

На правах рукописи



Ломан Валентин Алексеевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СПОСОБА ПОДАВЛЕНИЯ
ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ
С ПОМОЩЬЮ ЧАСТОТНОЗАВИСИМОГО УСТРОЙСТВА**

Специальность 05.14.12 – «Техника высоких напряжений»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2022

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

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

Официальные оппоненты: **Коровкин Николай Владимирович**
доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», Институт Энергетики, высшая школа высоковольтной энергетики, профессор, г. Санкт-Петербург;

Ширковец Андрей Игоревич
кандидат технических наук, Общество с ограниченной ответственностью «Болид», отдел международных отношений и инжиниринга, начальник отдела, г. Новосибирск.

Ведущая организация: Акционерное общество «НПО СТРИМЕР», г. Санкт-Петербург.

Защита диссертации состоится: «29» сентября 2022 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.173.01 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» по адресу: 630073, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, I корпус, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета и на сайте www.nstu.ru

Автореферат разослан «__» июля 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
канд. тех. наук, доцент



Анатолий Анатольевич Осинцев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

В процессе эксплуатации электрооборудование подстанций подвергается различным видам перенапряжений, которые значительно сокращают его ресурс. Одними из наиболее опасных, являются высокочастотные перенапряжения, источниками которых являются грозовые разряды или коммутации в сети. Эти перенапряжения представляют наибольшую опасность для продольной изоляции трансформаторов и реакторного оборудования, в том числе за счёт градиентных перенапряжений между витками обмоток высокого напряжения.

Грозовые высокочастотные перенапряжения могут возникать при ударах молнии в фазный провод и дальнейшем перекрытии или при попадании разряда молнии в опору, или трос грозозащиты с последующим обратным перекрытием изоляции. При этом непосредственную опасность представляют именно молниевые поражения, приводящие к перекрытиям рядом с подстанцией, так как при ударах в отдалении за время подхода к подстанции импульс растягивается и становится безопасным для обмоток трансформатора.

Коммутационные высокочастотные перенапряжения могут возникать при работе выключателей (вакуумных, элегазовых), коммутации воздушных и кабельных линий, при оперативных переключениях в схеме и т.д. Важно отметить, что зачастую коммутационные перенапряжения имеют повторяющийся характер, это повышает скорость старения изоляции оборудования.

В России наиболее распространённым методом защиты от высокочастотных перенапряжений грозовой природы является применение нелинейных ограничителей перенапряжений (ОПН). ОПН устанавливаются, в основном, в сетях напряжением 110 кВ и выше, они позволяют значительно ограничивать амплитуды набегающих импульсов и обеспечивают защиту от грозовых перенапряжений.

Однако ОПН не способен обеспечить надёжную защиту витковой изоляции оборудования от высокочастотных перенапряжений. Это связано с тем, что ОПН не влияют на крутизну фронта воздействующих высокочастотных перенапряжений. Кроме того, для корректной работы ОПН необходимо обеспечивать достаточно маленькое сопротивление заземления устройства, что, например, в условиях вечномёрзлых грунтов требует больших затрат. Известно, что в ряде случаев срабатывание ОПН может привести к повышению крутизны набегающего сигнала.

Таким образом, ОПН снижает уровень грозовых перенапряжений, воздействующих на главную изоляцию оборудования (между обмоткой высокого напряжения и заземленным баком), но не снижает градиентные перенапряжения, воздействующие на продольную изоляцию (между витками).

Наиболее перспективным для защиты витковой изоляции силового оборудования видится применение частотнозависимых защитных устройств основанных на использовании композитных материалов (проводник-диэлектрик, проводник-ферромагнетик и т.д.). Эти устройства могут эффективно подавлять высокочастотные перенапряжения за счёт скин-эффекта. При этом они достаточно компактны, а их работоспособность не зависит от сопротивления грунта.

Несмотря на высокую перспективность этих устройств, следует отметить и ряд вопросов, которые требуют своего решения, для использования частотнозависимых устройств в опытной и промышленной эксплуатации: обеспечение малого омического сопротивления на высоких частотах, анализ информации о возможности применения на других классах напряжений (например, 35 кВ) и об оптимальных габаритах устройств. Поэтому исследования, направленные на решение указанных задач, являются актуальными.

Степень разработанности темы исследования

Вопросами защиты оборудования подстанций от высокочастотных перенапряжений грозовой и коммутационной природы, в том числе разработки устройств на основе скин-эффекта занимались как отечественные, так и зарубежные учёные: Ефимов Б.В., Гумерова Н.И., Селиванов В.Н., Коробейников С.М, Халилов Ф.Х., Суворов Д.В., Гашимов А.Ф., Мехтиев Т.Р., Боргетти А., Пьянтини А., Рашиди Ф. Тем не менее, учитывая глубину проблемы и необходимость внедрения в эксплуатацию средств и методов ограничения перенапряжений на продольной изоляции трансформаторного и реакторного оборудования, исследование и разработка соответствующих защитных устройств по-прежнему остаётся актуальным вопросом.

Целью работы является повышение эффективности устройств для защиты от высокочастотных перенапряжений оборудования подстанций в электрических сетях напряжением 35 – 110 кВ.

Для достижения поставленной цели были сформулированы и решены следующие **задачи**:

- 1) Анализ опасности грозовых воздействий для оборудования подстанций и способов повышения эффективности скин-эффекта.
- 2) Разработка конструкций частотнозависимого устройства (ЧЗУ) и выполнение низковольтных испытаний макетов ЧЗУ для оценки степени увеличения сопротивления при повышении частоты воздействующего напряжения.
- 3) Выполнение сильноточных испытаний макетов ЧЗУ для оценки влияния больших токов на частотнозависимые параметры устройства.
- 4) Расчетные и экспериментальные исследования по оптимизации конструкции ЧЗУ с оценкой возможности управления индуктивностью устройства.

В диссертационной работе использовались как **экспериментальные**, так и **расчётные методы** решения поставленных задач.

Научная новизна работы состоит в следующем:

- 1) проведено экспериментальное сравнение различных способов повышения сопротивления ЧЗУ и подтверждено, что изменением формы проводника в катушке можно добиться повышения сопротивления и индуктивности устройства;
- 2) предложен плоский однослойный профиль проводника ЧЗУ с ферромагнитным покрытием и показана высокая эффективность применения новой формы в конструкции при ориентации плоскости проводника перпендикулярно направлению магнитного поля катушки;
- 3) путём моделирования в системе «Comsol Multiphysics» показана высокая эффективность ЧЗУ в подавлении срезанных импульсов и импульсов обратного

перекрытия, что подтверждено анализом работы ЧЗУ в условиях опытной эксплуатации на подстанции 110 кВ «Сугмутская».

Теоретическая и практическая значимость работы

- показано, что профилированием проводника с ферромагнитным покрытием можно регулировать частотнозависимые характеристики ЧЗУ;
- предложен новый профиль проводника ЧЗУ в катушке, обеспечивающий повышенные параметры индуктивности, активного сопротивления и меньшие массогабаритные характеристики;
- рассмотрена конструкция ЧЗУ для воздушных линий 35 кВ с плоским однослойным проводником с ферромагнитным покрытием и подтверждена её эффективность по сравнению с исполнением ЧЗУ на основе круглого проводника;
- проведены расчёты и анализ влияния геометрических параметров ЧЗУ, позволяющие провести оптимизацию конструкции устройства для воздушных линий 35 кВ и 110 кВ. Данные результаты применены в проекте реконструкции и модернизации подстанции ПС 220/110/35/6 кВ «Факел» филиала «Нижневартовские электрические сети» АО «Россети-Тюмень», что подтверждается актом внедрения;
- путем анализа мониторинга работы ЧЗУ в условиях опытной эксплуатации на подстанции «Сугмутская» и моделирования его работы подтверждено подавление высоковольтных срезанных грозовых импульсов (снижение амплитуды, растягивание фронта), импульсов обратного перекрытия.

Основные положения, выносимые на защиту:

- 1) использование плоского однослойного профиля проводника в конструкции частотнозависимого устройства позволяет получить наибольшие значения высокочастотного сопротивления;
- 2) частотнозависимое устройство наиболее эффективно при подавлении срезанных грозовых импульсов и импульсов обратного перекрытия;
- 3) частотнозависимое устройство имеет высокое сопротивление на высоких частотах при протекании токов до 1,2 кА.

Личный вклад автора

Научные результаты, представленные в диссертации, получены автором. Постановка цели работы и задач выполнены совместно с научным руководителем Коробейниковым С.М. Все экспериментальные исследования и расчётные оценки выполнены автором. Компьютерное моделирование поведения ЧЗУ выполнено совместно с Коробейниковым С.М., Емельяновой О.О., Кривошеевым С.И., Магазиновым С.Г.

