оборудования 110 кВ номинальной мощности 16 – 40 000 кВА ОАО «Тюменьэнерго»

Анализ существующих способов подавления грозových перенапряжений показал, что даже наиболее применяемые в настоящее время ОПН не могут повлиять на крутизну фронта воздействующих грозových перенапряжений, они ограничивают лишь амплитуду перенапряжений, зависящей от остающегося напряжения на защитном аппарате. Таким образом, если например, рассматривать силовые трансформаторы, то ОПН снижают уровень грозových перенапряжений, воздействующих на главную изоляцию (между обмоткой высокого напряжения и заземленным баком), но не снижают градиентные перенапряжения, воздействующие на продольную изоляцию (между витками). Также следует отметить неэффективность ограничения ВЧ-перенапряжений с помощью ОПН, обусловленную наличием индуктивности собственно защитного аппарата и его присоединений.

Все это вызывает необходимость поиска новых, более простых и надёжных способов защиты оборудования. Одним из таких способов подавления высокочастотных перенапряжений может стать частотозависимое устройство, рост высокочастотного сопротивления которого обеспечивает скин-эффект, и сопротивление которого значительно увеличивается при частотах, характерных для перенапряжений. ЧЗУ должно включаться последовательно с защищаемым объектом. При этом на рабочей частоте оно не будет препятствовать прохождению тока, а на высоких частотах будет служить поглощающим фильтром. Высокочастотное перенапряжение падает, в основном, на устройстве и высокочастотная составляющая не проходит в защищаемый прибор или подстанцию, если оно установлено на подходе к подстанции. Таким образом, использование ЧЗУ должно увеличить эффективность защиты оборудования подстанции от грозových перенапряжений.

Вторая глава «*Низковольтные испытания*» посвящена исследованию действия скин-эффекта и поиску способов увеличения сопротивления материалов при изменении частоты входного сигнала.

Для оценки влияния скин-эффекта на сопротивление образцов были проведены низковольтные измерения трёх цилиндрических макетов, поперечное сечение оснований которых представлено на рисунке 2. Первый представлял собой полый цилиндр из алюминия длиной 400 мм, диаметром 15 мм с толщиной стенки 2,1 мм. Второй образец был также изготовлен из алюминиевого цилиндра диаметром 15,4 мм с толщиной стенки 2 мм и имел 8 ребер высотой 15 мм. Толщина каждого ребра у основания составляла 3,8 мм, а в верхней точке 0,3 мм. Третий образец представлял собой полый медный цилиндр длиной 400 мм диаметром 9 мм с толщиной стенки 1,5 мм. Полное комплексное сопротивление Z определялось сравнением напряжений, снимаемых двухлучевым осциллографом, с трубки и малоиндуктивного шунта. Зная значения Z и сдвига фаз между сигналами, рассчитывались значения реактивного X и активного R сопротивления трубки.



а)

б)

в)

Рисунок 2 - Поперечное сечение образцов

а – алюминиевая трубка; б – алюминиевая трубка с оребрением; в – медная трубка

Из графиков, приведённых на рисунке 3, можно сделать вывод, что на проявление скин-эффекта влияет в первую очередь форма трубки. Изменение же материала трубки с алюминия на медь, практически не изменило его активное сопротивление.

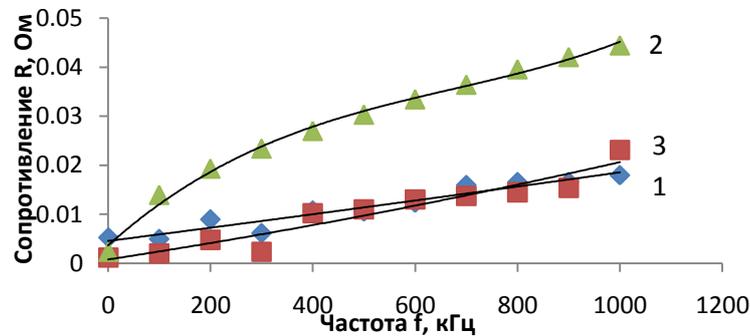


Рисунок 3 - Зависимость активной составляющей сопротивления трубок от частоты входного сигнала

1 – алюминиевая трубка, 2 – алюминиевая трубка с оребрением; 3 – медная трубка

Для усиления частотной зависимости было предложено добавить в качестве внешнего слоя накладки из ферромагнитного резистивного материала, а именно аморфной ленты 5БДСР.

Применение накладки ленты заметно увеличивает активное и полное сопротивление трубок на высоких частотах. Так, например, в таблице 1 приведены результаты измерения полного комплексного сопротивления трубок, которые показывают, что лента 5БДСР увеличивает сопротивления Z в несколько раз.

Таблица 1 – Полное комплексное сопротивление трубок с лентой и без ленты 5БДСР

Вид макета	Без ленты 5БДСР			С лентой 5БДСР		
	50 Гц	1 МГц	Рост	50 Гц	1 МГц	Рост
Алюминиевая трубка	120 мкОм/м	0,4 Ом/м	3333	120 мкОм/м	0,6 Ом/м	5000
То же с оребрением	139 мкОм/м	1,1 Ом/м	7913	139 мкОм/м	1,6 Ом/м	11510
Медная трубка	110 мкОм/м	0,4 Ом/м	3636	110 мкОм/м	1,1 Ом/м	10000

Анализируя результаты низковольтных измерений в двухслойных образцах, можно сделать следующий вывод: наибольший рост активного и полного сопротивления с ростом частоты по-прежнему наблюдается в алюминиевой трубке с оребрением.

