

На правах рукописи



ФИЛАТОВА ГАЛИНА АНДРЕЕВНА

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБОВ И АЛГОРИТМОВ
ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА ОДНОФАЗНОГО ЗАМЫКАНИЯ
НА ЗЕМЛЮ В КАБЕЛЬНЫХ СЕТЯХ 6-10 кВ
ПО ПАРАМЕТРАМ ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА**

Специальность: 05.14.02 «Электрические станции и электроэнергетические системы»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Иваново – 2017

Работа выполнена на кафедре «Автоматическое управление электроэнергетическими системами» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина».

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор **Шуин Владимир Александрович**

Официальные оппоненты:

Куликов Александр Леонидович – доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», профессор кафедры «Электроэнергетика, электроснабжение и силовая электроника».

Арцишевский Ян Леонардович – кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ», доцент кафедры «Релейная защита и автоматизация энергосистем».

Ведущая организация:

Открытое акционерное общество «Энергетический институт им. Г.М. Кржижановского» (ОАО «ЭНИН»), г. Москва

Защита состоится 6 октября 2017 г. в 10⁰⁰ на заседании диссертационного совета Д 212.064.01 при ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» по адресу: 150003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, корпус Б, ауд. 237.

Отзывы на автореферат (в двух экземплярах, заверенные печатью организации) просим направлять по адресу: 150003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, Ученый совет ИГЭУ.

Тел.: (4932) 38-57-12, факс (4932) 38-57-01, e-mail: uch_sovet@ispu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Ивановского государственного энергетического университета.

Текст диссертации размещен http://ispu.ru/files/Filatova_dissertaciya.pdf

Автореферат диссертации размещен на сайте ИГЭУ www.ispu.ru.

Автореферат разослан _____ 2017 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета Д 212.064.01,
доктор технических наук, доцент



Бушуев
Евгений Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Через электрические кабельные сети напряжением 6–10 кВ распределяется более половины вырабатываемой в стране электроэнергии. Аварии в таких распределительных сетях составляют около 70% всех нарушений электроснабжения промышленных и бытовых потребителей и, как правило, сопровождаются значительным экономическим ущербом. Поэтому повышение уровня эксплуатационной надежности распределительных кабельных сетей 6–10 кВ – ключевой фактор повышения надежности и экономичности электроснабжения потребителей.

Однофазные замыкания на землю (ОЗЗ) – преобладающий вид повреждений в кабельных сетях 6–10 кВ (на 100 км кабельных линий, включая оборудование подстанций, в среднем происходит 4,9 ОЗЗ в год). Значительная часть ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ (до 80% и более), прежде всего, в начальной стадии развития повреждения изоляции в кабельных линиях (КЛ) и электрических машинах, имеет дуговой прерывистый характер. Наиболее опасной разновидностью дуговых прерывистых ОЗЗ являются дуговые перемежающиеся замыкания (ДПОЗЗ), сопровождающиеся опасными перенапряжениями на неповрежденных фазах всей электрически связанной сети. Перенапряжения, возникающие при ДПОЗЗ, часто обуславливают переходы последних в двойные, многоместные замыкания на землю и многофазные короткие замыкания (КЗ) в месте повреждения и являются одной из основных причин аварий в кабельных сетях 6–10 кВ, приводящих к значительному экономическому ущербу для потребителей. Быстрое определение поврежденной КЛ при устойчивых ОЗЗ (УОЗЗ) и ДПОЗЗ и места повреждения (зоны повреждения с точностью до участка КЛ, который без нарушения электроснабжения потребителей можно отключить для проведения высоковольтных испытаний поврежденного кабеля и точного определения места пробоя изоляции) являются главными условиями скорейшей ликвидации повреждения и восстановления нормального режима работы электрической сети.

Большая часть ОЗЗ (до 70% и более) в рассматриваемых сетях имеет кратковременный самоустраняющийся характер (КрОЗЗ). Известно, что в КЛ и электрических машинах КрОЗЗ, как правило, предшествуют полному пробоям изоляции. Поэтому селективную фиксацию КрОЗЗ можно использовать в целях диагностирования состояния изоляции элементов кабельных сетей 6–10 кВ и предотвращения аварийного отключения присоединений релейной защитой от КЗ. Однако эффективное использование информации о КрОЗЗ в целях диагностирования состояния изоляции КЛ возможно только при условии, что определено не только поврежденное присоединение, но и место (зона) пробоя изоляции.

Таким образом, определение места (зоны) пробоя изоляции при всех разновидностях ОЗЗ на КЛ 6–10 кВ, находящихся под рабочим напряжением, – актуальная задача, решение которой позволяет не только сократить затраты времени на ликвидацию повреждения и восстановление нормального режима работы сети, но и, что более важно, значительно снизить вероятность перехода повреждения в КЗ, отключаемое штатным действием релейной защиты, и уменьшить число кратковременных нарушений электроснабжения (КНЭ) потребителей. Отметим также, что решение задачи дистанционного определения места ОЗЗ (ДОМЗЗ) в распределительных кабельных сетях 6–10 кВ является одной из важных задач, связанных с реализацией концепции создания интеллектуальных активно-адаптивных электрических сетей (Smart Grid), обладающих такими свойствами, как самодиагностика, самовосстановление, способность выявлять "слабые" участки сети и изменять режим ее работы для предотвращения возникновения технологических нарушений и др.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ исследований на тему "Разработка комплекса научно-технических решений по автоматической локации однофазных замыканий на землю в распределительных кабельных сетях напряжением 6–10 кВ", выполняемых ИГЭУ в рамках федеральной целевой программы "Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы" (договор на получение субсидии 14.577.21.0215 от 3 октября 2016 г., уникальный идентификатор ПНИЭР RFMEFI57716X0215).

Степень разработанности темы исследований. Решению задачи дистанционного определения места повреждения (ОМП) на высоковольтных воздушных и кабельных линиях электропередачи большое внимание уделяется как в России, так и в других странах, однако большая часть исследований и разработок посвящена определению места короткого замыкания (ОМКЗ). Отметим, что в силу специфики электромагнитных процессов при ОЗЗ в электрических сетях среднего напряжения в сравнении с электромагнитными процессами при КЗ, обусловленной прежде всего применяемыми в них режимами заземления нейтрали (изолированная нейтраль, резонансное заземление нейтрали через дугогасящий реактор (ДГР), различные варианты резистивного заземления нейтрали и др.), различием видов ОЗЗ (устойчивые, дуговые, кратковременные самоустраивающиеся), особенностями конфигурации сетей, наличием, кроме центров питания (ЦП), распределительных и трансформаторных подстанций (РП и ТП) – с различными требованиями и техническими возможностями в части оснащения отходящих линий электропередачи (ЛЭП) и участков ЛЭП устройствами релейной защиты и автоматики (РЗА), большинство методов дистанционного ОМКЗ не может быть использовано для решения задачи дистанционного определения места ОЗЗ.