Апробация работы

Результаты были представлены на 13 научных конференциях, в том числе: Международный энергетический форум 47 CIGRE SESSION, Paris, France, 2018; 21-я и 22-я Международные конференции «IEEE International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials» EDM, 2021 и 2022; Научно-практическая конференция «Силовые трансформаторы – производство, эксплуатация, диагностика и ремонт. Общие вопросы диагностирования и

эксплуатации электрооборудования», Екатеринбург, 2021; XV Международная научно-техническая конференция «Actual Problems Of Electronic Instrument Engineering» АРЕІЕ, Новосибирск, 2021; 7-я Российская конференция по молниезащите, Санкт-Петербург, 2022.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 9 печатных научных работ, из них 4 статьи в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 4 статьи в журналах, индексируемых в наукометрических базах данных Scopus / Web of Science. Получено свидетельство на программу для ЭВМ. Получен патент на полезную модель.

Структура и объём работы

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы, включающего 127 наименований и 4 приложений. Общий объём работы составляет 126 страниц, включая 78 рисунков и 29 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цели и задачи работы, обозначен метод исследования, изложены сведения о научной новизне и практической значимости, приведены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен обзор данных по количеству технологических нарушений, связанных с влиянием грозовой активности на отказы в сетях «Красноярскэнерго» и МЭС Юга с воздушными линиями и подстанциями напряжением 35-110 кВ. Показано, что молниевые поражения и коммутационные процессы в этих сетях являются источниками высокочастотных перенапряжений, представляющих опасность для межвитковой изоляции обмоток силовых трансформаторов.

Выполнен анализ существующих способов защиты от грозовых и коммутационных перенапряжений и отмечено, что основная часть защитных устройств ориентирована на снижение амплитуды перенапряжений прямого перекрытия, например, при воздействии полных грозовых импульсов. Однако указанные средства, преимущественно ОПН, слабо ограничивают высокочастотные перенапряжения. В связи с этим в настоящей работе предлагается продолжить развитие устройств, работающих на принципе скин-эффекта, для обеспечения надежной защиты оборудования от высокочастотных перенапряжений.

Во второй главе представлены результаты разработки и низковольтных испытаний образцов проводников ЧЗУ с различными характеристиками, формой и конструкцией и сопоставление результатов испытаний. Первая серия испытаний проводилась при протекании через образцы высокочастотного переменного тока, вторая – при воздействии на них высокочастотных импульсов.

Для проведения измерений применялась схема, показанная на рисунке 1 и включающая генератор сигналов, макет ЧЗУ, низкоиндуктивный шунт (в качестве шунтов применялись одиночные резисторы ТВО или спаянные наборы сопротивлений, эквивалентным номиналом 3, 1, 0,1 Ом). В качестве источника

высокочастотных сигналов применялся генератор SFG-2010, регистрация выполнялась с помощью цифрового осциллографа DS1022C.

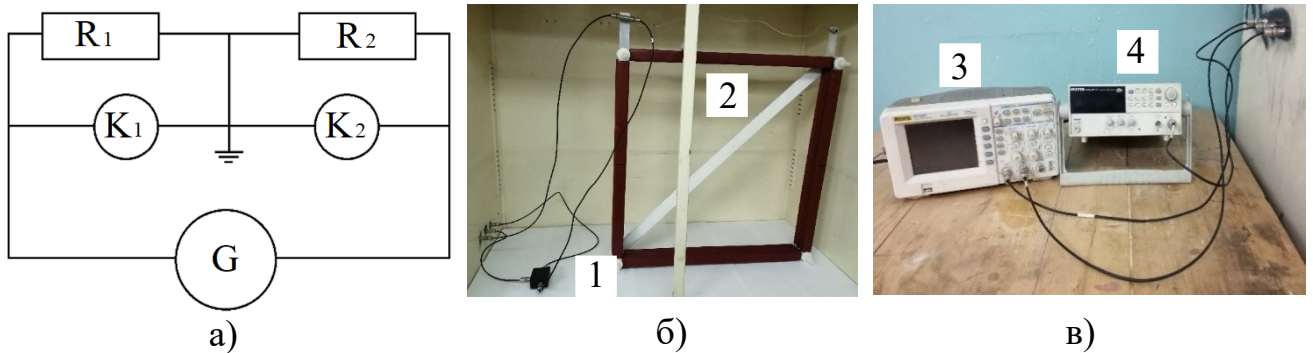


Рисунок 1 – Принципиальная схема (а, где R_1 , R_2 , – низкоиндуктивный шунт и макет ЧЗУ, K_1 , K_2 – щупы осциллографа, G – генератор высокочастотных сигналов) и внешний вид измерительной установки, размещенной частично в измерительном шкафу (б, где 1 – низкоиндуктивный шунт, 2 – макет ЧЗУ) и вне шкафа (в, где 3 – осциллограф, 4 – генератор сигналов)

На первом этапе оценивалась возможность улучшения характеристик существующего провода круглого сечения в ЧЗУ путём намотки медной проволоки на проводник. Идея заключалась в создании с помощью намотки магнитного поля, которое должно усиливать скин-эффект, за счёт вдавливания тока внутрь проводника. Однако у образца с намоткой не наблюдалось интенсивного роста активного или реактивного сопротивления. В результате был сделан вывод, что добавочная намотка на провод с лентой 5БДСР не приносит увеличения сопротивления.



а) б) в) г)

Рисунок 2 – Образцы для низковольтных испытаний

Были проведены эксперименты по оценке эффективности круглых частотнозависимых проводников различной конструкции на примере четырёх образцов токопроводящего провода из алюминия (рисунок 2). Образцы длиной 240 мм и эквивалентной площадью сечения 300 мм^2 представляли собой:

- витой провод (а), имитирующий фазные провода воздушной линии;
- алюминиевый стержень с вырезанными продольными бороздами глубиной 2 мм и шириной 1 мм, в количестве 5 шт. (б);
- гладкий алюминиевый стержень (в);
- алюминиевый стержень с нанесённым на него витками проводника (г), имитирующий катушку (для подтверждения результатов предыдущего эксперимента с намоткой).

В результате измерений было выявлено, что наибольшие значения полного и активного сопротивления наблюдаются у образцов (1) и (2), имеющих максимально неоднородную поверхность (рисунок 3). Это связано с повышением плотности тока

на выступающих частях проводника. Ясно, что для применения в ЧЗУ необходимо добиться увеличения неоднородности плотности тока, то есть сконцентрировать ток на меньшей площади сечения. Одним из способов решения этой задачи является применение плоских проводников (прямоугольного сечения).

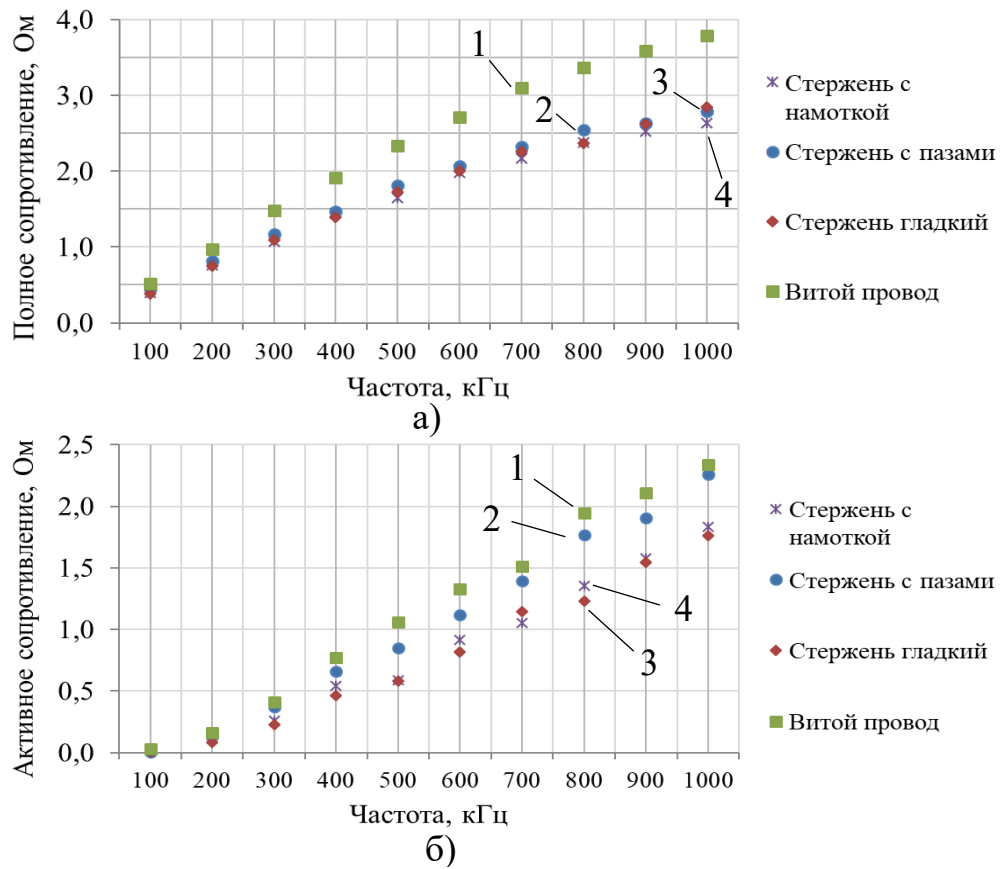


Рисунок 3 – Зависимости полного и активного сопротивления от частоты: 1 – витой провод; 2 – стержень с пазами; 3 – гладкий стержень; 4 – стержень с намоткой

Выполненное ранее компьютерное моделирование показало, что наибольший рост активного сопротивления от частоты достигается формой провода, представленной на рисунке 4 (а) (рост сопротивления составляет 11 000 раз: на 50 Гц – 0,16 мОм, на 300 кГц – 1,76 Ом). Для сравнения, у круглого провода (б) рост сопротивления составляет 1 600 раз: 50 Гц – 0,19 мОм, 300 кГц – 0,32 Ом).