Для проведения низковольтных измерений в трёхслойной структуре в трубке с оребрением между ребрами основания с приклеенными накладками из ленты 5БДСР толщиной 0,025 мм был засыпан диэлектрический ферромагнитный порошок. Применение засыпки из ферромагнитного порошка также приводит к увеличению сопротивления трубки на высоких частотах. Так её активное сопротивление увеличилось с 41 мкОм до 0,2 Ом. Еще больший рост наблюдается для полного комплексного сопротивления. Оно возросло почти в 18 тысяч раз со 195 мкОм до 3,5 Ом.

Для наглядности результаты измерения активного сопротивления каждой трубки представлены на рисунке 4.

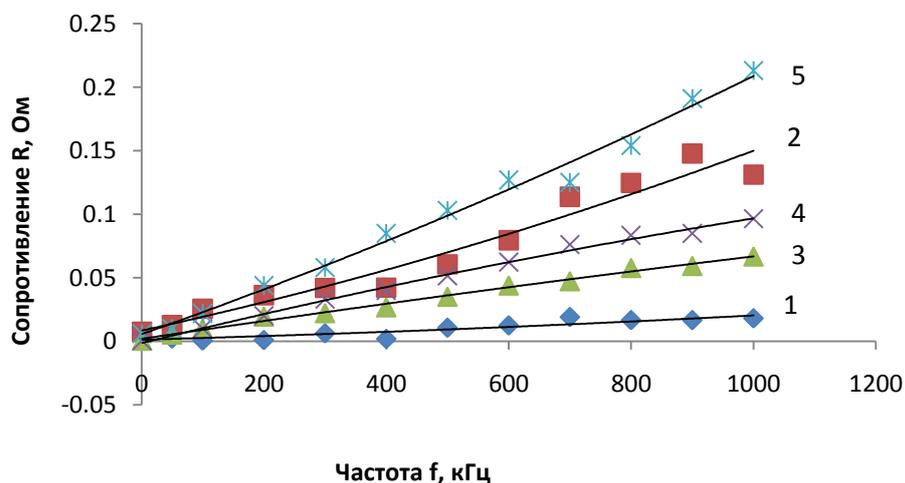


Рисунок 4 - Зависимость активного сопротивления R алюминиевых трубок от частоты входного сигнала

- 1 – алюминиевая трубка без ленты 5БДСР; 2 – алюминиевая трубка с лентой 5БДСР;
 3 – алюминиевая трубка с оребрением без ленты 5БДСР; 4 – алюминиевая трубка с оребрением с лентой 5БДСР; 5 – алюминиевая трубка с оребрением с лентой 5БДСР и засыпкой ферромагнитным порошком

Как видно из графиков, наибольший рост активного сопротивления наблюдается в алюминиевой трубке с оребрением при использовании ленты 5БДСР и засыпке ферромагнитным порошком пустот между ребрами трубки.

Таким образом, результаты низковольтных измерений образцов частотозависимого устройства показывают, что на его сопротивление можно влиять тремя способами:

1. Изменением формы образца;
2. Применением накладок из ферромагнитной ленты с высокой магнитной проницаемостью.
3. Засыпкой образца ферромагнитным порошком.

В третьей главе «Компьютерное моделирование» проведено моделирование оптимальной формы конструкции ЧЗУ. Проанализированы зависимости сопротивления конструкции от частоты при изменении её формы и размеров. Выбрана оптимальная форма для разработки опытного образца частотозависимого устройства.

Для моделирования частотозависимого устройства была разработана специальная компьютерная программа, позволяющая изучить распределение электромагнитного поля и поведение характеристик поля в резисторе. Расчёты производились методом конечных элементов, неоспоримым преимуществом которого является возможность задания нерегулярных и неортогональных сеток, что позволяет более точно описать геометрию расчётной области.

Математическая постановка задачи данной программы сводилась к необходимости изучить распределение электромагнитного поля и поведение характеристик поля в техническом устройстве, представляющем собой провод сложной конструкции. Схематический вид конструкции изображен на рисунке 5.

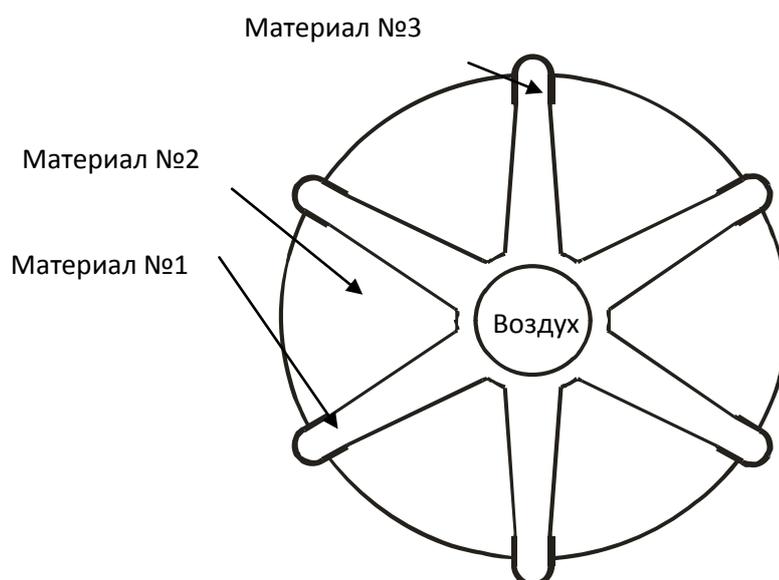


Рисунок 5 - Схематический вид конструкции

Конструкция состоит из следующих материалов:

