

На правах рукописи

ДЕМЕНТИЙ ЮРИЙ АНАТОЛЬЕВИЧ

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА КОМПЕНСАЦИИ ПОЛНОГО ТОКА
ОДНОФАЗНОГО ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ
В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ

Специальность 05.14.02 – Электрические станции и
электроэнергетические системы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Чебоксары – 2018 г.

Работа выполнена на кафедре теоретических основ электротехники и релейной защиты и автоматики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова».

- Научный руководитель:** **Булычев Александр Витальевич**, доктор технических наук, профессор
- Официальные оппоненты:** **Лачугин Владимир Федорович**, доктор технических наук, старший научный сотрудник, заведующий лабораторией информационно-измерительных и управляющих систем в электроэнергетике Акционерного общества «Энергетический институт имени Г.М. Кржижановского»
- Успенский Михаил Игоревич**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник лаборатории энергетических систем федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт социально-экономических и энергетических проблем Севера Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук»
- Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Защита диссертации состоится «28» сентября 2018 г. в 16:30 на заседании диссертационного совета Д 212.301.02 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова» по адресу г. Чебоксары, ул. Университетская, д. 38, учебный корпус 3, зал заседаний Ученого совета, к. 301.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке Чувашского государственного университета имени И. Н. Ульянова по адресу: 428034, Чувашская Республика, г. Чебоксары, ул. Университетская, д. 38 и на сайте www.chuvsu.ru.

Автореферат разослан «21» мая 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.301.02
к.т.н., доцент

Серебрянников А.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность и степень разработанности темы. Решение выполнять электрические сети классов напряжения 6-35 кВ с изолированной нейтралью, принятое в начале двадцатого века, позволило существенно повысить надежность электроснабжения по этим сетям и продлить срок эксплуатации коммутационных аппаратов. Это достигнуто благодаря уникальному свойству сетей с изолированной нейтралью – сохранять возможность передавать электрическую энергию при наличии в ней однофазного замыкания на землю (ОЗЗ).

Развитие сетей неизбежно приводит к увеличению их емкости и, как следствие, к увеличению токов при ОЗЗ (токи ОЗЗ более 5-10 А считаются опасными). Это вынуждает применять специальные методы и технические средства компенсации токов ОЗЗ.

Задача снижения тока и гашения электрической дуги в месте ОЗЗ в сетях 6-35 кВ на практике традиционно решается с помощью дугогасящих реакторов (катушек индуктивности), включаемых между нейтралью сети и землей. Однако это решение, основанное на компенсации только реактивной емкостной составляющей тока ОЗЗ, противоположно направленной индуктивной составляющей тока, создаваемой дугогасящим реактором (ДГР), дает хорошие практические результаты только на одной основной частоте сети и при отсутствии существенных потерь.

В реальных протяженных сетях, где токи ОЗЗ большие и превышают, например, 100 А, остаточный, не скомпенсированный ДГР ток в месте ОЗЗ, обусловленный потерями, гармониками и неидеальной настройкой ДГР, может превышать 5 А и поддерживать горение электрической дуги в месте ОЗЗ. Даже один фактор из перечисленных – неидеальная настройка ДГР (допускается расстройка 5% от номинального тока ДГР) – может вызвать появление остаточного тока, способного поддерживать дугу в месте ОЗЗ. Предельное значение тока, при котором возможно устойчивое горение дуги в месте замыкания, (5А) определено в результате всесторонних исследований и зафиксировано в нормативных документах.

Таким образом, в сетях с большими токами ОЗЗ (100 А и более) ДГР не является гарантирующим средством гашения дуги, так как остаточный ток может превышать значение 5А. Это означает, что ДГР большой мощности оказываются неэффективными, т.к. не выполняют в полной мере свою основную функцию гашения дуги в месте ОЗЗ.

В этих условиях для эффективного гашения электрической дуги в месте ОЗЗ необходимо компенсировать не только емкостную составляющую тока ОЗЗ на частоте сети, а полный ток ОЗЗ, включая активную составляющую и составляющие других частот. Все это можно реализовать с помощью комплекса оборудования для управляемого заземления нейтрали. Таким образом, сохраняются преимущества изолированной нейтрали – возможность передавать электрическую энергию при наличии ОЗЗ в течение продолжительного периода времени, – и приобретаются преимущества эффективно заземленной (или заземленной через резистор) нейтрали – возможность ограничивать перенапряжения при ОЗЗ.

Применение управляемого заземления позволит снизить вероятность возникновения пожаров, улучшит электробезопасность сети, снизит перенапряжения и предотвратит развитие многих аварийных ситуаций.

В связи с этим, создание новой управляемой системы заземления нейтрали для распределительных электрических сетей, обладающей новыми свойствами, позволяющими повысить надежность и безопасность электрических сетей 6-10 кВ, представляет собой актуальную научно-техническую задачу.

Системы такого рода практически не исследованы. Для того чтобы создать эффективную управляемую систему заземления нейтрали, надо построить ее математические модели, соответствующие возможным состояниям сети. На основе моделей необходимо провести исследование режимов и разработать алгоритмы и конкретные программы компенсации тока ОЗЗ. Решение этой нетривиальной научно-технической задачи обладает научной новизной.

Целью работы является разработка методов и технических средств компенсации полного тока в месте повреждения при однофазном замыкании на землю в сетях 6-10 кВ.

Объектом исследования являются распределительные электрические сети переменного тока класса напряжения 6-10 кВ с компенсацией полного тока однофазного замыкания на землю.

Предметом исследования являются методы и технические средства компенсации полного тока в месте повреждения при однофазном замыкании на землю в сетях 6-10 кВ.

Основные задачи:

1. Разработка метода компенсации остаточного тока в месте повреждения при однофазном замыкании на землю в распределительных сетях.

2. Разработка моделей и исследование управляемого заземления нейтрали, обеспечивающего компенсацию полного тока ОЗЗ в сетях 6-10 кВ.

3. Создание и исследование опытного образца управляемого заземления нейтрали с функцией компенсации полного тока ОЗЗ для сетей 6-10 кВ, обеспечивающего гашение дуги и создание условий для предотвращения повторного зажигания дуги в реальных условиях эксплуатации.

Методы и методология исследования базируются на принципах теоретических основ электротехники, методах анализа и синтеза систем автоматического управления, теории релейной защиты и методах математического и физического моделирования.