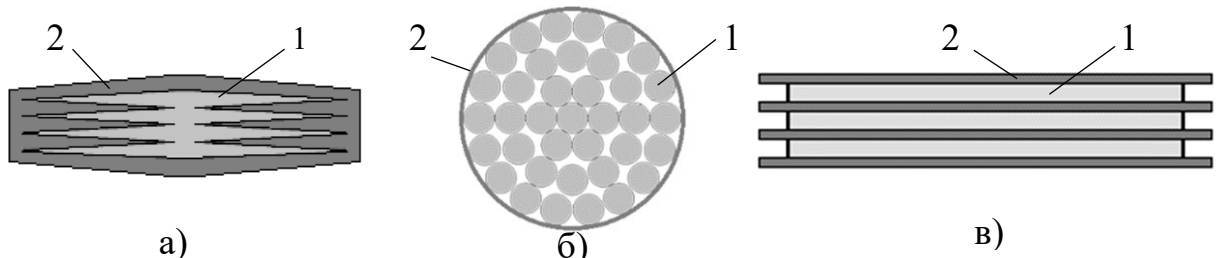


Рисунок 4 – Формы частотнозависимых проводов: а – форма проводника, обеспечивающая наибольший рост сопротивления от частоты; б – круглая форма проводника; в – конструкция многослойного проводника типа (1 – токоведущий проводник; 2 – ферромагнитный материал)

Однако данная форма проводника обладает недостаточной механической прочностью и низкой технологичностью как при изготовлении, так и при сборке конструкции в катушку. В связи с этим для обеспечения технологичности и необходимой прочности провода была предложена новая форма проводника (рисунок 4 в), представляющая собой многослойную конструкцию из чередующихся слоев проводника и ферромагнитного материала. Хотя значение формы проводника в задаче конструирования частотнозависимых устройств отмечалось и ранее, следует отметить, что приведенная конструкция многослойного провода предложена впервые.

Для оценки эффективности предложенной формы проводника, а именно – оценки увеличения его сопротивления на высоких частотах, были изготовлены макеты провода ЧЗУ круглой и многослойной плоской конструкции (рисунки 5 и 6 соответственно).

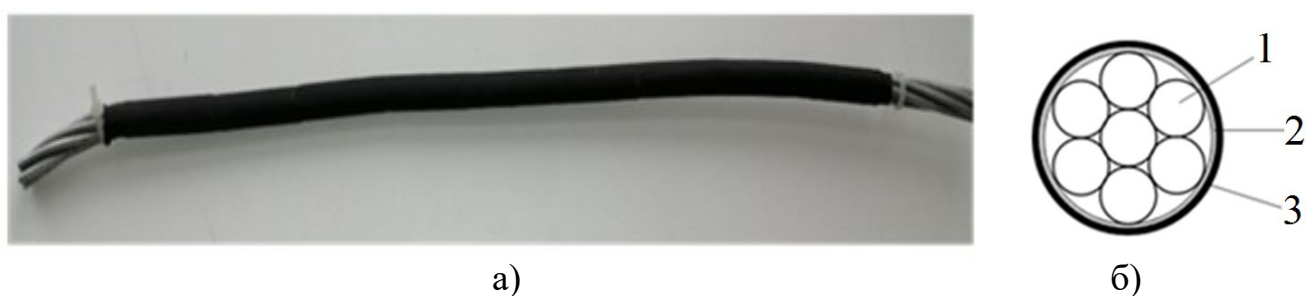


Рисунок 5 – Макет круглого проводника: а) фотография образца, б) эскиз конструкции проводника в поперечном сечении (1 – алюминиевый проводник, 2 – ферромагнитный слой, 3 – диэлектрический защитный слой)



Рисунок 6 – Макет плоского многослойного проводника: а) фотография образца, б) эскиз конструкции проводника в поперечном сечении (1 – алюминиевый проводник, 2 – ферромагнитный слой)

Показанный на рисунке 5 проводник ЧЗУ представляет собой трехсоставный коаксиальный провод, в котором несущей основой служит стандартный алюминиевый провод площадью сечением 95 мм^2 . На него нанесен слой ферромагнитной ленты 5БДСР толщиной 0,3 мм. Внешняя оболочка, которая защищает ферромагнитный слой от внешних механических и климатических воздействий, создается с помощью термоусаживаемой трубки.

Плоский многослойный макет проводника, показанный на рисунке 6, состоит из шести слоев алюминиевого проводника, чередующихся с семью слоями ферромагнитной ленты 5БДСР. Каждый слой проводника имеет толщину 0,3 мм и ширину 50 мм, а каждый ферромагнитный слой – толщину 0,3 мм и ширину 60 мм. Ферромагнитный материал выступает по краям на 5 мм с каждой стороны, что, как

предполагается, должно было повысить сопротивление проводника за счет прохождения части тока в тонком ферромагнитном слое. Для сохранения формы макета использовались сжимающие конструкции из фанеры.

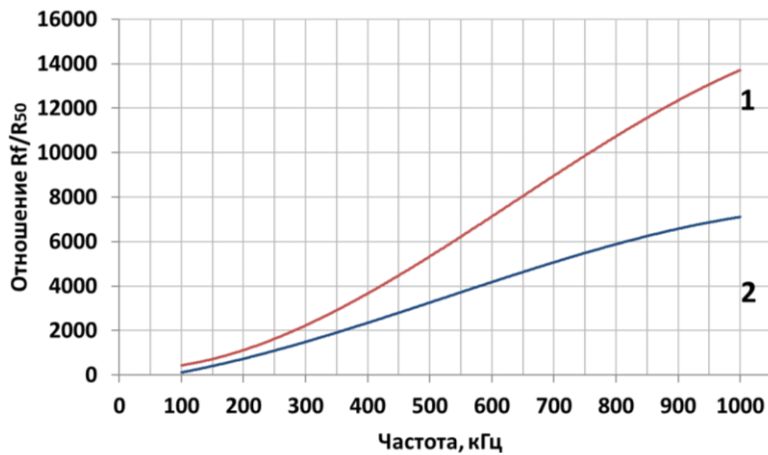


Рисунок 7 – Результаты испытаний: 1 - многослойный проводник; 2 - круглый проводник

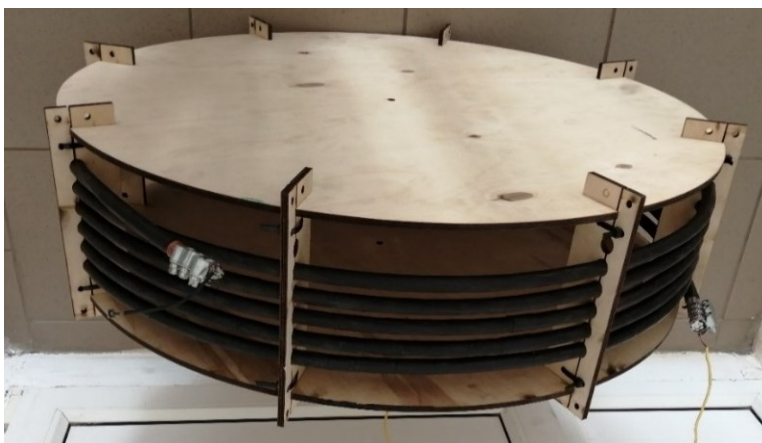
Оба проводника в опытах имели алюминиевую токопроводящую часть длиной 0,7 метра и сечением 95 мм². Сравнение роста активного сопротивления макетов проводника ЧЗУ (рисунок 7) показало, что многослойный проводник демонстрирует более высокий рост активного сопротивления с увеличением частоты сигнала, что видно уже на частотах 200–300 кГц. На характерных частотах

коммутационных перенапряжений (~1 МГц) активное сопротивление многослойного образца более чем в 1,7 раза превышает сопротивление круглого образца.

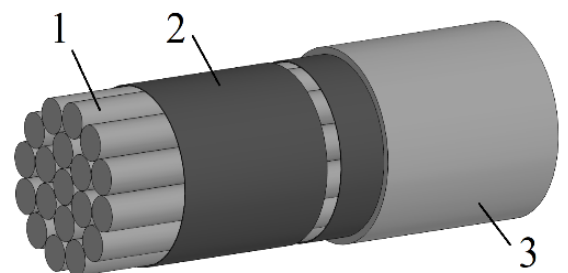
Были проведены эксперименты по исследованию оптимального положения ЧЗУ в катушке, которые показали, что расположение проводника плоскостью перпендикулярно оси катушки повышает активное сопротивление до 1,5 раз по сравнению с расположением проводника плоскостью параллельно оси катушки.

