

ОТЗЫВ

Официального оппонента, кандидата технических наук, Ширковца Андрея Игоревича, на диссертацию Ломана Валентина Алексеевича «Исследование и совершенствование способа подавления высокочастотных перенапряжений с помощью частотнозависимого устройства», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.12 - «Техника высоких напряжений»

1. Актуальность темы

Диссертационная работа В.А. Ломана посвящена изучению и совершенствованию частотнозависимых устройств (ЧЗУ) для ограничения высокочастотных перенапряжений, возникающих в сетях 35-110 кВ при работе коммутационных аппаратов и грозовых поражениях токоведущих и несущих элементов ВЛ, ошиновки распределительных устройств подстанций. Наибольшую опасность эти перенапряжения представляют для продольной изоляции трансформаторов и реакторов, поскольку из-за высоких градиентов напряжения большой частоты и амплитуды может произойти локальное разрушение изоляции между витками катушек, а также между катушками и слоями обмотки высокого напряжения. Да и в целом изоляция оборудования трансформаторного типа обладает меньшими запасами электрической прочности по сравнению с линейной, поэтому крайне важна ее надежная защита.

Автор справедливо отмечает, что существующие и широко применяемые устройства для защиты от перенапряжений – ОПН, в силу физических свойств нелинейных варисторов в их составе, ограничивают амплитуду высокочастотных перенапряжений, защищая только основную изоляцию силовых трансформаторов и реакторов. Негативными факторами, снижающими эффективность применения ОПН, а также искровых промежутков, молниезащитных разрядников и их комбинаций, могут быть ошибки выбора характеристик, неоптимальная расстановка защитных аппаратов на защищаемом объекте, ненормативное сопротивление заземляющих устройств, в том числе из-за высокого удельного сопротивления скальных, песчаных и вечномерзлых грунтов. Срабатывание защитных устройств, включая ОПН, в ряде случаев сопровождается появлением срезанных волн с крутым фронтом, которые также весьма опасны для продольной изоляции силовых трансформаторов и реакторов. Обратной является ситуация, когда из-за рассогласования вероятной амплитуды воздействующего перенапряжения и остающегося напряжения защитный аппарат вообще не выполняет свои функции.

В этих условиях важной задачей является совершенствование конструкции и улучшение защитных характеристик продольного устройства защиты от перенапряжений, которое, в отличие от традиционной схемы присоединения защитных аппаратов «фаза-земля», включается в «рассечку» линии. Принцип действия такого устройства основан на увеличении активного и реактивного сопротивления его рабочего проводника на высоких частотах, характерных для грозового и коммутационного импульсов. Благодаря специальным мероприятиям, в том числе выбору материалов, формы и размеров рабочего проводника, толщины его покрытия ферромагнитным слоем, расчетам и испытаниям на физической модели, проверке технологичности изготовления и т.д. – обеспечиваются необходимые защитные характеристики предлагаемого ЧЗУ.

Исходя из изложенного, разработка превентивных мер обеспечения эксплуатационной надежности трансформаторного оборудования, к которым относятся эффективные средства защиты от высокочастотных перенапряжений, является актуальной научно-технической задачей. Следовательно, тема диссертационной работы В.А. Ломана, направленной на решение этой задачи путем совершенствования конструкции и параметров продольного ЧЗУ, предназначенного для подавления импульсных перенапряжений и защиты изоляции силовых трансформаторов и реакторов, является актуальной, а ее результаты – востребованными.

2. Общая характеристика диссертации

Диссертация Ломана В.А. состоит из введения, четырёх глав, заключения и приложения. Полный объем работы составляет 127 страниц, включая 29 таблиц и 78 рисунков. Список литературы содержит 127 наименований.