Достоверность результатов обеспечивается корректным применением методов теоретических основ электротехники, теории автоматического управления, релейной защиты, подтверждается результатами физического моделирования, натурных экспериментов и успешной работой образца системы компенсации в опытной эксплуатации на действующей подстанции.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Метод компенсации полного тока и гашения электрической дуги в месте повреждения при однофазном замыкании на землю в сети 6-10 кВ.

2. Результаты исследования компенсации полного тока ОЗЗ, полученные путем математического и физического моделирования.

3. Результаты исследования преобразователей тока нулевой последовательности для цифровой системы управления компенсацией тока однофазного замыкания на землю.

Научная новизна работы:

1. Предложен и обоснован метод компенсации полного тока ОЗЗ единым комплексом управляемого заземления нейтрали сети, обеспечивающим раздельную компенсацию емкостной составляющей на частоте сети с помощью пассивного ДГР и компенсацию других составляющих с помощью управляемого источника, что позволяет полностью скомпенсировать ток в месте ОЗЗ, принудительно погасить дугу и предотвратить повторное ее зажигание.

2. Разработаны математическая и физическая модели управляемого заземления нейтрали, доказано их соответствие реальному объекту, на их основе проведены всесторонние теоретические и экспериментальные

исследования в стационарных и переходных режимах, которые подтвердили правомерность принятых в процессе разработки ограничений и допущений, доказали преимущества разработанного управляемого заземления и позволили определить его основные эксплуатационные параметры.

3. В результате исследования электромагнитных трансформаторов тока нулевой последовательности разработаны рекомендации, позволяющие повысить точность передачи токов нулевой последовательности в стационарных и динамических режимах путем расширения полосы пропускания в области нижних частот за счет увеличения коэффициента трансформации.

Практическая ценность и внедрение результатов работы.

1. Реализация предложенного метода компенсации полного тока ОЗЗ для сетей 6-10 кВ обеспечивает существенное снижения тока, гашение электрической дуги и создание условий для предотвращения повторного зажигания дуги в месте ОЗЗ, что повышает надежность и безопасность этих сетей.

2. Разработан и изготовлен опытный образец управляемого заземления мощностью 800 кВА, который всесторонне исследован в условиях заводской лаборатории на напряжении 10 кВ с током однофазного замыкания на землю 30 А, что позволило получить близкие по существу к реальным процессы компенсации дуговых замыканий на землю; положительные результаты заводских испытаний позволили сделать вывод о возможности включения опытного образца в реальную сеть 10 кВ на действующей подстанции.

3. Опытный образец управляемого заземления нейтрали сети введен в опытную эксплуатацию на действующей подстанции ПАО «МРСК Волги»; получен опыт эксплуатации в реальных условиях; проведен анализ работы опытного образца в нормальных режимах и при реальных повреждениях в сети; результаты анализа показали, что ввод в работу управляемого заземления нейтрали не вносит неблагоприятных изменений в условия работы сети, и подтвердили все основные параметры этого управляемого заземления нейтрали, заданные при разработке.

4. Результаты работы теоретического и практического характера использованы ООО «НПП Бреслер» при выполнении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, а также в учебном процессе в Институте повышения квалификации специалистов релейной защиты и автоматики и могут быть использованы проектными и научно-исследовательскими организациями при разработке компенсации тока ОЗЗ для электрических сетей с большими токами ОЗЗ.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы обсуждались на 4-й международной научно-практической конференции «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем России» (Чебоксары, 18-21 апреля 2017 г.), на XI международной научно-практической конференции «Актуальные вопросы науки, технологии и производства» (Санкт-Петербург, 17-18 июля 2015 г.), на XI Всероссийской научно-технической конференции «Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем» (г.Чебоксары, 5 июня 2015 г.), на двадцатой Всероссийской научно-технической конференции «Пути повышения надежности, эффективности и безопасности энергетического производства» (г.Дивноморск, 5-9 июня 2017 г.), на научно-практической конференции «Релейная защита и автоматизация. Совершенствование эксплуатации и перспективы развития» в рамках выставки «Электрические сети России-2017» (Москва, 6 декабря 2017 г.).

Личный вклад автора. Разработка метода компенсации полного тока однофазного замыкания на землю, математическое и физическое моделирование, разработка опытного образца, постановка экспериментов и последующий анализ результатов выполнены автором лично. В совместных работах автору принадлежат постановка целей и задач, постановка и проведение теоретических и экспериментальных исследований, обработка результатов.

Публикации. Основные результаты отражены в 9 печатных работах, в том числе 4 работы опубликованы в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки РФ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 3-х глав, заключения, списка литературы (78 наименований), приложений (10 страниц). Основной текст рукописи содержит 101 страницу, 81 рисунок и 3 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цели и задачи исследования, раскрыта структура диссертации. Отмечен вклад известных ученых и специалистов научных, учебных и проектных организаций, энергосистем и производственных предприятий.

В первой главе показаны результаты анализа состояния решаемой задачи, рассмотрен отечественный и зарубежный опыт компенсации тока ОЗЗ в распределительных сетях и разработана концепция создания управляемого заземления нейтрали с функцией компенсации полного тока ОЗЗ для распределительных сетей 6-10 кВ.

Совершенствование принципов компенсации тока ОЗЗ идет, в основном, в двух направлениях. Первое из них имеет целью повышение точности компенсации емкостной составляющей тока ОЗЗ на частоте сети с помощью ДГР, а второе – развитие методов и технических средств уменьшения остаточных токов в месте ОЗЗ, возникающих при компенсации емкостной составляющей тока ОЗЗ.

Первое из направлений интенсивно развивалось почти сто лет и достигло сегодня ограничений, связанных с наличием в реальном токе ОЗЗ существенных составляющих, которые принципиально (методически) не могут быть скомпенсированы с помощью ДГР.

Второе направление открывает хорошие перспективы дополнения первого и создания высокоэффективных систем управляемого заземления нейтрали сети с улучшенными основными функциями компенсации полного тока ОЗЗ (со всеми составляющими), гашения электрической дуги в месте повреждения и предотвращения повторных процессов зажигания дуги.

Ток ОЗЗ в сетях с изолированной нейтралью в общем виде представляет собой сумму емкостной и активной составляющих с частотой сети, гармонические составляющие с частотами, отличными от частоты сети, а также свободные затухающие гармонические и экспоненциальные составляющие. Первая составляющая, как правило, является определяющей. В реальных условиях эту реактивную составляющую удастся существенно снизить на 1-2 порядка с помощью пассивного элемента – ДГР. Но все же из-за ограниченной точности реализации настройки ДГР в резонанс с емкостью сети в остаточном токе эта составляющая, как правило, присутствует.