-материал № 1 – алюминиевая подложка («лепестки» и «основание») с относительной магнитной проницаемостью $\mu=1$ и удельной проводимостью $\sigma = 3.6 * 10^7$ См/м;

-материал № 2 – непроводящий материал-диэлектрик (заполнитель) с небольшой относительной магнитной проницаемостью μ , которая будет изменяться от 1 до 100;

-материал № 3 – «насадка» - покрытие из проводящего материала с высокой относительной магнитной проницаемостью μ и низкой удельной проводимостью σ . Данные параметры могут меняться.

Сравнение результатов компьютерного моделирования с результатами низковольтных измерений, представленное на рисунке 6, показало хорошее

совпадение вплоть до частоты 1 МГц. Это позволило использовать моделирование для определения оптимальной формы и размеров частотозависимого устройства.

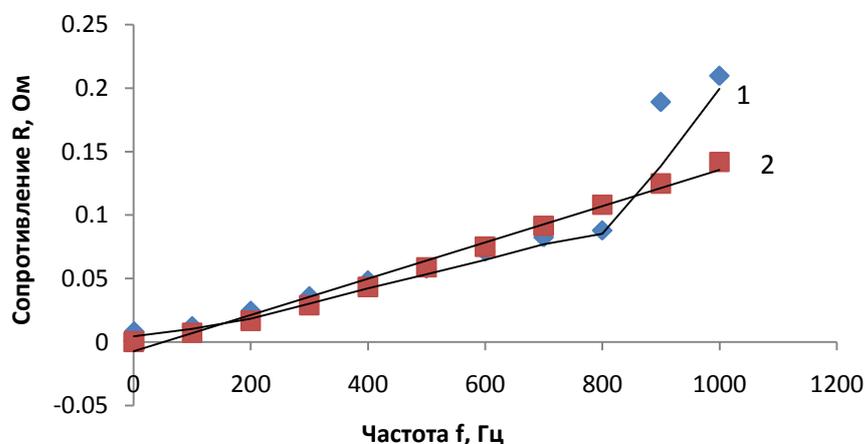


Рисунок 6 - Сравнение результатов компьютерного моделирования с результатами низковольтных измерений
1- результаты низковольтных измерений; 2 – результаты компьютерного моделирования

С помощью данной компьютерной программы были смоделированы различные варианты формы ЧЗУ, некоторые из которых показаны на рисунке 7, и рассчитаны значения их сопротивлений на различных частотах.

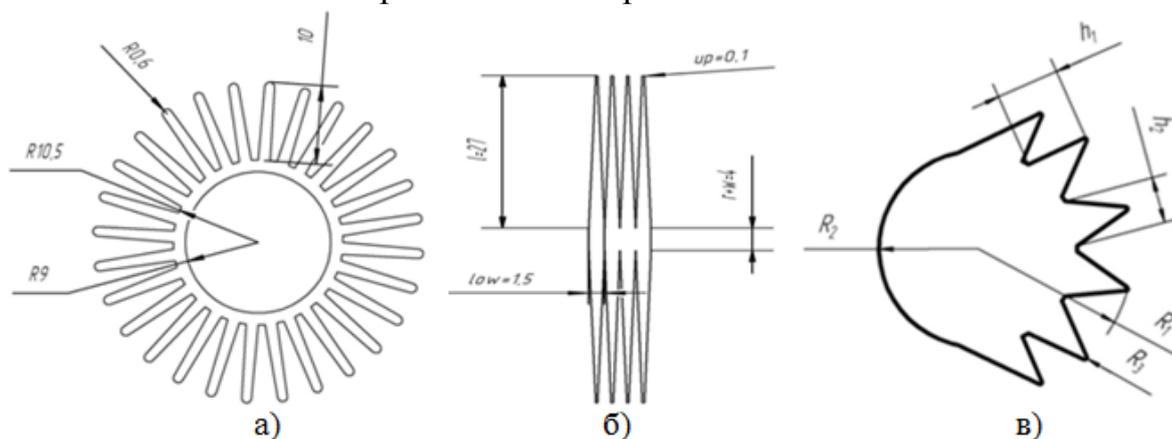


Рисунок 7 - Варианты формы ЧЗУ
а) поперечное сечение 28 лучевого ЧЗУ б) поперечное сечение элемента плоского ЧЗУ
в) поперечное сечение элемента сплошного ЧЗУ

Погонное сопротивление плоского ЧЗУ (рисунок 7б) имеет наиболее высокое значение из всех смоделированных вариантов формы устройства. Расчетные значения погонного сопротивления данного устройства с накладкой из ленты 5БДСР толщиной 0,075 мм приведены в таблице 2.