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

В первой главе выполнен анализ существующих способов защиты от грозовых и коммутационных перенапряжений, приведены сведения об отказах в воздушных сетях 35-110 кВ нескольких энергосистем. Подчеркивается, что серийно выпускаемые аппараты типа ОПН по принципу действия ориентированы на снижение амплитуды перенапряжений прямого перекрытия, однако эти устройства слабо ограничивают высокочастотные перенапряжения, характерные, например, для крутых фронтов срезанных импульсов. Представлен обзор существующих разработок – мультикамерных разрядников, ОПН с искровым промежутком, линейных разрядников, ОПН с комплексом резисторов и конденсаторов. Отмечено, что необходимость заземления этих устройств не позволяет нивелировать проблему высокого сопротивления заземляющих устройств и зависимости этого сопротивления от частоты грозовых разрядов. Кроме того, защитные аппараты с разрядными промежутками требуют правильного подбора расстояния между электродами. Немаловажной остается задача правильного выбора характеристик защитного аппарата: если амплитуда воздействующих перенапряжений не достигает уровня его срабатывания, то на оборудование воздействует импульс полной амплитуды, возможно несколько сглаженный в зависимости от места его возникновения.

Эти факторы в целом могут существенно снижать защитный уровень устанавливаемых устройств ограничения перенапряжений, в связи с чем в работе В.А. Ломана предложено продолжить развитие продольных частотнозависимых устройств (ЧЗУ), работающих на принципе скин-эффекта и в значительной мере свободных от указанных выше недостатков.

Вторая глава посвящена разработке и низковольтным испытаниям образцов проводников ЧЗУ с различными характеристиками, формой и конструкцией с последующим анализом результатов испытаний. Для этого проведена сборка макетов ЧЗУ с круглым, плоским однослойным и плоским многослойным проводниками, а также макета силового реактора. Одна серия испытаний выполнена при протекании через образцы высокочастотного переменного тока, другая – при воздействии на них высокочастотных импульсов. В рамках натурных испытаний и обработки их результатов автором показано, 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. В исследованиях не выявлено эффективного подавления импульсных сигналов макетом традиционного силового реактора, что обуславливает необходимость применения специального ферромагнитного покрытия рабочего проводника для обеспечения повышенных значений активного сопротивления ЧЗУ (в работе автора применены ленты 5БДСР). Важным выводом стало то, что применение конструкции, в которой плоскости плоского проводника находятся перпендикулярно магнитным полям катушки позволяет повысить эффективность ЧЗУ по сравнению с другой ориентацией.

Третья глава включает результаты сильноточных испытаний образцов ЧЗУ. Анализ измерений показал, что с ростом амплитуды тока снижается сопротивление образцов ЧЗУ, в качестве причины этого снижения автор называет вероятное насыщение ферромагнитного материала, которое в сложной конструкции ЧЗУ на отдельных участках может начинаться при токах порядка 100 А. Подчеркивается, что в большинстве случаев для полного насыщения всего ферромагнетика в составе ЧЗУ потребуются токи в единицы килоампер. Ввиду объективных ограничений по возможностям применяемой техники в ходе экспериментов В.А. Ломаном показано, что при значениях тока до 1,2 кА сопротивление образцов ЧЗУ уменьшается незначительно, при этом многократно превышая сопротивление проводника без

ферромагнитного материала. Практически ценным является основанное на результатах натуральных измерений заключение автора о том, сопротивление образцов ЧЗУ на более высоких частотах в меньшей степени зависит от значений протекающего тока.

Четвёртая глава содержит результаты анализа мониторинга ЧЗУ с круглым проводником (конструкция разработана и внедрена на предшествующем этапе работы), а также компьютерного моделирования и оценки защитных характеристик ЧЗУ при воздействии высокочастотных перенапряжений. Для оптимизации параметров ЧЗУ автором получены зависимости индуктивности катушки ЧЗУ от различных параметров конструкции (как для круглого, так и для плоского проводников), позволяющие управлять индуктивностью устройства. Это ценно, поскольку индуктивное сопротивление за счет применяемой конструкции ЧЗУ играет существенную роль в токоограничивающем эффекте устройства.

Отмечено, что мониторинг фазных напряжений в ходе эксплуатации трех ЧЗУ со стороны питающих ВЛ 110 кВ на ПС 110 кВ «Сугмутская» в 2015-2017 гг. подтвердил положительный эффект – до настоящего времени не было зафиксировано отключений ВЛ из-за грозовых перекрытий. С одной стороны, автором констатируется, что это может являться косвенным подтверждением эффективности ЧЗУ. С другой стороны, указано, что природа набегающих импульсов с ВЛ не была точно установлена и, более того, полагается, что большинство импульсов перенапряжения имели коммутационное происхождение, что по сути оставляет открытым вопрос о степени воздействия ЧЗУ на грозовой импульс.