Для компенсации активной составляющей тока ОЗЗ необходим активный элемент, по сути, управляемый источник.

Учитывая многообразие, неопределенность параметров и незначительную энергию свободных составляющих тока ОЗЗ их

компенсацию целесообразно осуществлять также с помощью активного управляемого источника.

Попытки компенсации активной составляющей тока ОЗЗ предпринимались в девяностые годы прошлого столетия и в начале двухтысячных годов (ООО ВП «Наука, техника, бизнес в энергетике» – НТБЭ, г. Екатеринбург). Но несовершенство элементной базы силовой электроники не позволило в то время создать управляемый источник с параметрами, необходимыми для практической компенсации остаточного тока ОЗЗ.

Развитие элементной базы силовой электроники, в частности, появление полностью управляемых ключей высокого напряжения создало условия для разработки системы компенсации полного тока ОЗЗ на основе ШИМ-конвертора напряжения, включенного непосредственно между нейтралью сети и землей. Этот подход использован в разработках зарубежных (фирма Swedish Neutral) и отечественных специалистов (Г.М. Мустафа). Однако, уязвимость и ограниченная перегрузочная способность (особенно в динамических режимах) силовых электронных элементов при непосредственном подключении к сети 6-10 кВ ограничивают применение компенсации этого типа.

На основе результатов всестороннего анализа известных решений в диссертации показано, что компенсацию тока ОЗЗ целесообразно выполнять единой системой управляемого заземления нейтрали, построенной по комбинированной схеме. Наиболее существенную емкостную составляющую тока ОЗЗ на частоте сети следует компенсировать с помощью ДГР, настроенного в резонанс с емкостью сети. Активную составляющую, гармонические составляющие с частотами, отличными от частоты сети, и свободные составляющие тока ОЗЗ необходимо компенсировать с помощью действующего параллельно с ДГР управляемого источника. Причем управляемый источник должен быть подключен к сети через трансформаторную развязку.

Сегодня эта концепция может быть реализована в полной мере на базе стремительно развивающихся ДГР, силовой электроники и микропроцессорных средств обработки электрических сигналов. При этом открываются широчайшие возможности выполнения точных измерений, использования дополнительной информации о контролируемом объекте, регистрации и хранения (запоминания) параметров режимов и контроля функционирования в процессе работы, т.е. тех функций, которых так не хватало предшествующим электромеханическим системам компенсации тока ОЗЗ.

Во второй главе рассмотрена реализация предложенной концепции построения управляемого заземления нейтрали с функцией компенсации полного тока ОЗЗ в распределительных сетях 6-10 кВ.

Предложен базовый вариант реализации единой системы управляемого заземления нейтрали, построенного по комбинированной схеме (рисунок 1). Он предполагает раздельную компенсацию емкостной составляющей тока ОЗЗ на частоте сети и остаточного тока, содержащего другие составляющие.

Раздельная компенсация этих составляющих тока ОЗЗ позволяет использовать управляемый источник сравнительно небольшой мощности и подключать его к сети через трансформаторную развязку.

Кроме этого, предложенная концепция предусматривает возможность модернизации существующих средств компенсации тока ОЗЗ на основе ДГР путем дополнения их компенсатором остаточного тока на основе управляемого источника тока (УИТ), что позволит обеспечивать компенсацию полного тока ОЗЗ.

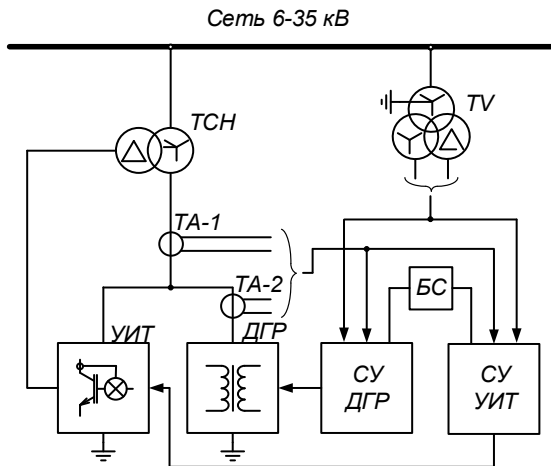


Рисунок 1 – Структурная схема управляемого заземления нейтрали

К электрической сети, содержащей несколько присоединений, через нейтралеобразующую обмотку трансформатора собственных нужд (ТСН), подключены управляемый ДГР и управляемый источник тока УИТ, который получает питание от вторичной обмотки ТСН. Следует отметить, что питание управляемого источника можно осуществлять от любого другого трансформатора с соответствующими параметрами.

Выходные сигналы измерительного трансформатора напряжения (ТВ) и трансформаторов тока ТА-1 и ТА-2 поступают на вход системы управления ДГР (СУ ДГР) и на вход системы управления источником тока (СУ УИТ).

Логика взаимодействия указанных контуров управления задается программным путем в блоке согласования (БС) систем управления.

На рисунке 2 показана схема замещения сети 6-10 кВ с управляемым заземлением нейтрали, все параметры которой приведены к первичному напряжению. В ней учтены все основные параметры, которые оказывают существенное влияние на процессы ОЗЗ и компенсации полного тока в месте ОЗЗ. При этом принято, что исходно до момента возникновения ОЗЗ сеть симметрична по продольным и поперечным параметрам, а фазные э.д.с. представляют собой гармонические функции одной частоты.