На основе полученных результатов было решено изготовить макеты ЧЗУ:

- с круглым проводником, представляющим собой катушку с 6 витками с проводом А-95 с нанесенным на него слоем ферромагнитной ленты 5БДСР (толщиной 0,3 мм), расстоянием между витками 6 мм (рисунок 8);



а)



б)

Рисунок 8 – ЧЗУ с круглым проводом: а) фотография макета; б) вид частотнозависимого проводника: 1 – токопроводящий материал; 2 – ферромагнитная лента; 3 – термоусаживаемая трубка

- с плоским многослойным проводником, представляющим собой катушку с 6 витками с многослойным алюминиевым проводником. Проводник представляет собой 6 слоев алюминиевой ленты толщиной 0,3 мм, шириной 60 мм, между слоями которых расположены 12 слоев ферромагнитной ленты общей толщиной 0,3 мм. Плоскость проводника располагается перпендикулярно оси катушки (рисунок 9);

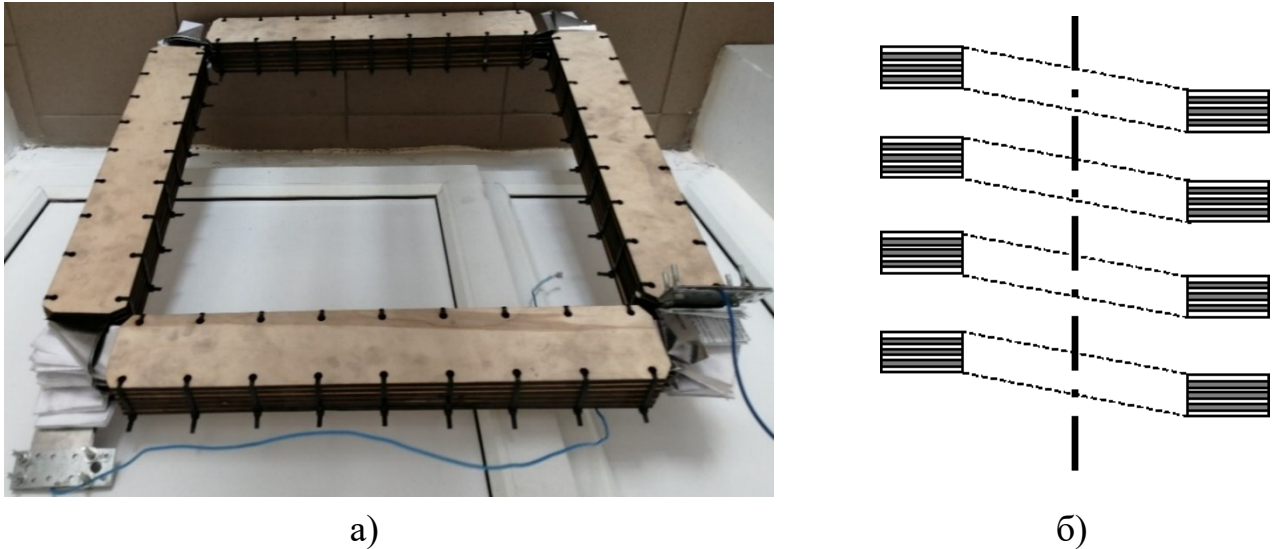


Рисунок 9 – ЧЗУ с плоским многослойным проводником: а) фотография образца, б) схема расположения слоев проводника

Также был подготовлен образец без ферромагнитной ленты для проверки влияния индуктивности на эффективность подавления высокочастотных импульсов. Он представлял собой провод А-95, смотанный в катушку с 6-ю витками, с расстоянием между витками 6 мм (рисунок 10).

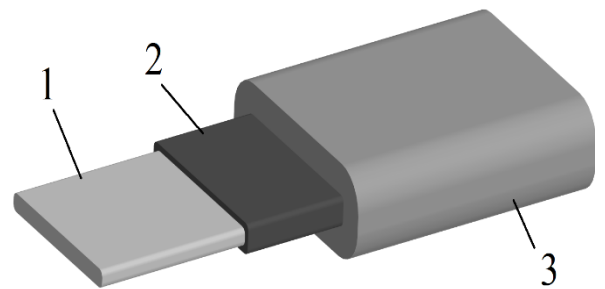


Рисунок 10 – Образец без ферромагнитной ленты для сравнения (макет силового реактора)

В процессе работы была проверена гипотеза, что плоский однослойный проводник в виде катушки прямоугольного профиля (рисунок 11) с нанесённым на него ферромагнитным и изоляционным материалом будет обладать лучшими параметрами.



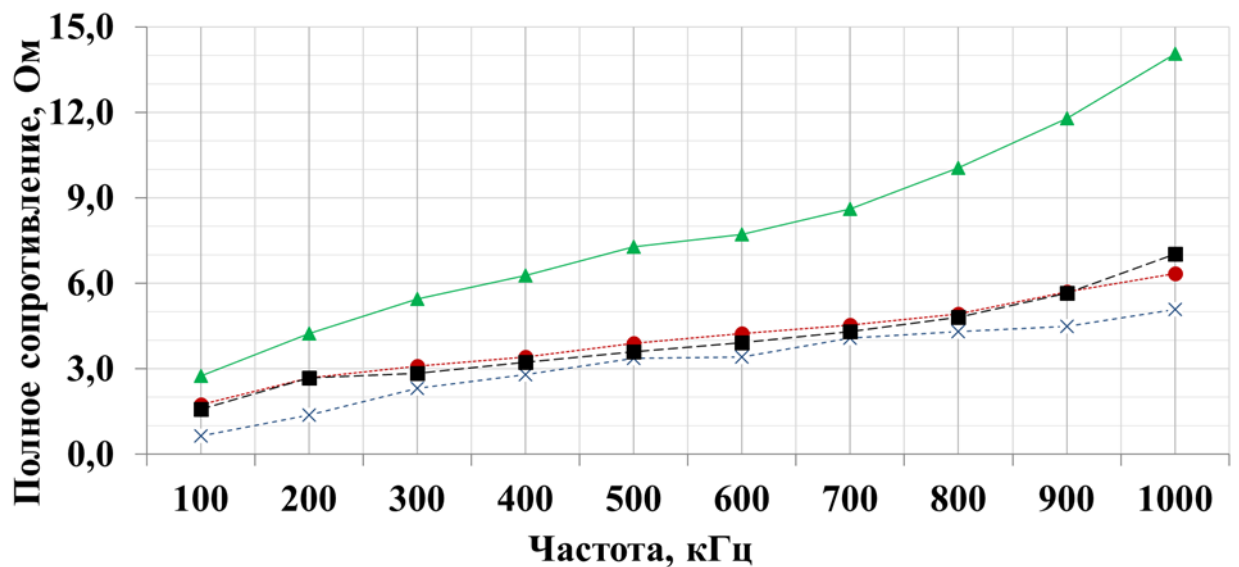
а)



б)

Рисунок 11 – ЧЗУ с плоским однослойным проводником: а) фотография макета; б) вид частотнозависимого проводника: 1 – токопроводящий материал; 2 – ферромагнитная лента; 3 – термоусаживаемая трубка

Для образца ЧЗУ с плоским однослойным проводником в рамках оценки влияния шага намотки на рост сопротивлений были проведены две серии измерений, отличающиеся разным расстоянием между витками (6 и 9 мм). Полученные результаты представлены на рисунке 12.



- ЧЗУ с круглым проводником (6 мм между витками)
- × ЧЗУ с плоским многослойным проводником (6 мм между витками)
- ▲ ЧЗУ с плоским однослойным проводником (6 мм между витками)
- ЧЗУ с плоским однослойным проводником (9 мм между витками)

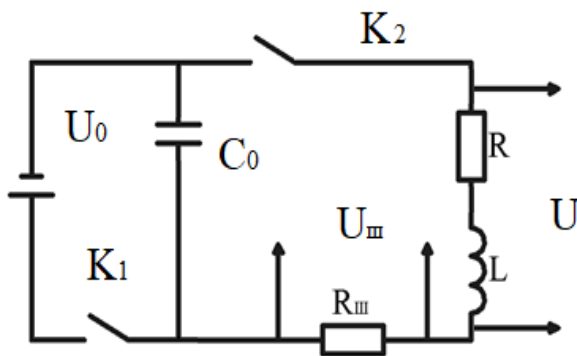
Рисунок 12 – Полное сопротивление макетов ЧЗУ разной конструкции

Исследования показали, что на всем диапазоне частот образец ЧЗУ с плоским однослойным проводником, с расстоянием между витками 6 мм, имеет большие показатели полного, чем образец ЧЗУ с круглым проводником, примерно на 20 % на частотах 200-300 кГц, и с ростом частоты сигнала разница растет до 50 %. При этом ЧЗУ с плоским однослойным проводником, с расстоянием между витками 9 мм, имеет меньшее сопротивление, чем соответствующий образец ЧЗУ с круглым проводником.