Методам и устройствам, ориентированным непосредственно на решение задачи ДОМЗЗ на линиях, находящихся под рабочим напряжением, в электрических сетях среднего напряжения и, прежде всего, в кабельных сетях 6–10 кВ, как показывает анализ различных источников информации, уделяется значительно меньшее внимание. Большая часть работ в данной области посвящена методам и приборам локализации места повреждения на отключенных ЛЭП. Теоретические и экспериментальные основы определения мест повреждения на отключенных от сети кабельных и воздушных линиях рассмотрены в работах Шалыта Г.М., Спиридонова В.К., Дементьева В.С., Платонова В.В. Особо следует отметить работы Шалыта Г.М., с чьим именем связано развитие у нас в стране импульсных методов определения места повреждения (методов импульсной рефлектометрии), основанных на активном зондировании ЛЭП.

Разработки методов ДОМЗЗ на ЛЭП 6–35 кВ, находящихся под рабочим напряжением, в России практически появились в конце 90-х – начале 2000-х годов, причем большая часть разработок (Байбурин Э.Р., Куликов А.Л., Петрухин А.А., Закамский Е.В., Латипов А.Г., Шалин А.И. и др.) относится к воздушным сетям 6–35 кВ, а меньшая (Качесов Е.В.) – к кабельным сетям 6–10 кВ. Однако эффективность разработанных для распределительных КЛ напряжением 6–10 кВ методов и устройств ДОМЗЗ не подтверждена опытом их внедрения и эксплуатации. Поэтому актуальны дальнейшие исследования и разработки в данном направлении.

Целью работы является разработка и исследование способов и алгоритмов ДОМЗЗ на линиях распределительных кабельных сетей 6–10 кВ, находящихся под рабочим напряжением, основанных на использовании электрических величин переходного процесса.

Основные задачи, решаемые в работе:

1. Анализ особенностей распределительных кабельных сетей 6–10 кВ различного назначения для определения области применения устройств ДОМЗЗ и основных требований к ним.
2. Сравнительный анализ известных способов ДОМЗЗ на кабельных линиях 6–10 кВ, находящихся под рабочим напряжением.
3. Исследование переходных процессов при ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ с применением аналитической и математических имитационных моделей в целях выбора информационных параметров для решения задачи ДОМЗЗ.
4. Исследование частотных характеристик и разработка математических моделей первичных преобразователей тока и напряжения, применяемых в кабельных сетях 6–10 кВ для подключения устройств ДОМЗЗ.
5. Разработка способов и алгоритмов ДОМЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ, основанных на использовании электрических величин переходного процесса, обеспечивающих устойчивость к влиянию факторов, искажающих замер.
6. Анализ факторов, влияющих на точность определения места повреждения в кабельных сетях 6–10 кВ по параметрам переходного процесса при ОЗЗ.

Объект и предмет исследований. Объектом исследований являются электрические кабельные сети напряжением 6–10 кВ городского и промышленного электроснабжения. Предмет

исследований – способы ДОМЗЗ на кабельных линиях 6–10 кВ, находящихся под рабочим напряжением.

Методы исследований. Для решения задач в работе использовались методы теории электрических цепей, электромагнитных переходных процессов в электроэнергетических системах (ЭЭС), математического и физико-математического моделирования электрических цепей.

Научную новизну работы представляют:

1. Результаты исследований переходных процессов при ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ в целях выбора информационных параметров, обеспечивающих уменьшение влияния изменений суммарного емкостного тока контролируемой сети и переходного сопротивления в месте повреждения на точность замера устройств ДОМЗЗ.

2. Математические модели кабельных трансформаторов тока нулевой последовательности (ТТНП) для исследования влияния их частотных характеристик на точность ДОМЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ по параметрам переходных процессов.

3. Способ и алгоритм ДОМЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ, основанный на контроле параметров электрических величин переходного процесса, обеспечивающий повышение точности замера расстояния до места повреждения в online-режиме в условиях влияния различных факторов.

4. Способ и алгоритм ДОМЗЗ, основанный на использовании имитационной алгоритмической модели контролируемой кабельной линии, обеспечивающий повышение точности замера расстояния до места повреждения в online-режиме в условиях влияния различных факторов.

5. Методика компенсации суммарной погрешности определения места повреждения при ОЗЗ, обусловленной суммарным влиянием различных факторов, при использовании способов ДОМЗЗ на основе электрических величин переходного процесса.

Практическая ценность результатов работы заключается в следующих основных положениях:

1. Результаты анализа особенностей кабельных сетей 6–10 кВ промышленного и городского электроснабжения, позволяющие обосновать методы локализации всех разновидностей ОЗЗ в сетях различного назначения, могут быть использованы проектными организациями при выборе принципов выполнения селективной защиты и сигнализации ОЗЗ на различных объектах кабельных сетей 6–10 кВ и обосновании целесообразности применения устройств ДОМЗЗ.

2. Результаты анализа информационных параметров электрических величин переходного процесса в кабельных сетях 6–10 кВ и факторов, влияющих на точность замера расстояния до места повреждения, могут быть использованы разработчиками способов и устройств ДОМЗЗ.

3. Математические модели кабельных ТТНП могут быть использованы разработчиками для исследования динамических режимов функционирования устройств защиты от ОЗЗ и анализа влияния частотных характеристик ТТНП на точность ДОМЗЗ по параметрам электрических величин переходного процесса.

4. Разработанные способы и алгоритмы ДОМЗЗ на основе переходных процессов позволяют сократить временные и финансовые затраты на поиск места повреждения в кабельных сетях 6–10 кВ, прежде всего, систем городского электроснабжения.

5. Разработанные имитационные модели кабельных сетей 6–10 кВ, способы и алгоритмы ДОМЗЗ на основе переходных процессов, модели ТТНП могут быть использованы в научно-исследовательской работе аспирантов по специальности 05.14.02, а также в учебном процессе подготовки магистров и бакалавров по профилю "Релейная защита и автоматизация ЭЭС".

Достоверность и обоснованность полученных результатов определяются корректностью принятых допущений, использованием методов классической теории электрических цепей и теории электромагнитных переходных процессов в ЭЭС, сходимостью результатов, полученных аналитическими методами, с данными исследований на физических и математических моделях и с результатами исследований других авторов, опубликованными в литературных источниках, а также с данными экспериментальных исследований.