В программе COMSOL Multiphysics автором совместно с сотрудниками Санкт-Петербургского Политехнического университета Петра Великого было выполнено компьютерное моделирование воздействия полных грозовых импульсов и импульсов обратного перекрытия на трансформатор при использовании ЧЗУ, который задан конечно-элементной моделью. Результаты этого моделирования, во-первых, касаются только ЧЗУ с круглым проводником, во-вторых – показывают, что ЧЗУ оказывает незначительное влияние на полный грозовой импульс: его крутизна несколько снижается, однако в пределах 10% возрастает амплитуда. В то же время выявлено, что ЧЗУ существенно влияет на «короткие» импульсы: сокращается их амплитуда, растягивается фронт импульса и снижается его крутизна. Это делает его относительно безопасным для продольной изоляции обмоток трансформаторного оборудования. Исходя из этих результатов, сделан вывод о целесообразности совместного применения двух устройств: ОПН позволит надёжно снизить амплитуду перенапряжения, а ЧЗУ – демпфировать срезы и импульсы обратного перекрытия с крутым фронтом.

Практическую ценность представляют выполненные в исследовании оценки термической и электродинамической стойкости ЧЗУ при воздействии токов короткого замыкания до 30 кА и грозовых импульсов до 100 кА. Показано, что кратковременный нагрев и динамические усилия не приведут к разрушению разработанной конструкции устройства и необратимому изменению свойств ферромагнитной ленты.

В приложении к диссертации представлены акт внедрения результатов исследования в АО «Россети Тюмень», патент на полезную модель «Устройство защиты от высокочастотных перенапряжений», свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ (Программа для моделирования частотнозависимого резистора, написанная автором совместно с сотрудниками кафедры прикладной математики НГТУ).

3. Соответствие диссертации и автореферата паспорту специальности 05.14.12 – Техника высоких напряжений

Материалы диссертации и автореферата соответствуют пунктам 1 и 3 области исследования паспорта научной специальности 05.14.12 по техническим наукам.

4. Соответствие содержания автореферата основным положениям диссертации

Автореферат в достаточной мере отражает основное содержание диссертации.

5. Новизна исследований и полученных результатов

Новизна исследований и полученных в диссертационной работе В.А. Ломана результатов определяется следующими положениями:

1. Выполнено сравнение различных способов повышения сопротивления ЧЗУ с помощью экспериментальных исследований и подтверждено, что одним из вариантов повышения сопротивления и индуктивности устройства для более надежной защиты оборудования ПС от высокочастотных перенапряжений является изменение формы рабочего проводника в катушке ЧЗУ.

2. Поставленный комплекс натурных измерений и расчетов позволил в качестве оптимального профиля проводника ЧЗУ предложить плоский однослойный профиль с ферромагнитным покрытием. Автором показано, что наибольший эффект от применения новой формы проводника в конструкции ЧЗУ достигается при ориентации плоскости проводника перпендикулярно направлению магнитного поля катушки.

3. На основе компьютерного моделирования в программе «Comsol Multiphysics» показана высокая эффективность ЧЗУ в подавлении срезаемых импульсов и импульсов обратного перекрытия. Косвенно это подтверждено анализом работы ЧЗУ в условиях опытной эксплуатации трех устройств на подстанции 110 кВ «Сугмутская».

По мнению оппонента, научная новизна в решении автором задачи защиты трансформаторного оборудования путем подавления высокочастотных перенапряжений грозовых и коммутационных импульсов связана в первую очередь с установлением связи между геометрией и формой сечения (профилированием покрытого ферромагнитной лентой проводника) в составе ЧЗУ, позволяющего управлять его активным сопротивлением и индуктивностью, и влиянием ЧЗУ с этим проводником на параметры набегающего импульса перенапряжения. При прохождении через усовершенствованное ЧЗУ происходит деформация импульса, благодаря чему он становится относительно безопасен для продольной изоляции трансформатора или реактора.