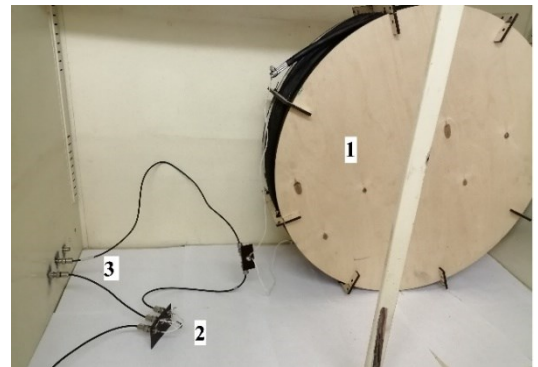
Для импульсных экспериментов применялась следующая схема измерения, состоящая из двух электрических цепей с общим конденсатором (рисунок 13):

- одна, заряжающая цепь, состоящая из последовательно соединенного источника постоянного тока, ключа K_1 и конденсатора C_0 ;
- вторая, измерительная цепь, состоящая из конденсатора C_0 , ключа K_2 , шунта $R_{ш}$ (0,5 Ом) и испытываемого образца ЧЗУ имеющего сопротивление R и индуктивность L .

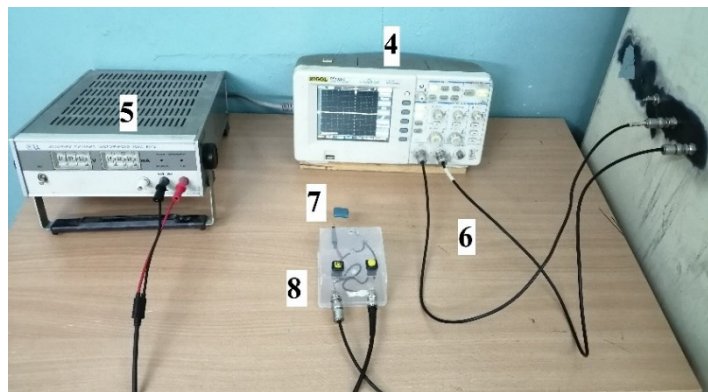
Для измерения напряжения на шунтирующем сопротивлении ($U_{ш}$) и образце (U), применялся цифровой осциллограф Rigol 1022C.



а)



б)



в)

Рисунок 13 – Принципиальная схема (а, где C_0 – конденсатор, K_1 , K_2 ключи для замыкания схемы зарядки и схемы измерения соответственно, $R_{ш}$, – низкоиндуктивный шунт и макет ЧЗУ, R и L сопротивление и индуктивность ЧЗУ) и внешний вид измерительной установки, размещенной частично в измерительном шкафу (б, где 1 – макет ЧЗУ, 2 – низкоиндуктивный шунт, 3 – соединительные кабели) и вне шкафа (в, где 4 – осциллограф, 5 – источник напряжения, 6 – соединительные кабели, 7 – конденсатор, 8 – ключи для замыкания схемы зарядки и схемы измерения)

Для определения активного сопротивления образцов ЧЗУ применялся способ, основанный на определении добротности Q колебательного контура, состоящего из образца ЧЗУ, емкости и шунтирующего сопротивления. Следует отметить, что при измерениях из-за неодинаковых значений ёмкости и индуктивности образцов регистрировались сигналы различной частоты. После приведения полученных данных к 1 метру длины проводника, были получены результаты, представленные на рисунке 14.

Для проверки полученных зависимостей были проведены серии измерений образцов с помощью RLC-метра АМ-3002 на 5 частотах (100 Гц, 120 Гц, 1 кГц, 10 кГц, 100 кГц). Сопоставление полученных разными методами данных подтвердило, что полученные результаты близки между собой.

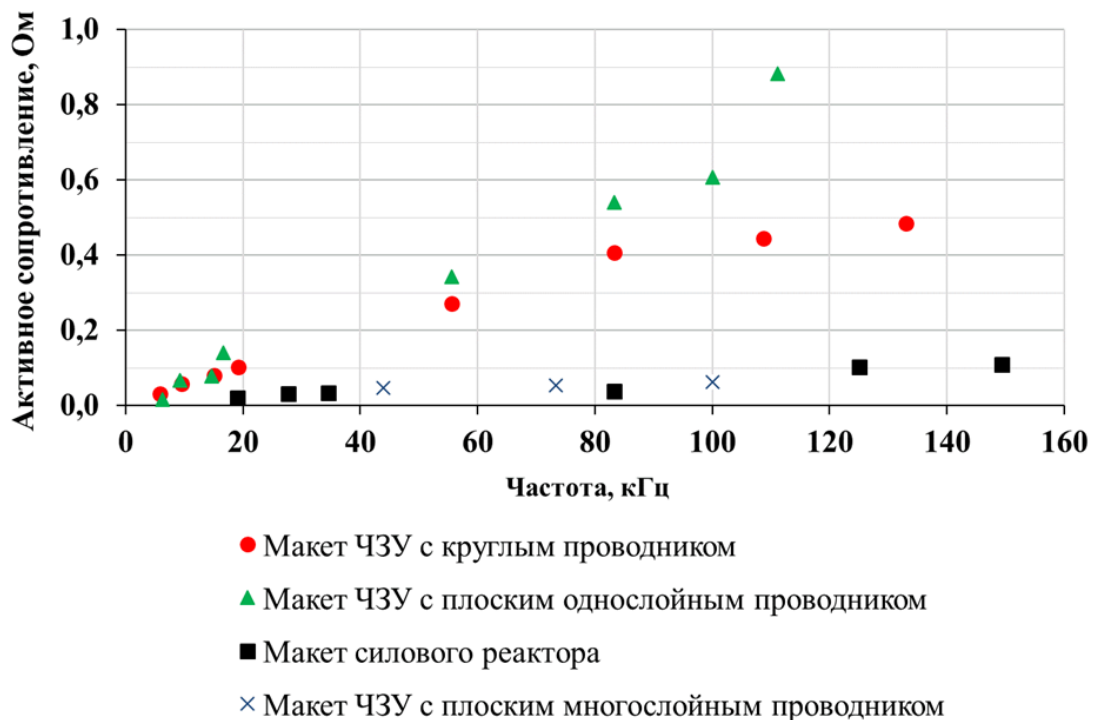


Рисунок 14 – Приведенное к единой длине образцов сопротивление на различных частотах

Результаты импульсных измерений показывают, что конструкция ЧЗУ с плоским многослойным проводом уступает в росте активного сопротивления ЧЗУ с круглым проводом, следовательно, необходимо внести изменения в конструкцию плоского провода. Было принято решение уменьшить ширину проводящего слоя, чтобы ферромагнитные слои образовывали выступающие края, это должно повысить рост активного сопротивления ЧЗУ с плоским многослойным проводом от частоты.

В рамках импульсных испытаний было подтверждено, что применение конструкции ЧЗУ с плоским однослойным проводником, позволяет повысить степень увеличения активного сопротивления по сравнению с ЧЗУ на основе круглого проводника.

Аналогичный вывод подтвержден с помощью измерения добротности макетов ЧЗУ RLC-метром. Добротность ($Q = 8$) макета ЧЗУ с плоским однослойным проводником на частоте 100 кГц ниже, чем у макета ЧЗУ с круглым проводником

($Q = 11$) и значительно ниже, чем у макета силового реактора ($Q = 45$). Это подтверждает нецелесообразность применения силовых реакторов в качестве защитного оборудования, по сравнению с применением любой конструкции ЧЗУ, а также показывает необходимость обеспечения повышенных значений активного сопротивления ЧЗУ.

В третьей главе представлены и проанализированы результаты сильноточных испытаний образцов ЧЗУ. Для измерений была использована схема, показанная на рисунке 13 а) и аналогичная схеме, использованной ранее в импульсных испытаниях, за исключением наличия делителя напряжения.