Внедрение результатов исследований:

1. Результаты работы – математические модели первичных преобразователей тока и напряжения нулевой последовательности – использованы при разработке и исследованиях принципов выполнения защиты от ОЗЗ для кабельных сетей 6–10 кВ (договор № 56/13/245.ОТМ с ООО НПП "ЭКРА" на выполнение НИР на тему «Исследование и разработка защит от замыканий на землю в распределительных кабельных сетях 6–10 кВ», 2013–2015 гг.).

2. Результаты разработок и исследований в части способов и алгоритмов ДОМЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ планируются к внедрению Индустриальным партнером ИГЭУ по соглашению № 14.577.21.0215 о предоставлении субсидии от 3 октября 2016 года ООО НПП "ЭКРА" по завершении исследований и разработок на тему "Разработка комплекса научно-технических решений по автоматической локации однофазных замыканий на землю в распределительных кабельных сетях напряжением 6–10 кВ" в 2018 г.

3. Результаты диссертационных исследований и разработок используются в учебном процессе Ивановского государственного энергетического университета при подготовке магистров по направлению "Электроэнергетика и электротехника".

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Результаты анализа особенностей кабельных сетей 6–10 кВ, обосновывающие методы локализации всех разновидностей ОЗЗ в сетях различного назначения и область применения устройств ДОМЗЗ.

2. Результаты исследований переходных процессов при ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ в аспекте выбора информационных параметров переходных токов и напряжений для решения задачи ДОМЗЗ, обеспечивающих повышение точности замера расстояния до места повреждения в условиях влияния изменений суммарного емкостного тока контролируемой сети и переходного сопротивления в месте повреждения.

3. Математические модели кабельных ТТНП, основанные на использовании уравнения динамического перемагничивания и усредненной кривой намагничивания сердечника трансформатора тока, обеспечивающие приемлемую точность расчетов мгновенных значений вторичных токов при различных нагрузках.

4. Способы и алгоритмы ДОМЗЗ, основанные на использовании электрических величин переходного процесса, обеспечивающие повышение точности замера расстояния до места повреждения в online-режиме и сокращение временных и финансовых затрат на поиск места повреждения, прежде всего, в кабельных сетях 6–10 кВ систем городского электроснабжения.

Личный вклад автора заключается в постановке цели и конкретных задач исследования, сборе, обработке и анализе статистической информации по кабельным сетям 6–10 кВ систем городского электроснабжения, получении аналитических решений отдельных задач, разработке имитационных математических моделей кабельных сетей 6–10 кВ для исследования переходных процессов при ОЗЗ в целях выбора информационных параметров для дистанционного ДОМЗЗ, разработке принципов построения математических моделей, экспериментальных исследованиях кабельных ТТНП и первичных преобразователей напряжения 6–10 кВ, разработке и исследовании способов и алгоритмов ДОМЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ на основе переходных процессов, анализе факторов, влияющих на точность замера расстояния до места повреждения, оценке полученных результатов.

Соответствие диссертации формуле специальности: в соответствии с формулой специальности 05.14.02 в диссертационной работе объектом исследований являются распределительные электрические кабельные сети среднего напряжения, предметом исследований – способы дистанционного определения места наиболее частого вида повреждений – однофазных замыканий на землю.

Соответствие диссертации области исследования специальности: представленные в диссертации результаты соответствуют области исследования специальности 05.14.02, а именно:

– п. 6 «Разработка методов математического и физического моделирования в электроэнергетике» паспорта специальности 05.14.02 соответствуют разработка математических имитационных моделей кабельных сетей 6–10 кВ для исследования электрических величин переходного процесса, позволяющих определить расстояние до места ОЗЗ, и математических моделей первичных преобразователей тока и напряжения нулевой последовательности

для исследования влияния их частотных характеристик на точность разработанных способов ДОМЗЗ;

– п. 9 «Разработка методов анализа и синтеза систем автоматического регулирования, противоаварийной автоматики и релейной защиты в электроэнергетике» соответствуют разработки способов и алгоритмов ДОМЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ, основанных на использовании электрических величин переходного процесса.

Апробация результатов исследований. Результаты исследований докладывались и обсуждались на XVII, XVIII и XIX Международных научно-технических конференциях «Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии» («Бенардосовские чтения», Иваново, 2013, 2015, 2017 гг.), X и XI Международных молодежных конференциях «Тинчуринские чтения» (Казань, 2015, 2016 гг.), IV и VI Международных научно-технических конференциях «Электроэнергетика глазами молодежи» (Новочеркасск, 2013 г., Иваново, 2015 г.), XIX и XXI Международных научно-технических конференциях студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» в Московском энергетическом институте (Москва, 2013, 2015 гг.), Международной конференции PESS 2015 – Power and energy student summit 2015 (Дортмунд, Германия, 2015 г.), ПХ, IX, X Международных научно-технических конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия» (Иваново, 2013, 2014, 2015 г.), V Международной научной конференции «Проектирование инженерных и научных приложений в среде MATLAB» (Харьков, Украина, 2011 г.), Региональной научно-технической конференции в филиале ТУ (МЭИ) (Смоленск, 2011 г.).

В составе коллективов авторов результаты работы отмечены медалями и дипломами международных выставок: 45-го Международного Салона «Salon International des Inventions» (Женева, Швейцария, 2017 г., золотая медаль); 65-го Всемирного салона "Брюссель Иннова/Эврика 2016" «Eureka!», (Брюссель, Бельгия, 2016 г., золотая медаль); 43-го Международного Салона «Salon International des Inventions», (Женева, Швейцария, 2015 г., золотая медаль); 63-го Всемирного салона "Брюссель Иннова/Эврика 2014" «Eureka!» (Брюссель, Бельгия, 2014 г., золотая медаль).

Диссертационные исследования и разработки выполнены при финансовой поддержке:

1. Министерства образования и науки РФ в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы» при выполнении прикладных научно-исследовательских и экспериментальных работ (ПНИЭР) по темам:

– «Разработка комплекса научно-технических решений по автоматической локализации однофазных замыканий на землю в распределительных кабельных сетях напряжением 6–10 кВ» (соглашение № 14.577.21.0215 о предоставлении субсидии от 3 октября 2016 года, 2016–2018 гг., уникальный идентификатор ПНИЭР RFMEFI57716X0215);

– «Разработка и исследование цифровых трансформаторов напряжения 110 кВ, основанных на фундаментальных физических законах с оптоэлектронным интерфейсом для учета электроэнергии в интеллектуальной электроэнергетической системе с активно-адаптивной сетью» (соглашение № 14.574.21.0072 о предоставлении субсидии от 27 июня 2014 года, 2014–2016 гг., уникальный идентификатор ПНИЭР RFMEFI57414X0072).