Новизна, актуальность и практическая ценность исследований подтверждена наличием научных публикаций в индексируемых отраслевых журналах, включая 9 печатных работ (из них 4 статьи в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 4 статьи, индексируемых в наукометрических базах данных Scopus / Web of Science), а также участием автора в российских и международных отраслевых конференциях.

6. Теоретическая и практическая значимость

Расчет и подбор оптимальных размеров, профиля, материалов для изготовления образцов и промышленных конструкций ЧЗУ с определением необходимых значений сопротивления и индуктивности в определенных диапазонах частот, с учетом технологических ограничений и требований по минимизации габаритов готового устройства, компьютерное моделирование и мониторинг напряжений на установленных на действующей ПС 110 кВ ЧЗУ в целом определяют теоретическую и практическую значимость работы В.А. Ломана. Анализ результатов диссертационного исследования показал следующие ключевые факторы значимости:

1. Показано, что профилированием проводника с ферромагнитным покрытием можно регулировать частотнозависимые характеристики ЧЗУ, а именно – его активное и реактивное сопротивление.

2. Предложен новый прямоугольный (плоский) профиль рабочего проводника ЧЗУ, обеспечивающий повышенные значения индуктивности, активного сопротивления и меньшие массогабаритные характеристики устройства.

3. Подтверждена более высокая эффективность конструкции ЧЗУ для воздушных линий 35 кВ с плоским однослойным проводником с ферромагнитным покрытием, по сравнению с ЧЗУ на основе круглого проводника, разработанным ранее.

4. Выполнен анализ и определение геометрических параметров ЧЗУ, позволяющих разработать усовершенствованную конструкцию для установки на воздушных линиях 35 кВ и 110 кВ, результаты применены в проекте реконструкции и модернизации подстанции ПС 220/110/35/6 кВ «Факел» филиала «Нижевартовские электрические сети» АО «Россети-Тюмень», что подтверждается актом внедрения.

5. Посредством анализа мониторинга работы ЧЗУ в условиях опытной эксплуатации на подстанции «Сугмутская» и моделирования его работы подтверждено подавление

высоковольтных срезанных грозových импульсов (снижение амплитуды, растягивание фронта) и импульсов обратного перекрытия.

7. Обоснованность и достоверность научных выводов, положений и рекомендаций

Основные выводы и результаты диссертационной работы В.А. Ломана теоретически обоснованы, поскольку опираются на известные положения в области таких научных и прикладных областей, как техника и электрофизика высоких напряжений, включая координацию изоляции, электротехническое материаловедение, метрологическое обеспечение натуральных измерений, техника цифрового осциллографирования, частотная обработка сигналов. Достоверность результатов работы обеспечивается корректным применением аналитического аппарата и формул электротехники для расчета параметров проводников различной конфигурации, методов прикладной математики и программирования, численных методов, реализованных в программном пакете COMSOL, верификацией компьютерных моделей, качественным подобием результатов низковольтных и сильноточных измерений.

Степень обоснованности и достоверности научных положений и выводов диссертации В.А. Ломана подтверждается также тщательным анализом и проработкой экспериментальных результатов, сопоставлением с результатами других аналогичных исследований, опубликованных в отраслевой научно-технической литературе, патентным анализом. Результаты исследований автора обсуждались на международных и всероссийских конференциях, по результатам работы опубликовано достаточное количество печатных работ в рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК, получен патент на полезную модель. В составе научного коллектива диссертант участвовал в проведении исследований, финансируемых Российским фондом фундаментальных исследований и Фондом содействия инновациям.

8. Заключение о соответствии диссертации установленным критериям

Диссертационная работа Ломана В.А. отвечает требованиям пп. 9-14 действующего Постановления Правительства РФ от 24.09.2013 № 842 (ред. от 11.09.2021 г.) «О порядке присуждения ученых степеней», которым должна соответствовать диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук.