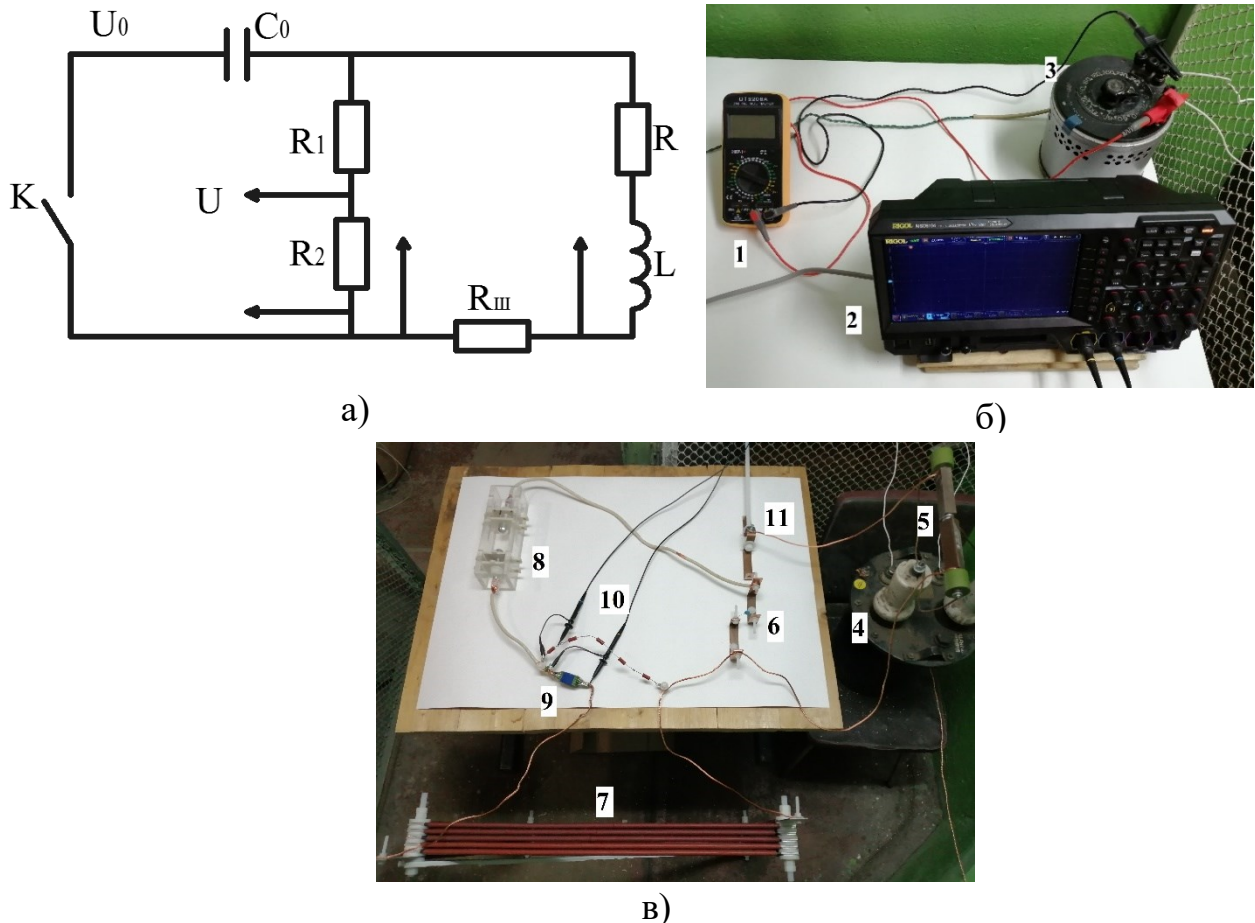


Рисунок 15 – Принципиальная схема сильноточных испытаний (а, где C_0 – конденсатор, K ключ для замыкания схемы измерения, $R_{ш}$ – низкоиндуктивный шунт и макет ЧЗУ, R и L сопротивление и индуктивность ЧЗУ, R_1 и R_2 – сопротивление верхнего и нижнего плеча делителя напряжения) и внешний вид измерительной установки, размещенной частично в измерительном шкафу (б, где 1 – мультиметр для контроля напряжения на ЛАТРе; 2 – осциллограф; 3 – ЛАТР) и вне шкафа (в, где 4 – повышающий трансформатор; 5 – удвоитель-выпрямитель; 6 – конденсатор; 7 – образец ЧЗУ; 8 – разрядник для замыкания цепи с образцом ЧЗУ; 9 – шунт малоиндуктивный, 0,5 Ом; 10 – измерительные щупы от шунта и нижнего плеча делителя; 11 – ключ цепи зарядки конденсатора)

Для создания импульса использовались керамические конденсаторы емкостью 4,7 и 15 нФ, ЛАТР-1М и повышающий трансформатор высокого напряжения НОМ

10 с коэффициентом трансформации, равным 100. Методика измерений также идентична использованной при низковольтных импульсных испытаниях (рисунок 13).

Целью сильноточных испытаний являлась оценка влияния протекающего тока через образцы ЧЗУ на активное сопротивление и, по возможности, определение значений токов насыщения на различных частотах. Макеты, на которых проводились эксперименты, были использованы ранее для проведения низковольтных измерений на переменном и импульсном напряжении: ЧЗУ с круглым проводником (рисунок 8), ЧЗУ с однослойным плоским проводником (рисунок 11).

Для каждого образца ЧЗУ, для каждой частоты полученных импульсов (140 кГц, 280 кГц и 300 кГц для образца с круглым проводником и 130 кГц, 250 кГц и 280 кГц для образца с плоским однослойным проводником) были проведены по три серии измерений с повышением напряжения на конденсаторе и соответственно с ростом получаемых токов. На рисунке 16 представлены полученные экспериментально зависимости средних значений сопротивлений образцов ЧЗУ от амплитуды протекающего импульсного тока.

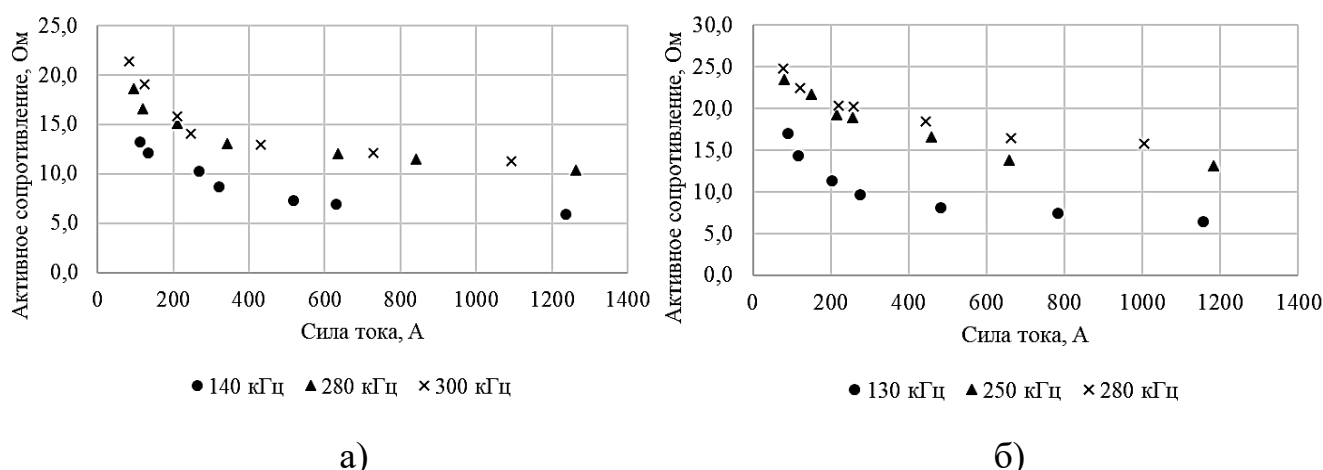


Рисунок 16 – Усреднённые значения активного сопротивления ЧЗУ с круглым проводником от проходящего тока на различных частотах: а) для ЧЗУ с круглым проводником; б) для ЧЗУ с плоским однослойным проводником

Сопоставление результатов низковольтных и сильноточных измерений показало качественное соответствие результатов друг другу. Сопротивление увеличивается с ростом частоты, значения сопротивлений близки. Детальное сравнение затруднительно, поскольку частоты колебаний при сильноточных измерениях превышают полученные при низковольтных (слаботочных) измерениях.

Как видно из приведенных на рисунке 16 результатов измерений, при росте тока происходит уменьшение активного сопротивления проводника. Падение сопротивления, с ростом тока, может иметь две составляющие:

- падение сопротивления канала искрового разряда с ростом тока;
- насыщение ферромагнитного материала, нанесенного на проводник, с ростом протекающего тока.

Ранее подобный эффект был зафиксирован при проведении сильноточных испытаний в рамках разработки ЧЗУ с круглым проводником. При увеличении тока

вплоть до 9 кА полный переход тока в алюминиевую часть проводника все еще не был достигнут, сопротивление образцов оставалось как минимум на 2 порядка выше сопротивления алюминиевой части проводника. Следует отметить, что снижение сопротивления при росте тока меньше в случае больших частот. Возможно, это указывает на тот факт, что зона насыщения ферромагнетика при более высокой частоте не успевает вырасти за половину периода воздействия до размеров толщины ферромагнитного материала. Следовательно, при импульсах большой частоты активное сопротивление защитного устройства будет оставаться достаточно высоким для обеспечения подавления высокочастотных сигналов.

Оценка токов насыщения ферромагнитного материала свидетельствует, что в сложной конструкции ЧЗУ на отдельных участках ферромагнитного материала насыщение может начинаться при токах порядка 100 А. Но в большинстве случаев для полного насыщения всего ферромагнетика в составе ЧЗУ потребуются токи в единицы килоампер.

В четвёртой главе приведены результаты анализа мониторинга ЧЗУ с круглым проводником, компьютерного моделирования и оценки защитных характеристик ЧЗУ при воздействии высокочастотных перенапряжений. Для оптимизации параметров ЧЗУ выполнены расчёты его индуктивности, а также даны показатели электродинамической и термической устойчивости устройства при больших токах.