Таблица 2 - Расчётные значения сопротивления плоского ЧЗУ

F, кГц	R, Ом/м	X, Ом/м	Z, Ом/м
0,05	0.0004	0.005	0.005
10	0.14	0.28	0.32
300	1.76	2.91	3.4
1000	2.79	3.02	4.12

Существенным недостатком любой из представленных выше форм является наличие лучей, что будет конструктивно затруднять сборку частотозависимого устройства в целом и определять их малую механическую прочность. Кроме этого, для надежной защиты оборудования подстанции плоский ЧЗУ должен иметь минимальное сопротивление более 200 Ом, т.е его длина будет более 100 метров. Уменьшить общую длину ЧЗУ и одновременно увеличить его механическую прочность возможно только одним способом – изготовить его в виде катушки. Так, расчёт значений сопротивления сплошного ЧЗУ (рисунок 7в) дал результаты, приведённые в таблице 3.

Таблица 3 - Расчётные значения сопротивления сплошного ЧЗУ в виде четырёхугольной катушки

F, кГц	R, Ом/м	X, Ом/м	Z, Ом/м
0,05	$5.61e^{-5}$	0.003	0.003
10	0.003	0.64	0.64
100	0.15	6.36	6.36
300	0.48	18.56	18.57
1000	0.97	61.17	61.17

Данная конструкция способна обеспечить подавление амплитуды грозового импульса, но при этом имеет ряд своих недостатков. Большое количество соединений неминуемо приводит к росту сопротивления на рабочей частоте сети 50 Гц, а это, в свою очередь, приведет к потерям энергии и к перегреву самой конструкции. Снизить сопротивление и увеличить механическую прочность контактов можно с помощью омеднения соединяемых деталей. Однако, технологические операции подготовки поверхностей и омеднения весьма затруднительны и дорогостоящи. К тому же наличие острых углов в четырёхугольной конструкции способствует коронированию на рабочем напряжении, что является недопустимым. Поэтому необходимо разработать конструкцию без соединений между модулями ЧЗУ и не имеющую острых углов.

Существенно облегчить задачу создания частотозависимого устройства позволяет использование для его основы обычного алюминиевого провода. В этом случае ЧЗУ будет иметь форму спирали, представленную на рисунке 8.

Сечение провода должно выбираться из значений номинальных токов подстанции 110 кВ. Например, для значения номинального тока 200 А вполне подходит алюминиевый провод А150 диаметром 15,8 мм.



Рисунок 8 - Общий вид ЧЗУ из круглого провода

Таким образом, анализируя данные расчетов, можно сделать выводы:

- создание частотозависимого устройства с необходимыми для подавления грозовых перенапряжений в сетях электрическими параметрами возможно;
- оптимальной формой частотозависимого устройства является спираль;
- реактивное сопротивление ЧЗУ всегда оказывается выше, чем активное сопротивление.

В четвёртой главе «Разработка опытного образца ЧЗУ для защиты подстанций ОАО «Тюменьэнерго»» приводятся результаты расчётов размеров опытного образца ЧЗУ и исследований эффективности его применения для снижения высокочастотной составляющей грозовых перенапряжений, воздействующих на изоляцию электрооборудования подстанций высокого напряжения на примере ПС напряжением 110 кВ «Сугмутская», а также ПС «Трудовая» и «Новогодняя».

Зная необходимые электрические параметры ЧЗУ, можно рассчитать сопротивления устройства в виде спирали с помощью компьютерного моделирования. Используя зависимости сопротивления ЧЗУ от размеров спирали и толщины накладки из плёнки 5БДСР, были подобраны оптимальные размеры конструкции для подавления грозовых перенапряжений. Диаметр спирали ЧЗУ должен составлять 1000 мм, расстояние между витками 7 мм, что обусловлено общей толщиной межвитковой изоляции. Накладки из аморфной ленты 5БДСР должна быть выполнена в виде намотки на провод 12 слоев ленты общей толщиной 0,3 мм. Такая толщина позволит увеличить время диффузии магнитного поля при возможном насыщении ферромагнитного материала при прохождении импульса перенапряжения. Расчетные значения погонного сопротивления частотозависимого устройства данной конструкции при

магнитной проницаемости накладки $\mu = 50000$ на промышленной частоте и частоте грозового импульса по результатам компьютерного моделирования приведены в таблице 4.

Таблица 4 -Сопrotивление ЧЗУ в виде спирали

F (кГц)	R (Ом/м)	X(Ом/м)	Z(Ом/м)
0,05	0.00015	0.011	0.011
300	6.22	56.79	57.13

В итоге по результатам компьютерного моделирования была разработана конструкция ЧЗУ, общий вид которой, приведен на рисунке 9.