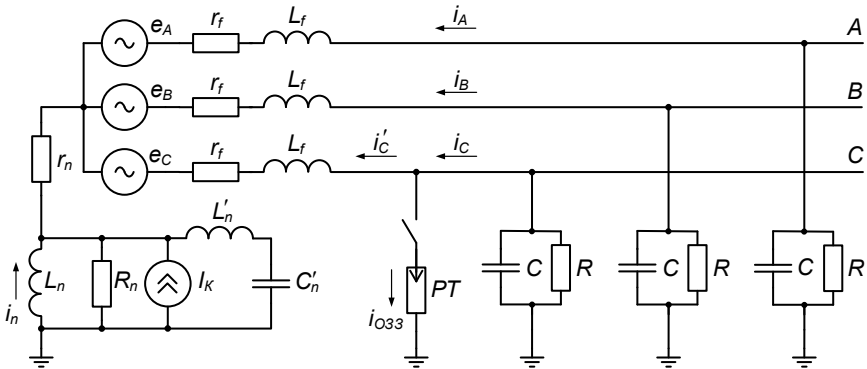


Рисунок 2 – Схема замещения распределительной сети с управляемым заземлением при ОЗЗ

На основании схемы замещения с учетом корректных допущений и ограничений сформирована система дифференциальных уравнений сети при ОЗЗ:

$$\left\{ \begin{array}{l} i_{033} = i_A + i_B + i_C + i_n; \\ e_C - e_B = -i'_C r_f - L_f \frac{di'_C}{dt} - U_{C0} + U_{B0} + L_f \frac{di_B}{dt} + i_B r_f; \\ e_B - e_A = -i_B r_f - L_f \frac{di_B}{dt} - U_{B0} + U_{A0} + L_f \frac{di_A}{dt} + i_A r_f; \\ e_A = -i_A r_f - L_f \frac{di_A}{dt} - U_{A0} + U_n; \\ i_C = i'_C + i_{033}; \\ 0 = U_{C0} + i_{033} R_{033}. \end{array} \right.$$

Здесь: e_A, e_B, e_C – фазные ЭДС; i_A, i_B, i_C – фазные токи; i_n – ток нейтрали; i_{033} – ток в месте повреждения; i'_C – ток активно-емкостной проводимости поврежденной фазы на землю; U_{A0}, U_{B0}, U_{C0} – падения напряжений на распределенных емкостях и активных проводимостях фаз относительно земли; U_n – падение напряжения на нейтрали сети; r_f, L_f –

продольное эквивалентное активное сопротивление и индуктивность фазы соответственно.

Подтверждена адекватность модели и реального объекта путем сопоставления сигналов, полученных разными способами моделирования. В результате сравнения осциллограмм процессов, полученных путем математического и физического моделирования, установлено, что процессы подобны, все принятые допущения и ограничения правомерны, и разработанная математическая модель применима для исследования компенсации тока ОЗЗ в сетях 6-10 кВ и косвенных измерений отдельных параметров процессов.

Модель позволила исследовать процессы компенсации тока ОЗЗ при полностью контролируемых заданных условиях моделирования, что исключает влияние на результаты случайных побочных факторов. С небольшими, по сравнению с физическим моделированием, затратами удалось исследовать разные варианты управляемого заземления, определить его основные свойства и предельные параметры.

На рисунке 3 показана наиболее характерная осциллограмма тока ОЗЗ ($i_{OЗЗ}$) и напряжения на нейтрали сети ($3U_0$) при компенсации устойчивого ОЗЗ.

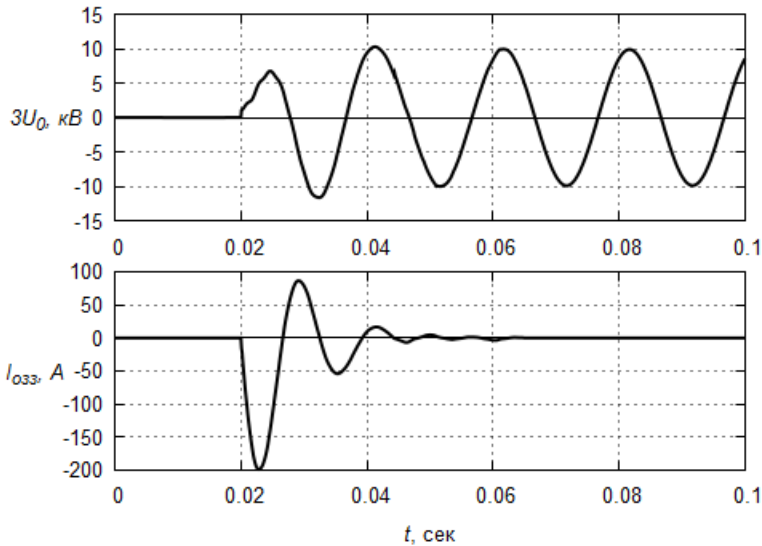


Рисунок 3 – Осциллограмма, полученная с помощью математической модели

Видно, что через 60 мс после включения управляемого источника ток в месте ОЗЗ, практически, равен нулю, т.е. остаточный (полный) ток полностью скомпенсирован.

Путем косвенных измерений с помощью математической модели и непосредственных измерений в физической модели установлено, что ток в месте повреждения после гашения дуги на следующем интервале времени 10 мс (обусловленный остаточными утечками), как правило, не превышает 300 мА.

Решена задача информационного обеспечения для цифровой системы управления компенсацией тока ОЗЗ. Для этого предложены улучшенные математические модели первичных преобразователей сигналов (трансформаторов тока нулевой последовательности), которые положены в основу исследования их частотных характеристик.

Доказано, что предложенная математическая модель достаточно точно отражает реальные процессы передачи сигналов в линейных режимах и может быть использована для исследования преобразовательных свойств ТТНП. Для исследования ТТНП в особых режимах, в которых проявляются их нелинейные свойства, должны применяться другие специальные модели с нелинейными параметрами.

Путем математического и физического моделирования одиночных электромагнитных трансформаторов тока нулевой последовательности (ТТНП) установлено, что их преобразовательные свойства в линейных режимах работы при использовании в системах компенсации токов ОЗЗ достаточно точно отображаются передаточной функцией:

$$W(p) = \frac{\frac{L_{\mu}}{r_2} p}{\frac{L_{d2} \cdot L_{\mu}}{r_2 \cdot R_{\Pi}} p^2 + \left(\frac{L_{\mu}}{R_{\Pi}} + \frac{L_{d2}}{r_2} + \frac{L_{\mu}}{r_2} \right) p + 1};$$

где L_{d2} – индуктивность рассеяния вторичной обмотки ТТНП; L_{μ} – индуктивность намагничивания ТТНП; R_{Π} – эквивалентное сопротивление потерь в магнитопроводе; $r_2 = r_{\text{обмотки}} + r_{\text{нагрузки}}$ – активное сопротивление цепи вторичной обмотки ТТНП.