2. Программы «Участник молодежного научно-инновационного конкурса» («УМНИК») Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере, договор №6192ГУ/2015 от 23.06.2015 г.

Публикации. Результаты исследований опубликованы в 33 печатных работах общим объемом 16,15 п.л., авторский вклад 7 п.л., из них 3 статьи – в изданиях по перечню ВАК, 3 статьи – в англоязычных журналах и сборниках, индексируемых в международной базе данных SCOPUS.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 239 источников. Общий объем диссертации составляет 239 страниц, из них основной текст – 199 страницы, список литературы – 28 страниц, приложения – 12 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, степень ее разработанности, сформулированы цели и задачи, отражена научная новизна и практическая значимость полученных результатов, дана общая характеристика работы.

В главе 1 сформулированы основные задачи ДОМЗЗ на КЛ 6–10 кВ под рабочим напряжением:

1. Определение поврежденной кабельной линии при всех разновидностях ОЗЗ;
2. Локализация места (зоны) повреждения на КЛ.

Первая задача решается средствами селективной сигнализации ОЗЗ. Решения данной задачи известны и достаточно хорошо проработаны в России и ряде других стран.

Решению второй задачи в России до последних лет практически не уделялось внимания. В настоящее время локализация зоны повреждения на КЛ в России и большинстве других стран осуществляется только при устойчивых ОЗЗ методом оперативных переключений, что требует больших затрат времени (до нескольких часов) и связано с опасностью перехода ОЗЗ в процессе поиска в двойные замыкания и междуфазные КЗ и аварийного отключения КЛ релейной защитой от КЗ. Эффективных методов ОМП при более опасных для сети ДПОЗЗ, а также при КрОЗЗ до сих пор не существует. Поэтому разработка способов и алгоритмов дистанционного определения места повреждения при всех разновидностях ОЗЗ является актуальной задачей, решение которой позволяет сократить затраты времени на поиск и ликвидацию повреждения и повысить эксплуатационную надежность кабельных сетей 6–10 кВ.

На основе анализа особенностей распределительных кабельных сетей различного назначения обоснованы подходы к решению задачи локализации зоны ОЗЗ на КЛ под рабочим напряжением:

– в кабельных сетях 6–10 кВ систем промышленного электроснабжения – с использованием устройств селективной сигнализации, обеспечивающих фиксацию всех разновидностей ОЗЗ, включая КрОЗЗ, устанавливаемых на всех объектах электрически связанной сети (ЦП, РП и ТП); применение устройств ДОМЗЗ на ЦП и РП кабельных сетей 6–10 кВ промышленного электроснабжения может дать положительный эффект при отсутствии на ТП устройств защиты от ОЗЗ, обеспечивающих селективную сигнализацию ДПОЗЗ и КрОЗЗ;

– в кабельных сетях городского электроснабжения, на ТП которых применение стационарных устройств селективной сигнализации всех разновидностей ОЗЗ технически невозможно, – с использованием специальных устройств ДОМЗЗ, устанавливаемых на ЦП и РП.

Сформулированы основные требования к устройствам ДОМЗЗ на КЛ 6–10 кВ, находящихся под рабочим напряжением, основными из которых являются возможность их применения в кабельных сетях, работающих с различными режимами заземления нейтрали; определение места повреждения при всех разновидностях ОЗЗ, включая КрОЗЗ и ДПОЗЗ; точность, обеспечивающая возможность локализации места (зоны) повреждения для отключения его от сети без нарушения электроснабжения или технологий производства потребителей для проведения высоковольтных испытаний; возможность определения зоны повреждения в online-режиме без дополнительных расчетов по расчетным программам или моделям контролируемой сети (быстродействие).

Разработана классификация способов ДОМЗЗ на КЛ под рабочим напряжением (рис. 1).

На основе сравнительного анализа основных свойств и особенностей методов ДОМЗЗ показано, что эффективное применение импульсных и локационных методов в кабельных сетях 6–10 кВ встречает трудности, обусловленные особенностями конфигурации и параметров КЛ рассматриваемых сетей КЛ и данного вида повреждений, а методы, основанные на использовании "наложенных" токов промышленной или высоких частот не обеспечивают определение места повреждения при КрОЗЗ и ДПОЗЗ. Наиболее перспективными для решения рассматриваемой задачи представляются методы, основанные на непосредственных измерениях параметров электрических величин переходного процесса, возникающего в момент пробоя изоляции фазы КЛ на землю (методы ПАР), а также методы на основе алгоритмических моделей объекта (АМО), использующие сравнение наблюдаемых электрических величин переходного процесса и электрических величин, полученных с использованием модели контролируемого объекта.



Рис. 1. Классификация методов ДОМЗЗ на линиях, находящихся под рабочим напряжением

Сравнительный анализ дистанционных параметрических методов ДОМЗЗ, основанных на использовании электрических величин переходного процесса, а также методов на основе АМО, показал, что известные способы и предложения по выполнению устройств ДОМЗЗ не учитывают в полной мере влияние на точность определения зоны повреждения таких факторов, как изменения суммарного емкостного тока контролируемой сети в различных режимах ее работы, активных потерь в контуре нулевой последовательности поврежденной линии и переходного сопротивления в месте повреждения, погрешностей первичных и вторичных преобразователей тока и напряжения, погрешностей определения параметров кабельных линий в переходных режимах ОЗЗ, их зависимость от частоты тока переходного процесса и других влияющих факторов и нуждаются в совершенствовании. Определены основные задачи совершенствования способов ДОМЗЗ на кабельных линиях 6–10 кВ, находящихся под рабочим напряжением, и обоснованы методы их решения.

В главе 2 приведены результаты исследований переходных процессов при ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ, выполненных с использованием аналитической модели на основе двухчастотной (учитывающей процессы разряда и заряда емкостей) схемы замещения и имитационных моделей, реализованных в системе Matlab. Показано, что с учетом технических возможностей измерения электрических величин в переходных режимах ОЗЗ на объектах кабельных сетей 6–10 кВ для решения задачи ДОМЗЗ целесообразно использовать ток нулевой последовательности $3i_0(t)$, напряжение нулевой последовательности $3u_0(t)$ и фазные напряжения $u_\phi(t)$.