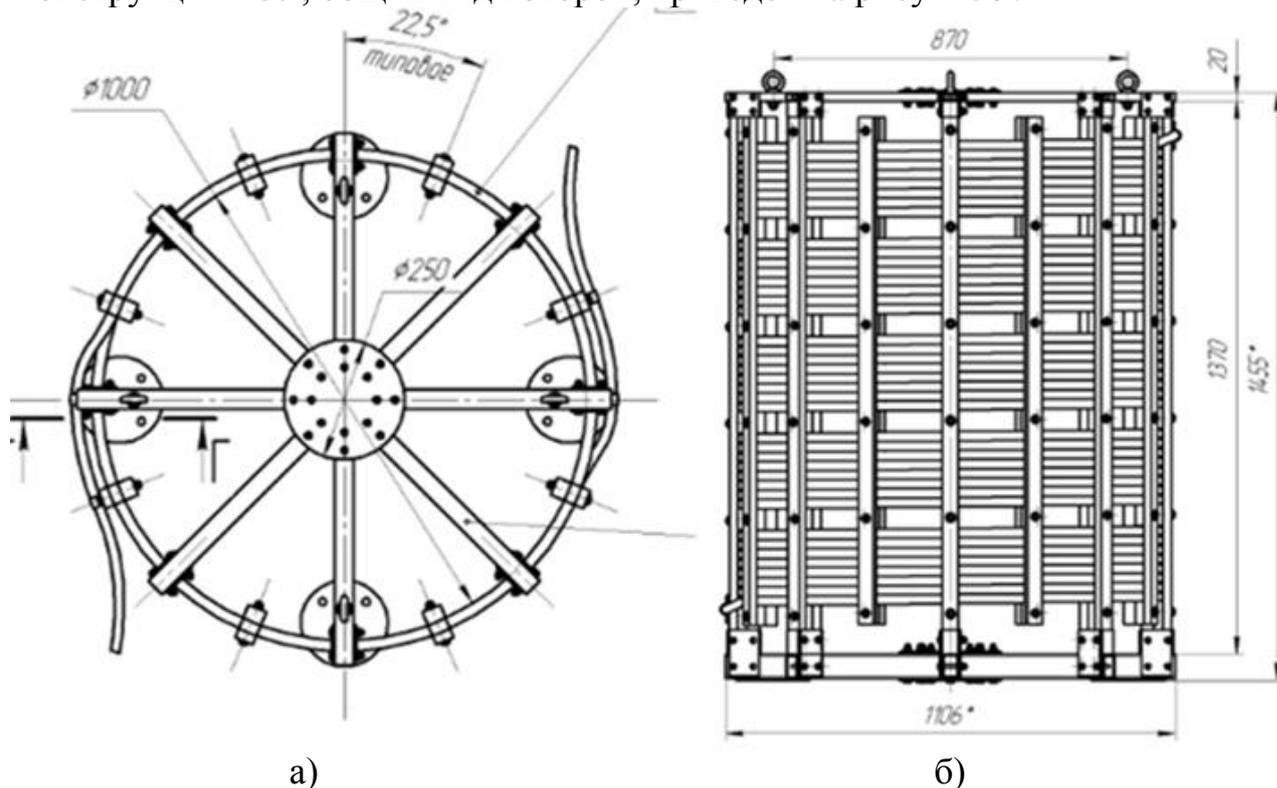


Рисунок 9 - Общий вид конструкции ЧЗУ

Так же в четвёртой главе приведены расчёты электродинамической стойкости конструкции ЧЗУ, расчёт его термической устойчивости и расчёт экономического эффекта от применения ЧЗУ.

Для анализавоздействия ЧЗУ данной конструкции на крутизнувоздействующего напряжения была использована расчётная схема, представленная на рисунке 10.

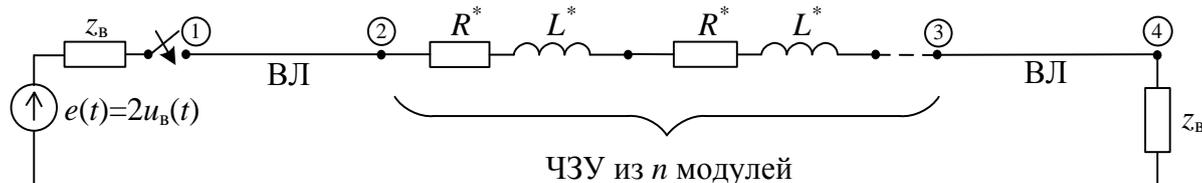


Рисунок 10 - Расчетная схема для анализа эффективности ЧЗУ по деформации крутизны импульса напряжения

Анализ показал, что ЧЗУ эффективно уменьшает крутизну фронта грозового импульса при значениях индуктивности 2,5 мГн. Так, на рисунке 11 приведены компьютерные осциллограммы полной, срезанной и короткой волн напряжения через ЧЗУ.