Исходную передаточную функцию целесообразно записать в виде произведения передаточных функций элементарных динамических звеньев:

$$W(p) = \frac{\frac{L_{\mu}}{r_2} p}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)},$$

где постоянные времени T_1 и T_2 определяются так:

$$T_1 = \frac{L_{d2} R_{\Pi} + L_{\mu} r_2 + L_{\mu} R_{\Pi} + \sqrt{(L_{d2} R_{\Pi} + L_{\mu} r_2 + L_{\mu} R_{\Pi})^2 - 4 L_{\mu} L_{d2} R_{\Pi} r_2}}{2 R_{\Pi} r_2};$$

$$T_2 = \frac{L_{d2}R_{\Pi} + L_{\mu}r_2 + L_{\mu}R_{\Pi} - \sqrt{(L_{d2}R_{\Pi} + L_{\mu}r_2 + L_{\mu}R_{\Pi})^2 - 4L_{\mu}L_{d2}R_{\Pi}r_2}}{2R_{\Pi}r_2}.$$

Учитывая реальное соотношение параметров ТТНП можно принять:

$$T_1 = \frac{L_{\mu}}{r_2}; T_2 = \frac{L_{d2}}{R_{\Pi}}.$$

Тогда упрощенную передаточную функцию ТТНП можно записать так:

$$W(p) = \frac{T_1 p}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)}.$$

Применительно к нижним частотам с учетом реальных соотношений параметров ТТНП можно принять $T_2 p = 0$.

Таким образом, для диапазона нижних частот, где сосредоточена основная часть энергии спектра токов нулевой последовательности, можно принять:

$$W(p) = \frac{T_1 p}{(T_1 p + 1)}.$$

Установлено, что статические и динамические погрешности ТТНП связаны с параметрами ТТНП экспоненциальными функциями, убывающими при увеличении постоянной времени. Иными словами, увеличение T_1 приближает свойства ТТНП к свойствам идеального преобразователя сигналов – безинерционного звена.

Определены границы областей использования линейных моделей ТТНП. Граничные условия заданы с помощью коэффициента нелинейных искажений k_f , который определен как отношение среднеквадратичного значения суммы всех высших гармонических составляющих выходного сигнала к действующему значению составляющей вторичного сигнала основной частоты при воздействии на вход синусоидального сигнала. Таким образом, заданы границы области трех параметров: частоты, коэффициента передачи и амплитуды входного сигнала, в которой нелинейные искажения, вносимые ТТНП, не превышают допустимого уровня.

Аналитические решения, физическое моделирование и испытания образцов ТТНП подтвердили достоверность теоретических результатов и правомерность использования разработанной математической модели ТТНП.

Обобщение результатов этих исследований позволило установить, что ТТНП с большими коэффициентами трансформации (470/1 и более), как правило, имеют достаточно хорошие метрологические показатели в статике и динамике, и могут быть использованы во вновь разрабатываемых системах компенсации тока ОЗЗ и в защитах от ОЗЗ. Характеристики ТТНП с небольшими коэффициентами трансформации (менее 470/1), традиционно

используемые совместно с электромеханическим оборудованием, не удовлетворяют требованиям новых систем защиты и автоматики по неискажающей передаче сигналов, и требуется их улучшение.

В третьей главе приведены материалы, связанные с разработкой и исследованием образцов управляемого заземления нейтрали сети.

Аппаратная часть опытного образца управляемого заземления нейтрали сети выполнена в виде комплекса, содержащего нейтралеобразующий трансформатор, управляемый ДГР, компенсатор остаточного тока и систему управления компенсацией полного тока ОЗЗ. Номинальная мощность составляет 800 кВА при номинальном напряжении 10,5 кВ. Структурная схема опытного образца показана на рисунке 4.

Внешний вид специального ДГР с дополнительной обмоткой компенсации остаточного тока и шкафа компенсатора остаточного тока ОЗЗ показан на рисунке 5а и рисунке 5б соответственно.

Программная часть опытного образца базируется на изложенных теоретических предпосылках и реализована в общей системе управления ДГР и управляемого источника тока (СУ ДГР и СУ УИТ), выполненной на основе базового микропроцессорного терминала «Бреслер-0107». Последовательно на основе предложенной концепции разработаны алгоритмы и управляющие программы компенсации полного тока ОЗЗ.

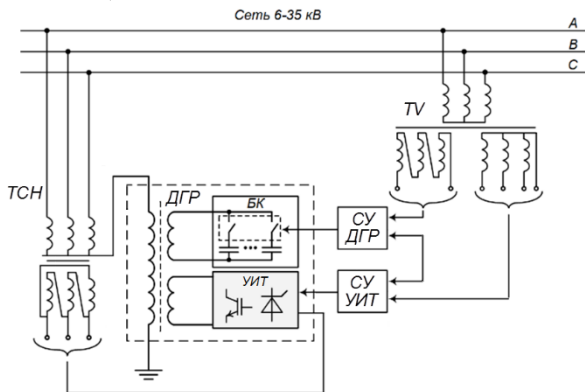


Рисунок 4 – Структурная схема опытного образца

Своеобразие ДГР, используемого в опытном образце, заключается в том, что он содержит дополнительную обмотку, через которую подключается к сети управляемый источник тока УИТ, и датчики сигналов для системы управления. Дополнительная обмотка обеспечивает гальваническое разделение выходных цепей УИТ и силовой сети. При этом существенно смягчаются условия работы УИТ, и, как следствие, снижается степень его уязвимости и достигается повышение надежности работы в целом.

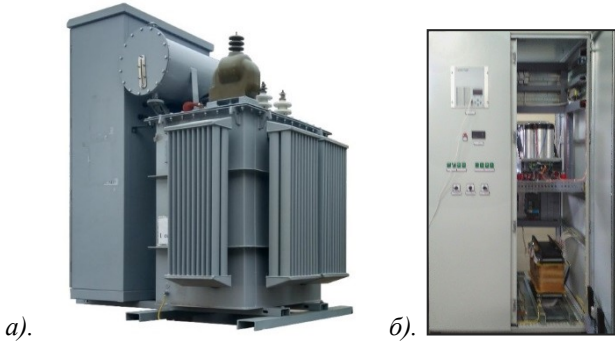


Рисунок 5 – Внешний вид специального ДТР (а) и шкафа компенсатора остаточного тока (б)

Проведены исследовательские испытания управляемого заземления нейтрали. Создана физическая модель сети с компенсацией полного тока на напряжении 10 кВ с током однофазного замыкания на землю 30 А (рисунок 6), что позволило получить в заводской лаборатории близкие по физической сущности к реальным процессы дуговых замыканий на землю. Емкость сети моделируется высоковольтными конденсаторами.