9. Замечания по диссертационной работе

1. На этапе постановки исследования целесообразно было бы предложить требования к разрабатываемому (совершенствуемому) устройству, по крайней мере по уровню ограничения амплитуды перенапряжений и приемлемой длине их фронтов (частот) на «выходе» ЧЗУ, с учетом параметров стандартизированных испытательных импульсов напряжения для внутренней изоляции силовых трансформаторов и шунтирующих реакторов по ГОСТ Р 55194-2012 «Электрооборудование и электроустановки переменного тока на напряжения от 1 до 750 кВ. Общие методы испытаний электрической прочности изоляции». Применительно к эксплуатируемым трансформаторам 35-110 кВ следовало проанализировать опубликованные данные по импульсной прочности состаренной изоляции. Это необходимо, чтобы сформулировать технические требования к продольным устройствам типа ЧЗУ.

2. При анализе существующих способов и средств защиты от перенапряжений грозовой и коммутационной природы (глава 1) не прослеживается ссылок на действующую нормативную документацию, напрямую относящуюся к задаче ограничения высокочастотных перенапряжений. Эта документация принята в качестве ГОСТ (ГОСТ Р 55194-2012 Электрооборудование и электроустановки переменного тока на напряжения от 1 до 750 кВ. Общие методы испытаний электрической прочности изоляции, ГОСТ Р 52725-2007 Ограничители перенапряжений нелинейные для электроустановок переменного тока напряжением от 3 до 750 кВ. Общие технические условия), либо утверждена на уровне Минэнерго (разделы ПУЭ-7, РД 153-34.3-35.125-99/СО 34.35.125-99 Руководство по защите электрических сетей 6-1150 кВ от грозových и внутренних перенапряжений), а также применяется в качестве стандартов организации (ОАО «ФСК ЕЭС» - СТО 56947007-

29.130.10.197-2015 «Методические указания по применению ОПН на ВЛ 6-750 кВ», СТО 56947007-29.240.01.221-2016 «Руководство по защите электрических сетей напряжения 110-750 кВ от грозových и внутренних перенапряжений»; Методические рекомендации по применению молниезащитных разрядников на воздушных линиях электропередачи, АО «НПО «Стример», С.-Петербург, 2017; ПАО «Россети» - СТО 34.01-2.2-037-2021 «Разрядники мультикамерные молниезащитные для воздушных линий электропередачи переменного тока на напряжение 6-110 кВ» и другие).

3. В качестве одного из направлений применения ЧЗУ автором обосновывается защита от коммутационных перенапряжений (раздел 1.4). Опасность таких перенапряжений для витковой изоляции трансформаторов, вследствие их высокой частоты (до 1-2 МГц), не подвергается сомнению. Источниками таких перенапряжений являются в подавляющем большинстве случаев операции с вакуумными выключателями (ВВ). Однако случаи применения на сетевых подстанциях вакуумных выключателей класса 110 кВ крайне редки, гораздо чаще сейчас применяются элегазовые выключатели, для которых характерно относительно «мягкое» гашение дуги без образования волн с крутыми фронтами. На металлургических предприятиях действительно применяются ВВ-35 и 110 кВ, в том числе многоразрывные, но там основным средством защиты являются РС-цепи в комбинации с ОПН. Также ВВ-35 кВ широко применяются в кабельных распределительных сетях. Поэтому вызывает сомнение целесообразность расширения области действия ЧЗУ на защиту воздушных сетей 35-110 кВ от коммутационных перенапряжений.

4. В работе не приведены результаты компьютерного моделирования с проверкой подавления высокочастотных перенапряжений с помощью ЧЗУ с плоским проводником, который, по результатам исследований (глава 3), является оптимальной формой рабочего проводника в катушке и должен обеспечивать более эффективную работу ЧЗУ, по сравнению с таким же устройством на основе круглого проводника.

5. По результатам моделирования сделан вывод о перспективе совместного применения ОПН и ЧЗУ. Какое схемно-конструктивное решение может предложить автор для этого способа, какие у него могут быть недостатки и планируется ли выполнить необходимые расчеты для реализации этого решения на практике?

6. Известные значения токов молниевых разрядов для применения в расчетах составляют 200, 150, 100 кА согласно СО 153-34.21.122-2003 «Инструкция по устройству молниезащиты зданий, сооружений и промышленных коммуникаций», в электроэнергетике обычно используется набор параметров молниевых разрядов с амплитудой тока 100 кА. Требуется ли эксплуатирующая организация АО «Россети Тюмень» для разрабатываемых и планируемых к вводу на ПС «Факел» ЧЗУ 35 кВ (Акт Приложения Б) провести комплекс приемосдаточных испытаний, включая проверку устойчивости к воздействию таких токов?