В 2014 году на ПС 110 кВ «Сугмутская» было установлено три частотно-зависимых устройства со стороны питающих ВЛ 110 кВ. Измерения напряжения производились как в точке до ЧЗУ, т.е. со стороны линии, так и после ЧЗУ – со стороны подстанции. С помощью разработанной системы мониторинга в течение грозового периода 2017 года были зарегистрированы множественные импульсы перенапряжения различной природы, примеры которых представлены на рисунке 17.

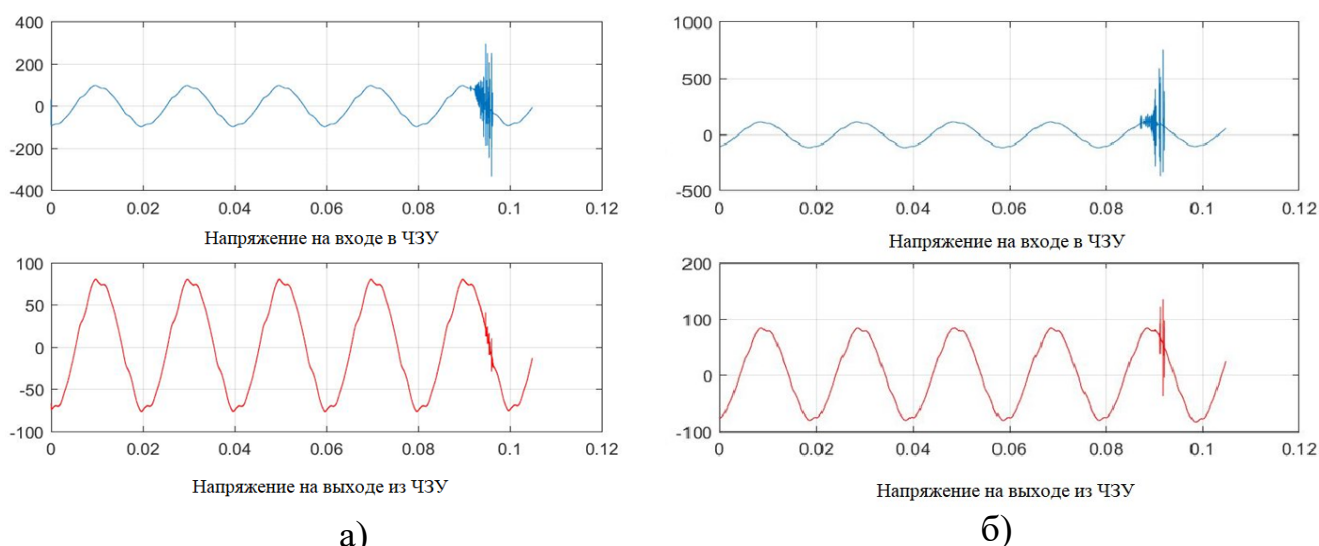


Рисунок 17 – Импульсы перенапряжений на ПС 110 кВ «Сугмутская» за грозовой сезон 2017 г.: а) 18.05.17 в 19:25; б) 31.05.17 в 18:59

Результаты мониторинга свидетельствуют, что ЧЗУ снижает амплитуду высокочастотных импульсов (более чем в 4-5 раз), защищая подстанционное оборудование от перенапряжений. С начала опытной эксплуатации ЧЗУ на ПС

«Сугмутская» в 2014 году до настоящего времени не было зафиксировано ни одного случая отключения ВЛ-110 кВ из-за воздействия грозových или иных перенапряжений, что может также являться косвенным подтверждением эффективности ЧЗУ как средства подавления высокочастотных перенапряжений. Следует отметить, что природа набегающих импульсов с ВЛ не была точно установлена. Предполагается, что большинство импульсов перенапряжения имели коммутационное происхождение, что оставило открытым вопрос об эффективности воздействия ЧЗУ на полный грозовой импульс.

Для оценки эффективности воздействия ЧЗУ на полный грозовой импульс, совместно с сотрудниками Санкт-Петербургского Политехнического университета Петра Великого (Кривошеевым С. И. и Магазиновым С. Г.) было выполнено компьютерное моделирование воздействия полных грозových импульсов и импульсов обратного перекрытия на трансформатор при использовании ЧЗУ в качестве защитного оборудования. Моделирование производилось с помощью пакета приложений «COMSOL Multiphysics». В компьютерной модели с помощью программных средств реализован стандартный грозовой импульс 1,2/50 мкс, также симулировалось воздействие на трансформатор срезанного грозowego импульса.

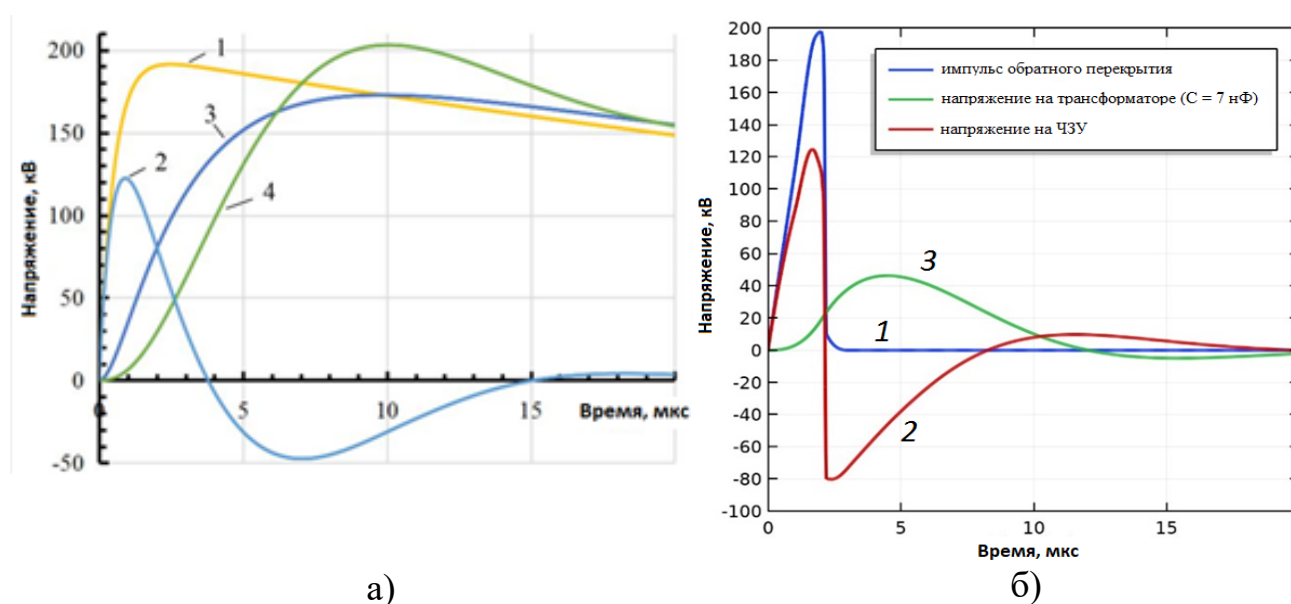


Рисунок 18 – Зависимости напряжения от времени: а) моделирование грозowego импульса: 1 – грозовой импульс; 2 – напряжение на ЧЗУ; 3 – напряжение на трансформаторе при отсутствии ЧЗУ; 4 – напряжение на трансформаторе при наличии ЧЗУ; б) моделирование короткого импульса: 1 – «короткий» импульс обратного перекрытия; 2 – напряжение на ЧЗУ; 3 – напряжение на трансформаторе при наличии ЧЗУ

Полученные результаты показали, что ЧЗУ оказывает незначительное влияние на полный грозовой импульс: сам импульс после прохождения ЧЗУ удлиняется, немного уменьшается его крутизна, однако возрастает амплитуда (рисунок 18 а, кривая 4). В то же время ЧЗУ значительно влияет на «короткие» импульсы: сильно сокращая амплитуду, растягивая фронт импульса и уменьшая крутизну, делая его

относительно безопасным для витковой изоляции обмоток трансформаторного оборудования (рисунок 18 б, кривая 3).

Учитывая полученные результаты, можно показать, что наиболее эффективным для подавления как полных, так и срезанных грозовых импульсов будет совместное применение ОПН и ЧЗУ: ОПН позволит надёжно снизить амплитуду перенапряжения, а ЧЗУ сможет демпфировать возникающие импульсы с крутым фронтом (срезанные и импульсы обратного перекрытия).

Была проведена оценка влияния толщины скин-слоя, геометрических параметров конструкции, шага намотки ЧЗУ на его индуктивность, с целью получения максимально возможных значений индуктивности. В расчёте для ЧЗУ 35 кВ использовались параметры провода А-95, диаметром 12,3 мм и А-150 диаметром 15,8 мм для ЧЗУ 110 кВ.

Расчёты показали, что наибольшие значения индуктивности достигаются при диаметре катушки в диапазоне от 1000 мм до 1400 мм. Стоит отметить, что при увеличении диаметра индуктивность катушки будет расти быстрее активного сопротивления. Также было показано, что шаг намотки незначительно влияет на индуктивность.