На основе указанных исследований определены информационные параметры электрических величин переходного процесса при ОЗЗ, которые могут быть использованы для определения расстояния до места повреждения в кабельных сетях 6–10 кВ, а также факторы, оказывающие наиболее существенное влияние на параметры электрических величин переходного процесса – суммарный емкостный ток сети $I_{c\Sigma}$, переходное сопротивление в месте повреждения R_n , начальное значение напряжения на поврежденной фазе в момент пробоя изоляции $t = 0$ $u_\phi(0) = U_m \sin \varphi$, т.е. начальная фаза пробоя φ . Предложен способ нормирования электрических величин по значению напряжения $u_\phi(0)$, практически исключая влияние начальной фазы напряжения φ на параметры контролируемых электрических величин переходного процесса при ОЗЗ.

Показано, что временные параметры электрических величин переходного процесса, такие, как длительность первой полуволны переходного тока или производной напряжения ну-

левой последовательности, момент времени, соответствующий первому максимуму переходного напряжения нулевой последовательности и др., существенно зависят от таких факторов, как величина $I_{c\Sigma}$, которая может изменяться в реальных условиях эксплуатации сети, и переходное сопротивление в месте ОЗЗ, и поэтому не могут быть эффективно использованы для решения задачи ДОМЗЗ.

Исследованы возможности использования в целях ДОМЗЗ максимальных значений первых и максимальных значений вторых производных переходных токов и напряжений. На основе исследований, выполненных с использованием аналитической модели переходного процесса при ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ, показано, что наиболее устойчивым информационным параметром является начальное значение производной переходного тока нулевой последовательности $i'_{\theta}(0)$, которое не зависит от величины $I_{c\Sigma}$ и практически не зависит от R_{II} (рис. 2).

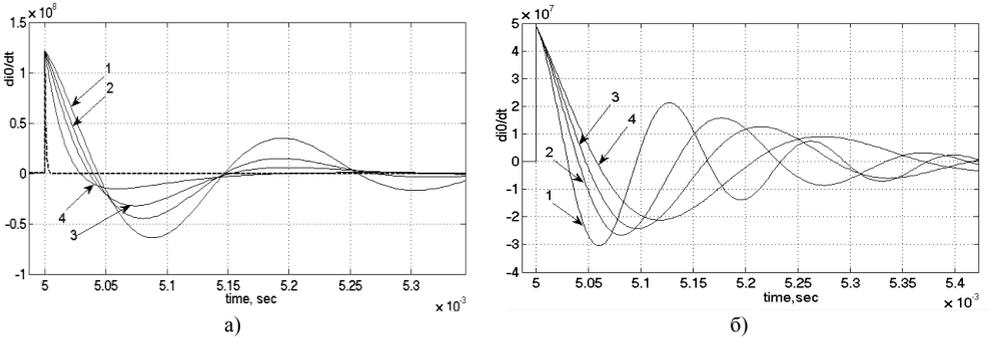


Рис.2. Зависимости производной свободных составляющих тока нулевой последовательности для сети $U_{ном} = 6$ кВ при $l_s = 1$ км и $\varphi = 90^\circ$:
 а – от R_{II} при $I_{c\Sigma} = 30$ А: 1 – $R_{II} = 0,1$ Ом; 2 – $R_{II} = 1$ Ом; 3 – $R_{II} = 2$ Ом; 4 – $R_{II} = 5$ Ом
 б – от $I_{c\Sigma}$ при $R_{II} = 0,1$ Ом: 1 – $I_{c\Sigma} = 10$ А; 2 – $I_{c\Sigma} = 20$ А; 3 – $I_{c\Sigma} = 30$ А; 4 – $I_{c\Sigma} = 50$ А

Недостатком использования в качестве контролируемого параметра $i'_{\theta}(0)$ является необходимость применения пусковых органов устройств ДОМЗЗ с очень высоким быстродействием.

Более эффективное решение задачи ДОМЗЗ на КЛ под рабочим напряжением в online-режиме, обеспечивающее уменьшение влияния на замер расстояния до места повреждения таких факторов, как $I_{c\Sigma}$ и R_{II} , можно получить на основе замера переходного напряжения поврежденной фазы $u_{\phi}(t)$ и производной переходного тока $i'_{\theta}(0)$ в моменты времени, соответствующие переходу тока $i_{\theta}(t)$ через нулевые значения, а также применения методов на основе АМО. На основе указанного метода разработан способ ДОМЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ, подробно исследуемый в четвертой главе.

Глава 3 посвящена вопросам разработки математических моделей ТТНП и трансформаторов напряжения контроля изоляции (ТНКИ), используемых для подключения по цепям тока и напряжения устройств ДОМЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ, в целях исследования влияния их параметров и частотных характеристик на точность замера расстояния до места замыкания на землю по параметрам электрических величин переходного процесса.

На основе экспериментального анализа частотных характеристик электромагнитных ТНКИ, применяемых в сетях 6–10 кВ для измерения фазных напряжений и напряжения нулевой последовательности, показано, что требуемые по РД 153–34.0–15.501–00 значения амплитудной погрешности (до 2%) и угловой погрешности (до 1°) обеспечиваются в диапазоне частот до 10 кГц, а считающиеся предельно допустимыми для решения задач ОМП погрешности АЧХ (до 10%) и ФЧХ (до 10^0) – в диапазоне частот до 20 кГц (рис. 3, а). Существенно лучшими частотными характеристиками при малых значениях вторичной нагрузки R_n (что характерно для современных микропроцессорных устройств РЗА) обладают электромагнитные ТТНП – достаточная точность преобразования может быть обеспечена в диапазоне частот до 30 и более кГц (рис. 3, б).

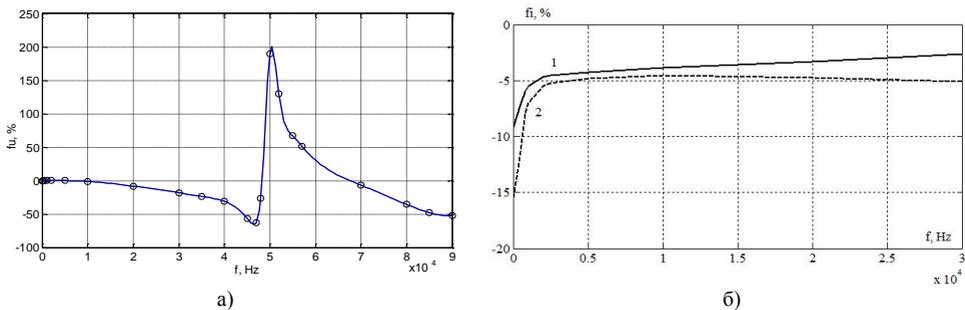


Рис.3. АЧХ трансформатора напряжения типа НТМИ-6-66 в режиме холостого хода (а) и ТТНП типа ТЗЛМ при $R_n = 1$ Ом (б): 1 – $I_{ТТНП} = 50$ А; 2 – $I_{ТТНП} = 10$ А