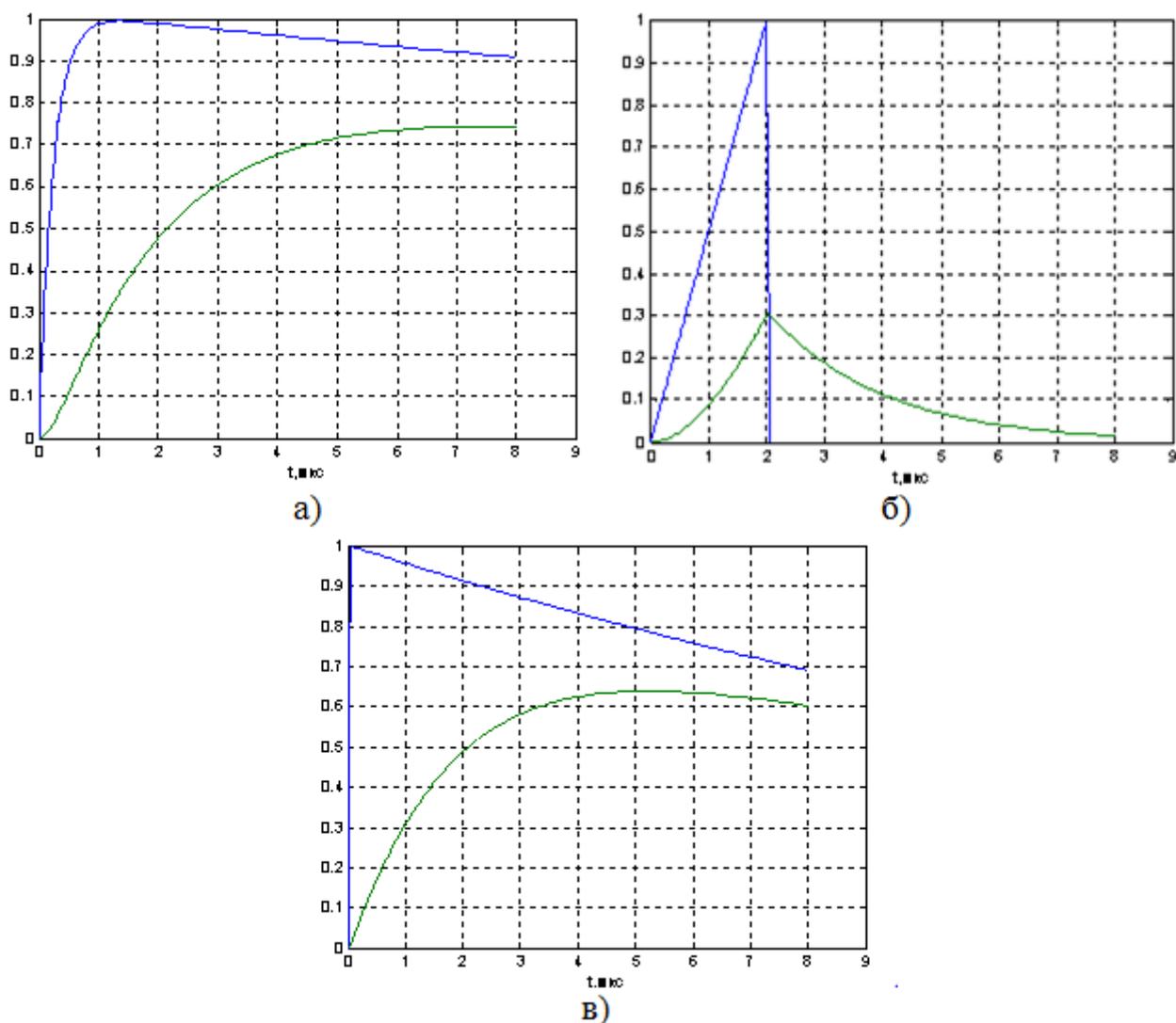


Рисунок 11 - Влияние ЧЗУ на искажение крутизны набегающих с ВЛ волн перенапряжения
а) полная волна; б) срезанная волна; в) короткая волна

Численный анализ эффективности применения частотозависимого устройства при его установке на подстанциях напряжением 110 кВ показал, что установка ЧЗУ на пути набегающих с ВЛ на ПС грозового импульса приводит к существенному изменению начального участка формы воздействующих на изоляцию силовых трансформаторов (СТ) волн перенапряжений. В частности, время нарастания напряжения до уровня остающегося напряжения на РВМГ увеличилось примерно с 0,3 мкс до значения примерно 2,5 мкс, то есть в 8-9 раз снизилась крутизна формы, воздействующих на изоляцию силовых трансформаторов перенапряжений, что, очевидно, благоприятно скажется на надежности эксплуатации продольной (витковой) изоляции СТ.

В четвертой главе для сравнения была произведена оценка эффективности демпфирования высокочастотных перенапряжений при установке на линии по

ходу набегания импульса напряжения трех аппаратных устройств - ЧЗУ, силового реактора (СР) и конденсатора связи (КС). По полученным результатам видно, что наиболее эффективной мерой по снижению крутизны полной волны является применение ЧЗУ, менее действенное влияние оказывают СР и КС. При применении же двух комплектов СР (или двух комплектов КС), а также при совместном использовании одного СР и одного КС эффект по снижению крутизны практически аналогичен эффекту от применения ЧЗУ.

Так как численный анализ эффективности применения частотозависимого устройства при его установке на подстанциях напряжением 110 кВ подтвердил его защитное действие при воздействии грозových волн, набегающих с ВЛ на ПС, были изготовлены три опытных образца ЧЗУ. Фотография одного из них показана на рисунке 12.



Рисунок 12 - Фотография опытного образца ЧЗУ

В пятой главе «Экспериментальные исследования опытного образца и его элементов» приводятся результаты экспериментальных определений характеристик опытных образцов частотозависимого устройства при проведении низковольтных и сильноточных измерений.