7. Из текста работы неясно, сравнивались ли расчетные значения тока трехфазного КЗ на шинах 110 кВ ПС «Сугмутская» и 35 кВ ПС «Факел» с тем наибольшим током, который оценен автором как допустимый для ЧЗУ по условиям термической и электродинамической стойкости – 30 кА?

8. Исходя из принципа действия и предлагаемых конструкций ЧЗУ, очевидно, что в работе устройства имеет место совместное действие скин-эффекта, приводящего к резкому увеличению активного сопротивления, а также включения индуктивности проводника в виде катушки, дающей большое реактивное сопротивление на высокой частоте воздействующих перенапряжений. При этом в тексте основной упор сделан на увеличение активного сопротивления. Из текста работы неясно, сопоставлял ли автор значения активного и индуктивного сопротивления ЧЗУ в «рабочем» диапазоне частот воздействующих перенапряжений, чтобы ответить на вопрос – какой вид сопротивления играет определяющую роль в ограничении амплитуды импульса перенапряжений, а какой – в снижении частоты (растягивании фронта импульса)?

9. По результатам работы было бы полезно дать рекомендации, которые могут использовать эксплуатирующие электросетевые и промышленные организации в повседневной практике, а именно:

- как обеспечить нормированные параметры заземляющего устройства (например, при высоких сопротивлениях грунта) для обеспечения эффективности имеющихся средств защиты, в том числе ОПН?
- какими отечественными и зарубежными методиками лучше пользоваться при выборе параметров и мест установки линейных ОПН, в том числе с искровым промежутком?
- какие рекомендации можно дать эксплуатационному персоналу АО «Россети Тюмень» по контролю технического состояния устанавливаемых ЧЗУ?

Указанные замечания не снижают общей положительной оценки работы и не подвергают сомнению достоверность, обоснованность и новизну полученных и представленных в диссертации результатов.

10. Общее заключение

Диссертация В.А. Ломана является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение научной задачи по совершенствованию средств и методов подавления высокочастотных перенапряжений для защиты трансформаторного и реакторного оборудования подстанций высшим напряжением 35-110 кВ. В области электроэнергетики актуальность этой задачи не подвергается сомнению, ввиду необходимости обеспечения эксплуатационной надежности такого ответственного оборудования, как силовые трансформаторы, особенно в период прохождения грозового сезона.

Актуальность проведенного исследования, а также полученные и представленные в научном докладе результаты подтверждены и обоснованы как аналитическими расчетами, так и экспериментально. Практическую ценность представляют не только научно-исследовательские, но и конструкторско-технологические разработки В.А. Ломана, поскольку ряд технических решений по выбору профиля, изучению влияния формы и геометрических размеров на частотнозависимые параметры устройства был предложен и опробован впервые.

Научные положения, выводы и рекомендации, изложенные в научно- квалификационной работе, аргументированы, достоверны и обоснованы.

Считаю, что в целом работа выполнена на высоком профессиональном уровне и отвечает требованиям ВАК к кандидатским диссертациям, а её автор – Ломан Валентин Алексеевич – заслуживает присуждения степени кандидата технических наук.

Официальный оппонент

Кандидат технических наук,
начальник отдела международных
отношений и инжиниринга
ООО «Болид»

Ширковец Андрей Игоревич

«12» 09 2022 г.

Подпись Ширковца А.И. заверя
Начальник отдела кадров ООО

овникова С.Г. «12» 09 2022 г.

Общество с ограниченной ответственностью «Болид»
Юридический адрес: 630015, г. Новосибирск, ул. Электrozаводская, 2, корп.6, 3 эт.;
Телефон: +7 (383) 325-33-17; 325-33-79
Электронная почта: eng@pnpbolid.com

Озвоб получен 13.09.2022 г.

С отзывом ознакомлен 13.09.2022 г. [Подпись] - Ломан В.А.