Таким образом, с учетом особенностей АЧХ и ФЧХ электромагнитных ТНКИ рабочий диапазон частот устройств ДОМЗЗ для кабельных сетей 6–10 кВ должен быть ограничен "сверху" частотой до ~ 20 кГц. На основе анализа спектра частот разрядной и зарядной составляющих токов переходного процесса при ОЗЗ, выполненного с использованием имитационных моделей распределительных кабельных сетей 6–10 кВ, показано, что уже при удаленности в несколько десятков метров (порядка 50–100 м и более), в переходном токе можно выделить доминирующую разрядную составляющую, частота которой, как правило, не превышает 20 кГц. Параметры данной частотной составляющей используются для определения расстояния до места ОЗЗ на основе методов ПАР. При близких к шинам ОЗЗ наличие в спектре переходного тока составляющих с частотами более 20 кГц, имеющих амплитуду, близкую к амплитуде составляющих до 20 кГц, применение во входных цепях тока и напряжения ФНЧ с частотой среза $f_{cp} \leq 20$ кГц может привести к уменьшению крутизны переднего фронта переходного тока и напряжения и обусловит дополнительную погрешность определения расстояния до места повреждения по параметрам электрических величин переходного процесса.

При разработке математической модели кабельного ТТНП была поставлена задача обеспечить ее адекватность реальному трансформатору тока не только в режимах малых, но и в режимах больших нагрузок, близких к режиму холостого хода, которые могут иметь место при включении во вторичные цепи тока ТТНП не только микропроцессорного устройства ДОМЗЗ, но и реле защиты от ОЗЗ, выполненного на другой элементной базе. В целях разработки модели ТТНП с указанными свойствами исследованы три подхода, основанные соответственно на использовании:

- Т-образной схемы замещения и основной кривой намагничивания (ОКН) магнитопровода ТТНП;
- Т-образной схемы замещения и «усредненной» средней кривой намагничивания (СКН) магнитопровода ТТНП;
- уравнения динамики перемагничивания магнитопроводов, предложенного Кадочниковым А.И.

Для построения модели ТТНП на основе первых двух подходов использовался стандартный блок Saturable Transformer системы Matlab, предназначенный для моделирования силовых трансформаторов с нелинейной характеристикой намагничивания, параметры которого определялись с использованием разработанной методики по типовым техническим данным ТТНП.

При их построении моделей ТТНП в системе Matlab использовались экспериментально полученные характеристики намагничивания магнитопроводов $B = f(H)$. Адекватность разработанных моделей оценивалась сравнением среднеквадратичных и мгновенных значений откликов модели и ее прототипа – реального ТТНП с такой же характеристикой намагничивания $B = f(H)$ при синусоидальном первичном токе рабочей частоты.

На основе экспериментальных исследований и моделирования на ЭВМ показано, что модель ТТНП на основе ОКН в режиме больших вторичных нагрузок дает приемлемые погрешности (до $\sim 10\%$) для интегральных (среднеквадратичных) значений вторичного напряжения только на линейном участке кривой намагничивания, при этом амплитудные погрешности по мгновенным значениям могут значительно превышать 10% (рис. 4, а).

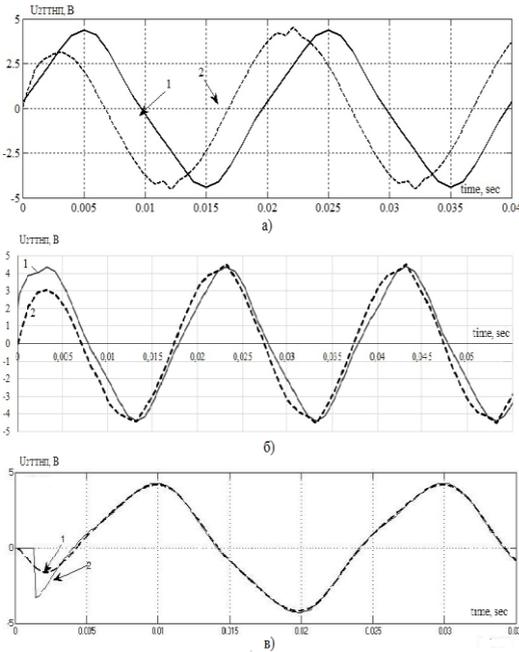


Рис. 4. Сравнение $u_{2TTP}(t)$ реального ТТП типа ТЗЛМ (кривая 1) и модели (кривая 2) в режиме больших нагрузок при синусоидальном первичном токе $I_{1TTP} = 5$ А частотой 50 Гц: а – модель на основе ОКН; б – модель на основе СКН; в – модель на основе уравнения динамики перемагничивания

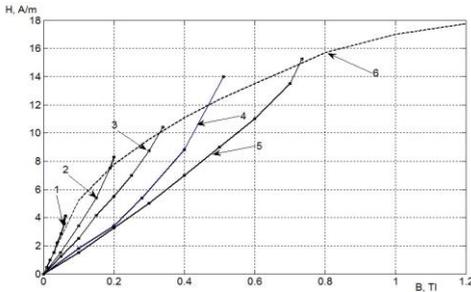


Рис. 5. Методика построения "усредненной" кривой намагничивания (кривая 6) по семейству СКН для различных значений первичного тока ТТП:
 1 – $I_{1TTP} = 1$ А; 2 – $I_{1TTP} = 2$ А; 3 – $I_{1TTP} = 3$ А;
 4 – $I_{1TTP} = 4$ А; 5 – $I_{1TTP} = 5$ А

В режимах малых нагрузок (при $Z_{\Sigma} \leq 1$ Ом для кабельных ТТП с замкнутым магнитопроводом) токовые погрешности всех рассмотренных моделей по отношению к прототипу не превышают 10% в диапазоне частот до 30 кГц (рис. 6), однако большую точность обеспечивает модель на основе уравнения (1). Адекватность данной модели реальному ТТП была проверена также в переходных режимах. Тестовые сигналы переходных токов ОЗЗ для экспериментальных испытаний реальных образцов ТТП получены на математических моделях сетей 6-10 кВ в системе Matlab и преобразованы в осциллограммы в COMTRADE-формате. Для испы-

Модель ТТП на основе «усредненной» СКН (рис. 5) обеспечивает снижение токовой и угловой погрешностей как по интегральным, так и по мгновенным значениям $u_{2TTP}(t)$ в режиме больших вторичных нагрузок до 10% и существенное уменьшение погрешностей по мгновенным значениям $u_{2TTP}(t)$ по сравнению с моделью на основе ОКН (рис. 4, б).