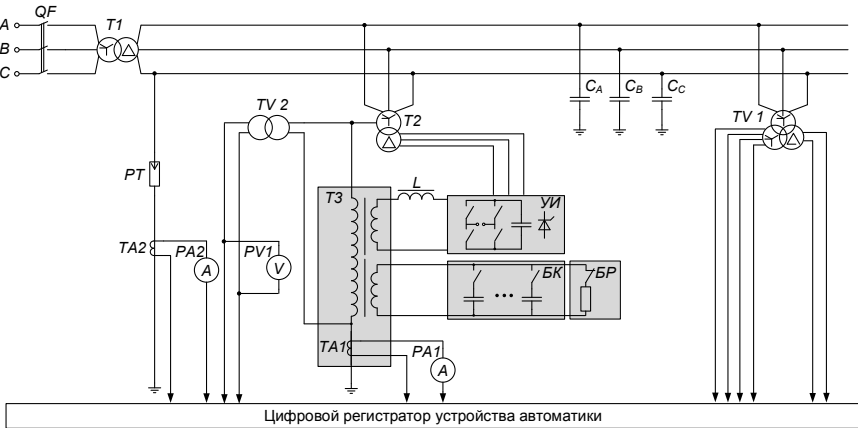


Рисунок 6 – Схема физической модели

Для моделирования дуговых замыканий использованы специальные разрядники рогового и шарового типов, а также – кабель с искусственно поврежденной изоляцией (рисунок 7).

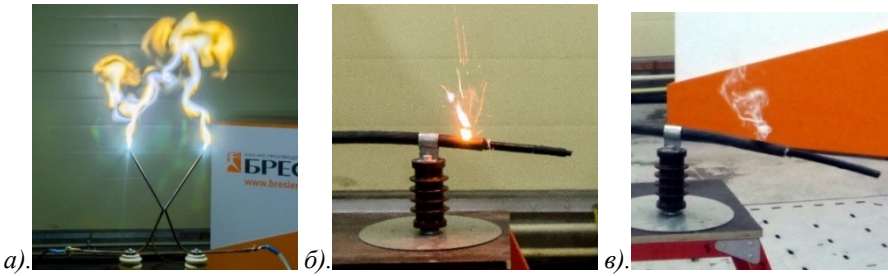


Рисунок 7 – Вид рогового разрядника при ОЗЗ (а), кабеля при искусственно созданном дуговом ОЗЗ (б) и кабеля после гасящего воздействия компенсации полного тока (в)

Реактивная (емкостная) составляющая остаточного тока ОЗЗ создается в физической модели за счет расстройки ДГР в диапазоне от 0,5% до 100%.

Для создания активной составляющей тока ОЗЗ в физической модели предусмотрен блок резисторов БР, который в опытах ОЗЗ позволяет получить активную составляющую тока ОЗЗ от 0 до 5,4 А.

На рисунке 8 показана наиболее характерная осциллограмма процесса при дуговом ОЗЗ (разрядник рогового типа).

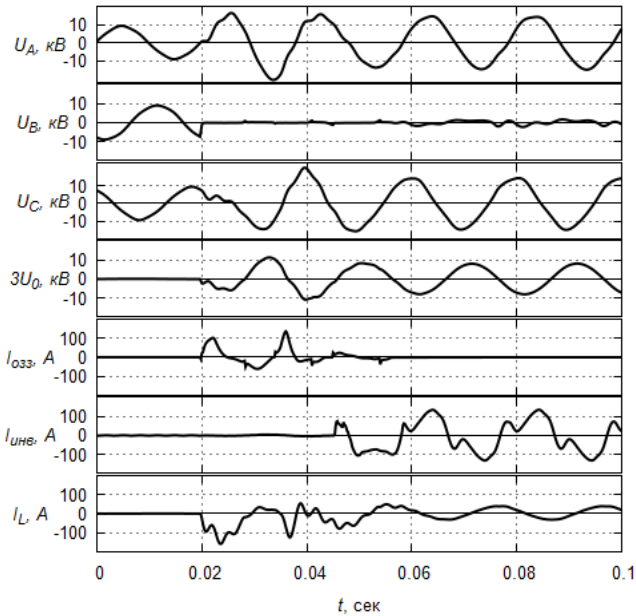


Рисунок 8 – Осциллограмма процесса компенсации тока при устойчивом ОЗЗ в физической модели сети

Напряжения фаз А, В, С относительно земли (обозначены соответственно U_A , U_B , U_C); напряжение на нейтрали – $3U_0$; ток в месте ОЗЗ – $I_{OЗЗ}$; выходной ток УИТ – $I_{ИНВ}$; ток ДГР – I_L .

Кроме этого, для каждого шлейфа приведены значения контролируемых сигналов в моменты, отмеченные двумя указками соответственно.

После замыкания фазы В на землю при $t=0,02$ напряжения неповрежденных фаз относительно земли U_A и U_C увеличились в 1,7 раз. Напряжение относительно земли поврежденной фазы U_B уменьшилось практически до нуля. Напряжение нулевой последовательности $3U_0$ возросло до уровня фазного напряжения сети. После завершения переходного процесса в цепи ДГР устанавливается действующее значение тока (I_L) 30 А. Электрическая дуга в месте повреждения, поддерживаемая током $I_{OЗЗ}$, существует, в общем, примерно 0,035 с. Видно, что процесс гашения дуги начинается при включении УИТ (при $t=0,045$ с) и заканчивается при $t=0,06$ с.

Из серии опытов, проведенных при различных условиях, установлено, что время от момента начала замыкания до полного гашения дуги составляет не более 60 мс.

Для предотвращения повторных электрических пробоев места повреждения система управления компенсацией поддерживает близкое к нулю значение напряжения поврежденной фазы, создавая таким образом «виртуальное замыкание на землю» в сети. Оно отличается от обычного ОЗЗ тем, что является полностью управляемым состоянием сети и при нем отсутствует ток в месте повреждения.