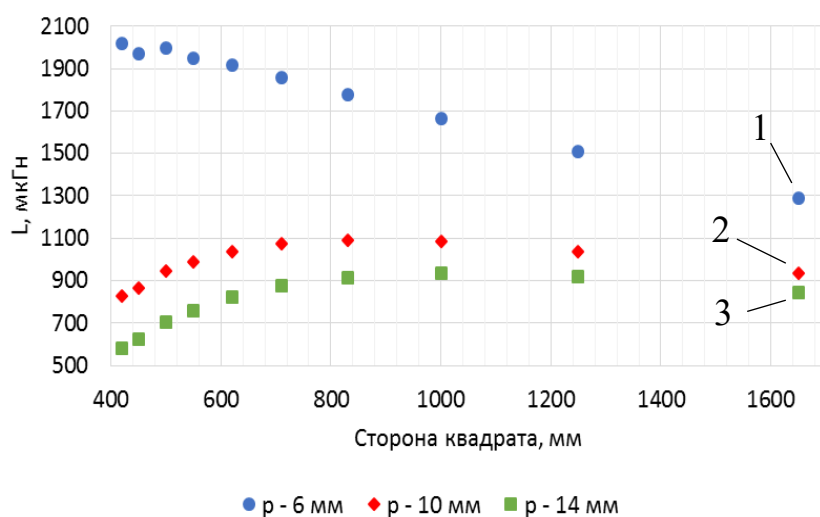


Рисунок 19 – Зависимость индуктивности квадратной катушки от размера стороны, для: 1 – бесконечно тонкой изоляции; 2 – изоляции толщиной 3,5 мм; 3 – изоляции 7 мм

Был проведен расчет индуктивности ЧЗУ с плоским однослойным проводником (рисунок 19). В результате показано, что максимальная индуктивность достигается при сторонах квадратной катушки 700-1000 мм. Результаты расчетов позволяют подбирать оптимальные размеры катушек, как квадратной, так и круглой формы, в зависимости от возможных габаритов места установки.

Важно отметить, что индуктивность квадратной

катушки с плоским однослойным проводником получилась выше индуктивности круглой катушки с круглым проводником при одной и той же длине провода на 20 % (900 мкГн у круглой к 1100 мкГн у квадратной). При этом длина намотки (при расположении катушки вертикально – высота без учета арматуры) у квадратной катушки в 2 раза меньше (240 мм против 540 мм у круглой катушки). Это снижает ветровую нагрузку на устройство и делает его более компактным.

Также были проведены оценки необходимой толщины ферромагнитного слоя с учётом насыщения ферромагнитного материала, механической прочности и технологических условий нанесения покрытия. В результате было принято решение использовать ферромагнитный слой толщиной не менее 0,3 мм.

Дополнительно были проведены оценки термической устойчивости устройства и ферромагнитного материала под действием токов короткого замыкания и грозových импульсов. Показано, что кратковременный нагрев не приводит к разрушению устройства и необратимому изменению свойств ферромагнитной ленты.

Проведена оценка электродинамической устойчивости ЧЗУ к действиям токов короткого замыкания до 30 кА и показано, что при различных конструктивных исполнениях разрушения устройства не произойдет. За счёт особенностей разработанной конструкции ЧЗУ обеспечивается значительный запас по его механической прочности, что по предварительным оценкам позволяет выдержать электродинамические усилия при токах КЗ значением до 30 кА и токах грозового импульса амплитудой до 100 кА.

В приложении к диссертации представлены акт внедрения результатов исследования, патент на полезную модель, свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В ходе диссертационной работы получены основные результаты:

1. Проведён анализ отечественной и зарубежной литературы, который показал, что задача надежной защиты электрооборудования от высокочастотных перенапряжений грозовой и коммутационной природы актуальна, но может быть решена применением частотнозависимых устройств.

2. Проведено сравнение различных способов повышения активного сопротивления на высоких частотах ЧЗУ и показано, что управление формой проводника является наиболее эффективным способом повышения полного сопротивления защитного устройства.

3. Показано, что с увеличением тока снижается активное сопротивление образцов ЧЗУ. При токах до 1,2 кА сопротивление уменьшается незначительно, менее чем в 2 раза, на три порядка превышая сопротивление проводника без ферромагнитного материала. Это означает, что активное сопротивление образцов ЧЗУ на частотах в диапазоне 100-300 кГц слабо зависит от значений протекающего тока.

4. Предложен плоский однослойный профиль проводника и показана высокая эффективность применения новой формы в конструкции ЧЗУ. На основании применения этого профиля предложена новая конструкция защитного устройства с плоским однослойным проводником с повышенными индуктивностью и активным сопротивлением, меньшими массогабаритными параметрами, которая будет использована для защиты витковой изоляции трансформаторного оборудования напряжением 35 кВ.

5. Выполнен анализ результатов мониторинга работы ЧЗУ в условиях опытной эксплуатации на подстанции «Сугмутская», который показал, что ЧЗУ способно снижать амплитуду высокочастотных перенапряжений более чем в 4 раза. Это подтверждено моделированием работы ЧЗУ в системе «Comsol Multiphysics».

6. Для использования в конструировании и изготовлении ЧЗУ выполнены расчёты индуктивности ЧЗУ с круглым и плоским однослойным проводниками для применения на ПС 35 кВ и 110 кВ. Проведены расчеты термической и

электродинамической устойчивости ЧЗУ с круглым и плоским однослойным проводником. Полученные результаты будут использованы при производстве и проектировании ЧЗУ, что подтверждается актом внедрения в АО «Россети Тюмень».

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Проблемы грозоупорности линий электропередачи и подстанций в районах крайнего севера. АО «Тюменьэнерго» / Н. Я. Илюшов, С. М. Коробейников, В. А. Ломан, Е. А. Скрябина, Ю. А. Лавров, В. Брыкин, В. Лопатин // Электроэнергия. Передача и распределение. - 2016.- № 3. - С. 30-35.;

2. Повышение грозоупорности воздушных линий электропередач / Н. Я. Илюшов, С. М. Коробейников, В. А. Ломан, Е. А. Скрябина // Новое в российской электроэнергетике: науч.-техн. электрон. журн. - 2017.- № 6. - С. 29-36.

3. Анализ факторов, влияющих на грозоупорность воздушных линий электропередачи / Н. Я. Илюшов, С. М. Коробейников, А. А. Левченко, В. А. Ломан, Е. А. Скрябина // Новое в российской электроэнергетике: науч.-техн. электрон. журн. - 2017. - № 3. - С. 52-60.

4. Влияние характеристик изоляторов на грозоупорность воздушной линии / Н. Я. Илюшов, С. М. Коробейников, В. А. Ломан, С. М. Насирдинова // Новое в российской электроэнергетике: науч.-техн. электрон. журн. - 2019. - № 2. - С. 40-46.

Научные публикации в журналах, индексируемых в WoS и Scopus:

5. The use of ferromagnetic amorphous materials 5BDSR in high-frequency overvoltage protection devices / S. M. Korobeynikov, V. A. Loman // ASEAN Engineering Journal. - 2021. - Vol. 11, № 2. - P. 77-84.

6. Pulse measurements of samples frequency-dependent devices / S. M. Korobeynikov, V. A. Loman // IEEE 22 International conference of young professionals in electron devices and materials (EDM): proc., Altai Region, 30 June – 4 July 2021. – Novosibirsk: IEEE, 2021. - P. 379-382.

7. Lightning Overvoltages Suppression for the 35-kV Cable Section Insulation with the Frequency-Dependent Device / O. O. Emelyanova, V. A. Loman, S. M. Korobeynikov // Actual problems of electronic instrument engineering (APEIE–2021): proc. of the 15 intern. sci. and techn. conf., Novosibirsk, 19–21 Nov. 2021. – Novosibirsk : Publ. NSTU, 2021. – P. 212-215.

8. Suppression of incoming high-frequency overvoltage in transformer coils / S. M. Korobeynikov, S. I. Krivosheev, S. G. Magazinov, V. A. Loman [et. al.] // IEEE Transactions on Power Delivery. - 2021. - Vol. 36, iss. 5. - P. 2988-2994.

9. High-frequency transients suppression at substation / S. M. Korobeynikov, N. Y. Plyushov, Y. A. Lavrov, S. S. Shevchenko, V. A. Loman // IEEE international conference on high voltage engineering and application: summ. book of ICHVE 2018, Greece, Athens, 10–13 Sept. 2018. – Athens: IEEE, 2018. – P. 508.

Патенты и свидетельства на программы для ЭВМ:

10. № 192615 H02H9/04 Илюшов Н. Я., Коробейников С. М., Ломан В. А. // Устройство защиты от высокочастотных перенапряжений, 19.06.2019 г.

11. № 2019662590 / Вагин Д. В., Илюшов Н. Я., Ломан В. А., Персова М. Г., Соловейчик Ю. Г. // Программа для моделирования частотнозависимого резистора, 17.09.2019 г.;

Отпечатано в типографии Новосибирского
государственного технического университета
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,
Тел./факс (383) 346-08-57
Формат 60 X 84/16. Объем 1.3 п.л. Тираж 100 экз.
Заказ 1182. Подписано в печать 07.07.2022 г.