В основе третьего подхода лежит уравнение динамики перемагничивания:

$$\frac{dB}{dt} = r \left(1 - \frac{B^2}{B_s^2} \right) (H(t) - H_{cm}), \quad (1)$$

где H_{cm} – статическая петля гистерезиса (кривая намагничивания трансформатора), r – коэффициент магнитной вязкости, B_s – индукция насыщения.

В разработанной модели в качестве H_{cm} используется усредненная СКН, а потери на гистерезис и вихревые токи приближенно учитываются активным сопротивлением ветви намагничивания.

Модель ТТП, построенная на приведенных выше принципах, обеспечивает большую точность по сравнению с моделями на основе ОКН и СКН (рис. 4, в, рис. 6).

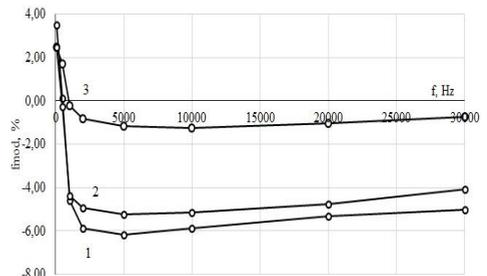


Рис. 6. Зависимость токовой погрешности моделей ТТП от частоты при малых нагрузках ($R_{\Sigma} = 1$ Ом, $I_{1TTP} = 10$ А): 1 – модель на основе ОКН; 2 – модель на основе СКН; 3 – модель на основе уравнения динамики перемагничивания

таний реальных образцов ТТНП тестовыми сигналами применялся программно-аппаратный комплекс типа РЕТОМ-61.

Сравнение экспериментально полученных вторичных токов и вторичных токов модели ТТНП в Matlab в переходных режимах (дуговых перемежающихся ОЗЗ и затухающих колебаниях первичного тока) при малых вторичных нагрузках ТТНП $Z_n = 0,1 \dots 1$ Ом в диапазоне частот до 5-10 кГц и амплитуде до ~ 400 А, показало, что модель на основе уравнения динамики перемагничивания обеспечивает погрешности преобразования мгновенных значений первичного переходного тока, не превышающие 10%.

Разработана также модель ТН типа НТМИ-6-66, обеспечивающая в диапазоне частот до 20 кГц погрешности по АЧХ не более 5% и ФЧХ не более 5°. Модели ТТНП и ТН использовались при комплексных исследованиях разработанных способов ДОМЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ.

Глава 4 посвящена разработке и исследованию способов ДОМЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ на основе переходных процессов: способ по методу ПАР, основанный на замере переходного напряжения поврежденной фазы $u_{\phi}(t)$ и производной переходного тока $i'_o(t)$ в моменты времени, соответствующие переходу тока $i_o(t)$ через нулевые значения, и способ на основе АМО. Исходя из указанных методов разработаны и подробно исследуются способы ДОМЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ.

Вычисление расстояния до места ОЗЗ по первому способу осуществляется по выражению:

$$l_3(t_{0i}) = \frac{u_{\phi}(t_{0i})}{L^{(1км)} \frac{d3i_o}{dt}(t_{0i})}, \quad (2)$$

где t_{0i} – момент перехода тока $3i_o(t)$ через нулевое значение; $u_{\phi}(t_{0i})$ – напряжение на поврежденной фазе в момент t_{0i} ; $\frac{d3i_o}{dt}(t_{0i})$ – значение производной переходного тока $i'_o(t_{0i})$ в момент t_{0i} ; $L^{(1км)} = (2L^{(1км)} + L^{(1км)})/3$ – погонная индуктивность контура тока нулевой последовательности КЛ.

Структурно-функциональная схема алгоритма, реализующего данный способ ДОМЗЗ, приведена на рис. 7, принцип действия алгоритма иллюстрируется и осциллограммами на рис. 8.

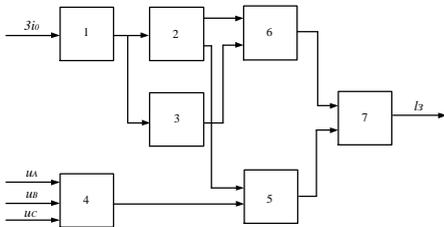


Рис. 7. Блок-схема способа по (2): 1 – пороговый элемент; 2 – блок фиксации момента перехода сигнала через нуль; 3 – дифференциатор; 4 – избиратель напряжения поврежденной фазы; 5, 6 – элементы памяти; 7 – вычислитель расстояния l_3

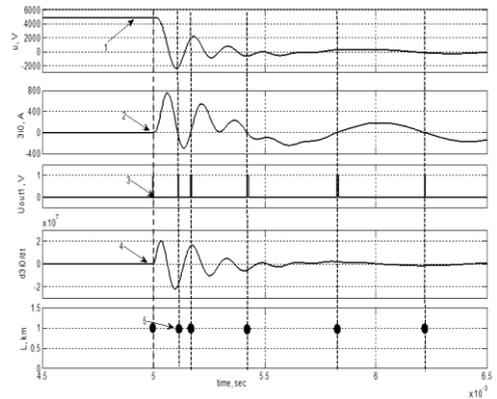


Рис. 8. Осциллограммы, иллюстрирующие работу способа: 1 – $u_{\phi}(t)$; 2 – $3i_o(t)$; 3 – моменты перехода $3i_o(t)$ через нулевое значение; 4 – $di_o(t)/dt$; 5 – расчетное нулевое значение расстояния l_3 до места ОЗЗ для момента времени t_{0i}

Структурно-функциональная схема алгоритма ДОМЗЗ по второму способу приведена на рис. 9. Предлагаемый способ определения места ОЗЗ в online-режиме в кабельных сетях 6–10 кВ с применением АМО основан на следующих основных принципах и операциях:

1) в качестве наблюдаемых величин используются фазные напряжения $u_{\phi}(t)$ и ток $3i_o(t)$;

2) в целях повышения быстродействия алгоритма и обеспечения возможности определения места повреждения в online-режиме в алгоритме используются не одна, а несколько АМО с различными значениями аварийного параметра l_3 ;

3) в качестве величин, подаваемых на входы АМО в момент времени t_0 , соответствующий моменту пробоя изоляции используются фазные напряжения;

4) в качестве реакции каждого АМО на воздействие поданных на входы наблюдаемых напряжений используется ток $\hat{z}_{i0}(t)$;

б) в online-режиме определяются значения невязки ε наблюдаемого тока $z_{i0}(t)$ и модельного тока $\hat{z}_{i0}(t)$ для каждой из АМО на заданном времени наблюдения переходного процесса при ОЗЗ;

7) по найденным значениям невязки ε и заданным для каждой АМО значениям l_3 строится аппроксимация функции невязки от расстояния до места повреждения $\varepsilon = f(l_3)$;

8) по уравнению $\varepsilon = f(l_3)$ определяется расчетное значение расстояния до места повреждения $l_{3,расч}$, соответствующее минимуму невязки ε .