Проведен всесторонний анализ осциллограмм, полученных при исследовательских испытаниях. Для количественного сопоставления результатов, полученных путем математического и физического моделирования, с целью оценки адекватности математической модели, проведен анализ осциллограмм в частотной области. Сигналы, соответствующие наиболее характерному ОЗЗ, как видно на рисунке 9, имеют аналогичный спектральный состав в диапазоне частот от 0 до 300 Гц. Из сравнения полученных осциллограмм следует, что математическая модель достаточно точно воспроизводит процессы ОЗЗ при компенсации полного тока ОЗЗ и может служить эффективным инструментом для исследования этих процессов.

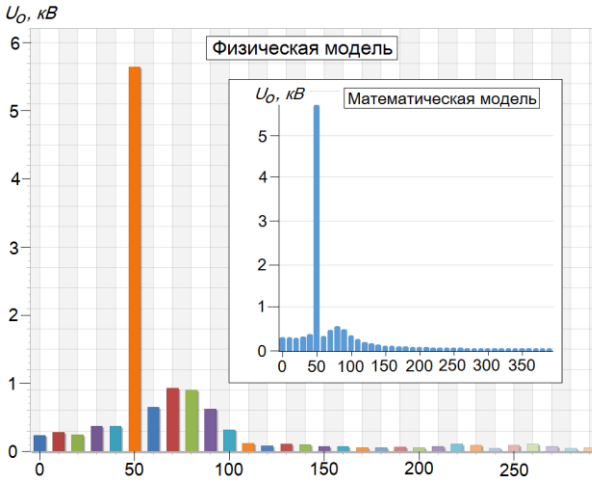


Рисунок 9 – Спектры токов ОЗЗ

Опытный образец управляемого заземления с функцией компенсации полного тока ОЗЗ разработан, изготовлен и введен в опытную эксплуатацию на действующей подстанции ПАО «МРСК Волги». Схема подключения показана на рисунке 10.

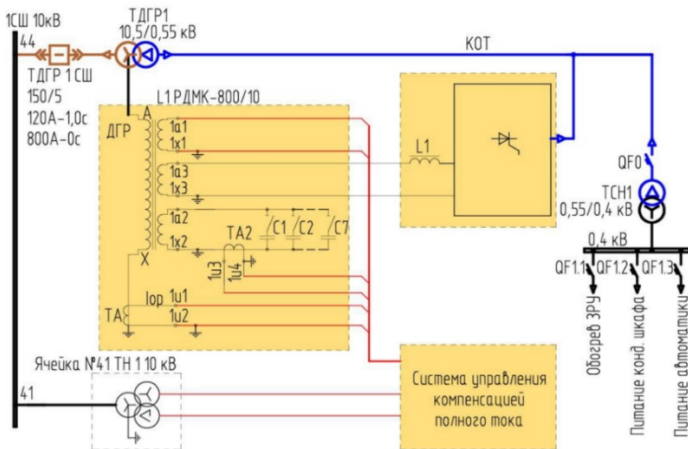


Рисунок 10 – Схема подключения опытного образца на подстанции

Получен опыт эксплуатации в реальных условиях. Проведен анализ работы опытного образца при реальных ОЗЗ, который подтвердил все основные параметры управляемого заземления, заданные при разработке.

На рисунке 11 приведена осциллограмма, записанная автоматикой управления ДГР на действующей подстанции. Показана кривая изменения напряжения нулевой последовательности при одиночных пробоях на землю с большим интервалом времени, обусловленным длительным восстановлением напряжения на поврежденной фазе.

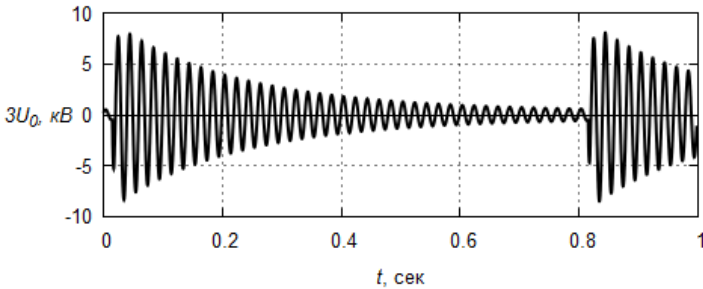


Рисунок 11 – Осциллограмма ОЗЗ в реальной сети

Параметры реальной сети, подключенной к шинам этой подстанции, введены в математическую модель и расчетным путем получены соответствующие кривые (рисунок 12) напряжения нулевой последовательности и тока ОЗЗ (который не доступен для измерения в условиях реальной подстанции).

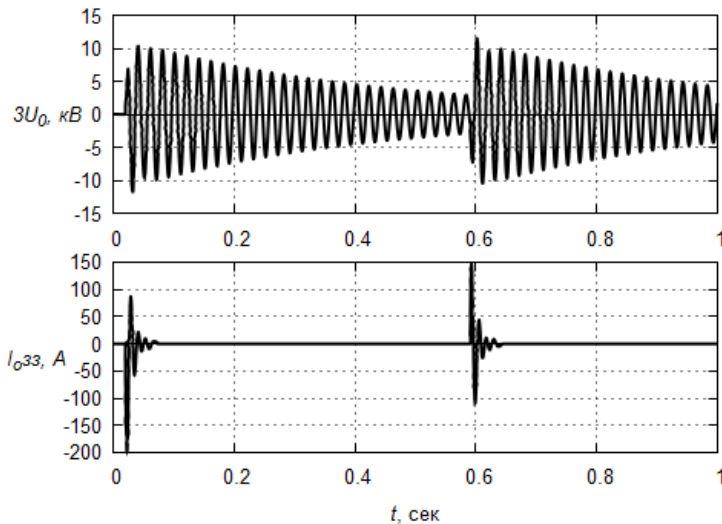


Рисунок 12 – Временная диаграмма процессов при ОЗЗ, полученная с помощью математической модели

Возможность получать временные диаграммы изменения важных для анализа параметров, безусловно, подчеркивает эффективность применения математической модели для исследований.

Под руководством и при непосредственном участии автора последовательно выполнены все этапы разработки и исследования управляемого заземления нейтрали сети: от базовых алгоритмов и программ, эскизного проектирования (с этапами разработки, изготовления и исследовательских испытаний опытных образцов) до создания рабочей конструкторской документации и изготовления, монтажа и наладки опытного образца на действующей подстанции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Создано управляемое заземление нейтрали с функцией компенсации полного тока однофазного замыкания на землю для сетей 6-10 кВ, обладающее новыми свойствами снижения тока и гашения электрической дуги в месте однофазного замыкания на землю и обеспечивающее повышение надежности и безопасности этих сетей. Достигнута возможность снижать ток в месте ОЗЗ до уровня, обеспечивающего гашение дуги, и создавать условия для предотвращения повторного зажигания дуги.