Низковольтные измерения полного и активного сопротивления проводилось по методу амперметра-вольтметра. Результаты измерений сопротивления одного из образцов и его индуктивности приведены в таблице 5.

Таблица 5 - Результаты измерения по ЧЗУ 1

F(кГц)	0,05	0,1	0,5	1	5	10	50	100	150	200
Z(Ом)	0,5	0,98	4,82	9,56	42,64	90,74	442,9	920,2	1521	2369
R(Ом)	0,09	0,12	0,15	0,6	1,34	5,7	27,81	57,78	95,47	148,8
L(мГн)	1,572	1,545	1,534	1,519	1,357	1,141	1,407	1,462	1,61	1,882

Также в пятой главе представлены результаты сильноточных испытаний, целью которых являлось определение активного сопротивления образца и токов насыщения. Измерения проводились по принципиальной схеме, приведённой на рисунке 13.

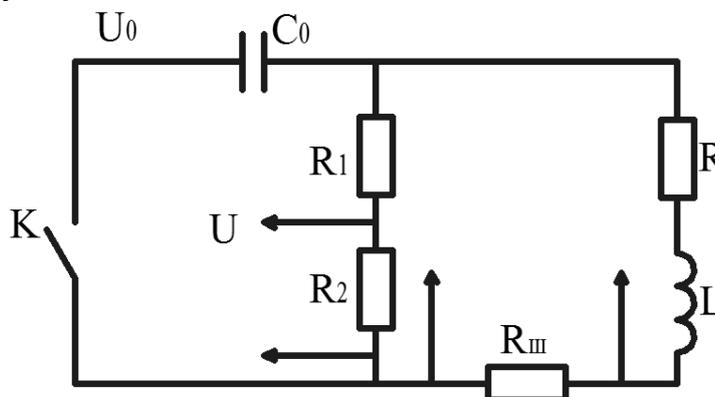


Рисунок 13 - Принципиальная электрическая схема сильноточных испытаний

Для создания импульса использовались конденсаторы К73 и генератор высокого напряжения на 10 кВ. В качестве ключа использовался неуправляемый искровой разрядник. Применение данных элементов позволило испытать образцы частотозависимого резистора длиной 3 метра на токах в несколько килоампер. Зарядное напряжение от генератора измерялось с помощью электростатического киловольтметра С196. Частота входного импульса изменялась подбором ёмкости конденсатора C_0 от 0,1 мкФ до 1,0 мкФ и составила 240 кГц, 102 кГц и 66кГц.

Например, расчётные значения активного сопротивления R и значения силы тока в ЧЗУ при частоте входного сигнала 66 кГц приведены в таблице 6, график их зависимости показан на рисунке 14.

Таблица 6 - Значения силы тока и активного сопротивления ЧЗУ при частоте входного сигнала 66 кГц

I (A)	114,6	162,6	173	266	687	3833	9266
R(Ом·м)	0,376	0,334	0,3	0,237	0,133	0,107	0,084

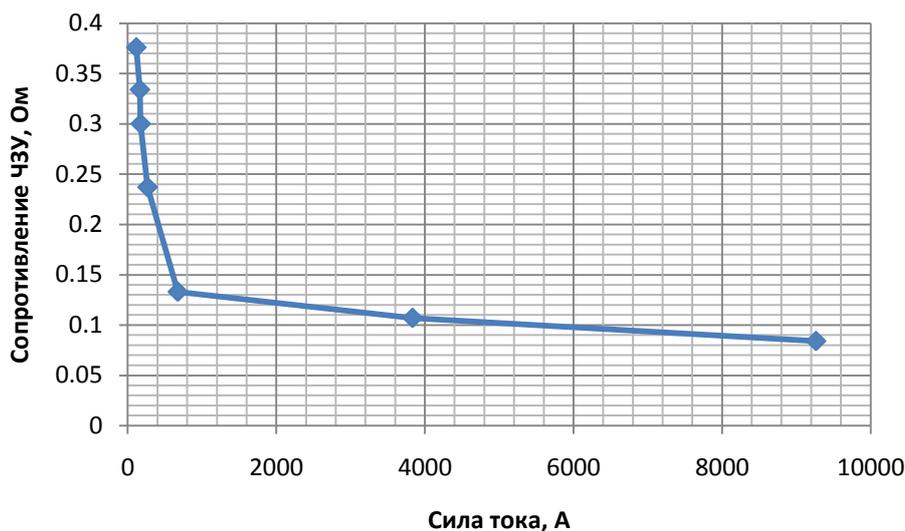


Рисунок 14 - Зависимость активного сопротивления ЧЗУ от проходящего тока на частоте 66 кГц

Графики зависимости сопротивления ЧЗУ от проходящего тока позволяют хотя бы приблизительно определить значение тока глубокого насыщения при различной частоте входного сигнала.

В результате испытаний с токами до 8 кА было определено, что токи насыщения превышали 300 А. Подчеркнем, что значения рабочих токов не превышает 200 А, т.е. в рабочем режиме материал не находится в области насыщения.