2. Предложен метод компенсации полного тока (содержащего активную составляющую и гармонические составляющие с частотами, отличными от частоты сети) и гашения электрической дуги в месте однофазного замыкания на землю. Обоснована реализуемость предложенного метода с помощью управляемого источника тока. Своеобразие метода заключается в его способности создавать в электрической сети условия, допускающие эксплуатацию этой сети при наличии однофазного замыкания на землю в течение длительного времени.

3. Разработаны математическая и физическая модели управляемого заземления нейтрали, доказано их соответствие реальному объекту. Проведены всесторонние теоретические и экспериментальные исследования в стационарных и переходных режимах, которые подтвердили правомерность принятых в процессе разработки ограничений и допущений, доказали преимущества разработанного управляемого заземления и позволили определить его основные эксплуатационные параметры. Остаточный ток после гашения дуги в месте ОЗЗ, обусловленный остаточными утечками, не превышает 300 мА. Время, необходимое для компенсации полного тока ОЗЗ и гашения дуги в месте повреждения, составляет примерно 60 мс.

4. Решена задача информационного обеспечения для цифровой системы управления компенсацией тока однофазного замыкания на землю.

Предложены улучшенные математические модели первичных преобразователей сигналов (трансформаторов тока нулевой последовательности), которые положены в основу исследования их частотных характеристик. Определены границы областей использования линейной модели. Проведен анализ погрешностей в стационарных и динамических режимах работы. Сформированы требования к точности преобразования сигналов. Даны рекомендации по повышению точности работы первичных преобразователей сигналов в переходных режимах. Результаты теоретических исследований (математического моделирования) подтверждены результатами физического моделирования процессов и натуральных экспериментов.

5. Разработан и изготовлен опытный образец управляемого заземления мощностью 800 кВА, который всесторонне исследован в условиях заводской лаборатории на напряжении 10 кВ с током однофазного замыкания на землю 30 А, что позволило получить близкие по существу к реальным процессы дуговых замыканий на землю. Для моделирования дуговых замыканий использованы специальные разрядники рогового и шарового типов, а также – кабель с искусственно поврежденной изоляцией. Положительные результаты заводских испытаний позволили сделать вывод о возможности включения опытного образца в реальную сеть 10 кВ на действующей подстанции.

6. Опытный образец управляемого заземления нейтрали введен в опытную эксплуатацию на действующей подстанции ПАО «МРСК Волги». Получен опыт эксплуатации в реальных условиях. Проведен анализ работы опытного образца в нормальных режимах и при реальных повреждениях в сети. Результаты анализа показали, что ввод в работу управляемого заземления нейтрали не вносит неблагоприятных изменений в условия работы сети и подтвердили все основные параметры этого управляемого заземления, заданные при разработке.

7. Результаты работы теоретического и практического характера использованы в ООО «НПП Бреслер» при выполнении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, а также в учебном процессе в Институте повышения квалификации специалистов релейной защиты и автоматики.

СПИСОК НАУЧНЫХ ТРУДОВ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в научных изданиях из перечня ВАК Министерства образования и науки РФ:

1. Дементий, Ю.А. Экспериментальные исследования управляемого заземления нейтрали с функцией компенсации полного тока замыкания на

землю в сетях 6-10 кВ / Булычев А.В., Дементий Ю.А., Козлов В.Н. // Релейная защита и автоматизация. – 2017. – № 04 (29). – С. 37-41.

2. Дементий, Ю.А. Компенсация полного тока замыкания на землю в сетях 6-10 кВ / Булычев А.В., Дементий Ю.А., Козлов В.Н. // Вестник Чувашского университета. – 2018. – № 1. – С. 24-35.

3. Дементий, Ю.А. Динамические свойства датчиков тока нулевой последовательности / Булычев А.В., Дементий Ю.А. // Релейная защита и автоматизация. – 2017. – № 04 (29). – С. 13-19.

4. Дементий, Ю.А. Измерение токов в защитах от однофазных замыканий на землю и в автоматике управления дугогасящими реакторами / Булычев А.В., Дементий Ю.А., Пряников В.С. // Электротехника. – 2017. – № 7. – С. 37-44.

Публикации в других научных изданиях:

5. Дементий, Ю.А. Компенсация тока ОЗВ в распределительных сетях 6-10 кВ. Новые технологии. / Булычев А.В., Дементий Ю.А., Козлов В.Н. // Новости Электротехники. – 2018. – № 1(109). – С. 28-30.

6. Дементий, Ю.А. Измерение токов в защитах от однофазных замыканий на землю / Булычев А.В., Дементий Ю.А., Дыбина Т.А. // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем: материалы 11-й Всеросс. науч.-техн. конф.-Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2015. – С. 317-325.

7. Дементий, Ю.А. Измерение токов в защитах от однофазных замыканий на землю / Булычев А.В., Дементий Ю.А., Дыбина Т.А. // Международный союз ученых «Наука. Технологии. Производство». – 2015. – № 7. – С. 33-36.

8. Дементий, Ю.А. Компенсация полного тока замыкания на землю в сетях 6-10 кВ / Булычев А.В., Дементий Ю.А., Имагдинов Р.А. // «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем России». Сборник тезисов докладов 4 международной научно-практической конференции. Чебоксары. 2017. – С. 13-14.

9. Дементий, Ю.А. Компенсация полного тока замыкания на землю в сетях 6-10 кВ / Булычев А.В., Дементий Ю.А., Имагдинов Р.А. // «Пути повышения надежности, эффективности и безопасности энергетического производства». Материалы 20-й Всероссийской научно-технической конференции. Дивноморское, 2017. – С. 54-56.

ДЕМЕНТИЙ ЮРИЙ АНАТОЛЬЕВИЧ
МЕТОДЫ И СРЕДСТВА КОМПЕНСАЦИИ ПОЛНОГО ТОКА
ОДНОФАЗНОГО ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ
В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать __. __ 2018 г. Формат 60x84 1/16. Печ. л. 1,5.
Бумага офсетная. Печать оперативная. Тираж 100 экз. Заказ № __.
Отпечатано в типографии ФГБОУ ВО «ЧГУ им. И.Н. Ульянова»
428015, г. Чебоксары, пр. Московский, д.15