Сравнение результатов высокоточных измерений и измерений сопротивления ЧЗУ методом амперметра-вольтметра при низковольтных испытаниях позволяют говорить о совпадении значений сопротивления на близких частотах.

Кроме этого, экспериментальное определение значения магнитной проницаемости ленты 5БДСР позволяет сделать вывод о правильности компьютерных расчётов значений сопротивления ЧЗУ на различных частотах и о совпадении их со значениями сопротивления, полученного в результате измерений.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В ходе диссертационной работы по разработке частотозависимого устройства для подавления высокочастотных перенапряжений получены следующие результаты:

- проведены теоретические и экспериментальные исследования по выбору эффективных электрических и конструктивных параметров частотозависимого устройства;
- проведено математическое и физическое моделирование реальных конструкций отдельных модулей частотозависимого устройства;

- проанализирована эффективность снижения высокочастотной составляющей грозовых перенапряжений при варьировании сопротивления и индуктивности частотозависимого устройства для различных типов подстанций напряжением 110 кВ;
- разработана конструкция частотозависимого устройства;
- проведены высоковольтные испытания опытного образца и его частей.
- частотозависимое устройство для подавления грозовых перенапряжений разработано, испытано и установлено на ПС «Сугмутская» Ноябрьских сетей ОАО «Тюменьэнерго».

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК:

1. С. М. Коробейников, Н. Я. Илюшов, А. В. Мелехов // Измерения сопротивления двухслойного проводника резонансным способом *Электричество* 2011, №10, с.52-55
2. Н. Я. Илюшов, С. М. Коробейников // Низковольтные измерения частотозависимого резистора "Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники" ("Доклады ТУСУР") №1 (25) Ч.1 июнь 2012, с. 192-195
3. Н. Я. Илюшов, Д. В. Вагин, С. Г. Назаров // Компьютерное моделирование частотозависимого резистора различной формы *Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока.* — 2011. — № 1. — С.310-313
4. Н. Я. Илюшов, С. М. Коробейников, Ю.А. Лавров Определение характеристик частотозависимого устройства при проведении сильноточных испытаний// *Сиббезопасность–СпасСиб–2014* : междунар. выст. и науч. конгр. «Совершенствование системы управления, предотвращения и демпфирования последствий чрезвычайных ситуаций регионов и проблемы безопасности жизнедеятельности населения», Новосибирск, 24–26 сент. 2014 г. : материалы науч. конгр. – Новосибирск : СГГА, 2014. – С. 59-63.
5. Патент РФ на полезную модель №132633. Коробейников С.М., Илюшов Н.Я., Лавров Ю.А., Лопатин В.В., Брыкин В.П., Коробенкова А.Ю., «Устройство для подавления высокочастотных перенапряжений». Зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 20 сент. 2013 г. Опубликовано 20.09.2013 Бюл. №26.

Научные публикации в других изданиях:

1. Коробейников С. М., Черненко Н. А., Илюшов Н. Я., Мелехов А.В. Частотозависимый резистор для молниезащиты // Первая Российская конференция по молниезащите 26-30 ноября 2007, Сборник докладов, Новосибирск: Сибирская энергетическая академия, 2007 – С. 281-291 стр.
2. Илюшов Н.Я. Компьютерное моделирование частотозависимого резистора различной формы./Н.Я. Илюшов, Д.В. Вагин. //Наука.

Промышленность. Оборона. :Труды Всероссийской научно-технической конференции, - Новосибирск, изд-во НГТУ, 2010 – С. 255-256.

3. Илюшов Н.Я. Измерение параметров макета многолучевого частотозависимого резистора./Н.Я. Илюшов, М.В. Свириденко.//Наука. Промышленность. Оборона.: Труды Всероссийской научно-технической конференции.- Новосибирск, изд-во НГТУ, 2010 – С. 166-167.

4. Коробейников С. М., Илюшов Н. Я., Лавров Ю. А., Петрова Н. Ф. Применение частотно-зависимого резистора для подавления высокочастотных перенапряжений, воздействующих на кабели и электрооборудование подстанций напряжением 110 кВ // Диагностика электрических установок : материалы 8 науч.-практ. семинара Общественного Совета специалистов Сибири и Дальнего Востока по диагностике электрических установок по проблемам оценки технического состояния и проверки эффективности средств защиты от грозовых и высокочастотных коммутационных перенапряжений генерируемых элегазовыми выключателями и разъединителями [Тюмень, 22–23 апр. 2013 г.] – Тюмень, 2013. – С. 194-208

5. Коробейников С. М., Лавров Ю. А, Илюшов Н. Я., Бычков А. Л. Грозозащита подстанций в условиях Крайнего Севера. // Сиббезопасность–СпасСиб–2013 : междунар. выст. и науч. конгр. «Совершенствование системы управления, предотвращения и демпфирования последствий чрезвычайных ситуаций регионов и проблемы безопасности жизнедеятельности населения», Новосибирск, 25–27 сент. 2013 г. : материалы науч. конгр. – Новосибирск : СГГА, 2013. – С. 116-120.

Отпечатано в типографии
Новосибирского государственного технического университета
630092, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20
тел./факс. (383) 346-08-57
формат 60 X 84/16, объем 1.5 п.л., тираж 100 экз.
заказ № подписано в печать. 2014 г.