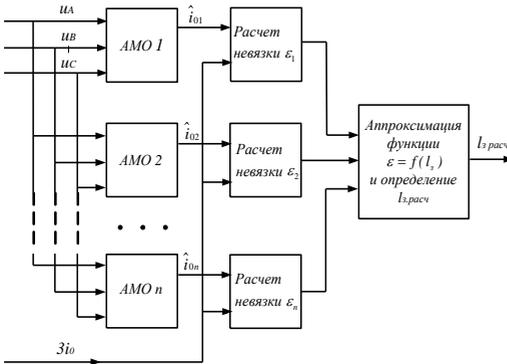


Рис. 9. Блок-схема алгоритма способа ДОМЗЗ с применением нескольких АМО с различными значениями аварийного параметра l_3

Число используемых в алгоритме моделей контролируемого объекта с различными значениями параметра l_3 определяется только требованиями к точности расчетов и, как показывают предварительные расчеты, может составлять от 3 до 5.

Выполнен анализ факторов, влияющих на точность замера расстояния до места повреждения по каждому из предложенных способов ДОМЗЗ. К основным факторам, влияющим на точность замера расстояния до места повреждения, относятся:

1. Ограничение рабочего диапазона частот устройств ДОМЗЗ.
2. Многочастотный характер разрядной составляющей переходного тока \hat{z}_{i0} .

3. Величина собственного емкостного тока $I_{c,i}$ поврежденной КЛ.
4. Величина суммарного емкостного тока сети $I_{c,\Sigma}$.
5. Переходное сопротивление электрической дуги в месте пробоя изоляции.
6. Зависимость продольных параметров КЛ от частоты переходного тока.
7. Начальная фаза пробоя изоляции φ .
8. Величина тока нагрузки поврежденной КЛ.
9. Погрешности ТТНП и ТНКИ и др.

Анализ факторов, искажающих замер l_3 , выполнен с использованием эквивалентированной имитационной модели кабельной сети 6–10 кВ в Matlab, в которой неповрежденные КЛ представлялись эквивалентной схемой замещения. Комплексный анализ влияния совокупности искажающих замер факторов выполнен также на модели участка реальной кабельной сети напряжением 6 кВ с $I_{c,\Sigma} \approx 30$ А системы электроснабжения одного из российских городов (рис. 10). Оценка точности разрабатываемых способов ДОМЗЗ для схемы сети по рис. 10 производилась на шлейфе КЛ, отходящем от РП-13 и состоящем из 5-ти участков разной длины (от 50 до 395 м) и различных сечений. Влияние погрешностей первичных преобразователей тока и напряжения учитывалось моделями ТТНП и ТНКИ, разработанными в главе 3.

Исследования на имитационных моделях показали, что для способа ДОМЗЗ на основе метода ПАР (способ 1) факторами, обуславливающими наибольшую погрешность замера l_3 , являются: величина собственного емкостного тока КЛ, ток (мощность) нагрузки (рис. 11) и напряжение на поврежденной фазе в момент пробоя (рис. 12).

Исследования на комплексной модели городской кабельной сети показали, что сочетание различных факторов увеличивает погрешность способа до 15% и более (рис. 13, а).

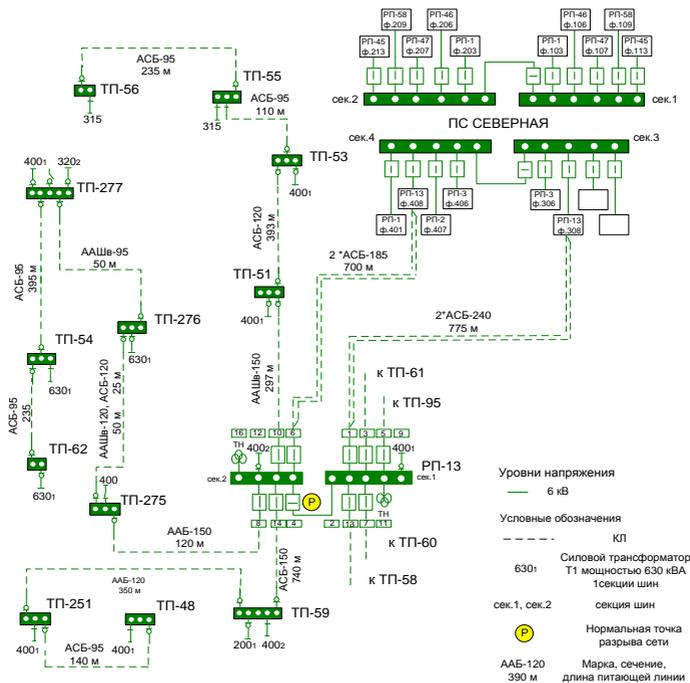


Рис. 10. Схема моделируемого участка городской кабельной сети 6 кВ

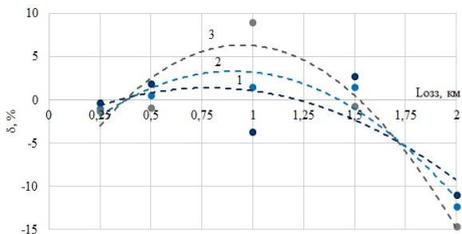


Рис. 11. Зависимости погрешности замера I_3 от нагрузки поврежденной КЛ для сети с $U_{ном} = 6$ кВ, $I_{СЭ} = 30$ А при мощности нагрузки: 1 — $S_{нагр} = 400$ кВА; 2 — $S_{нагр} = 1000$ кВА; 3 — $S_{нагр} = 1333$ кВА

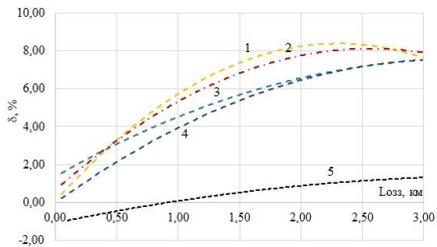
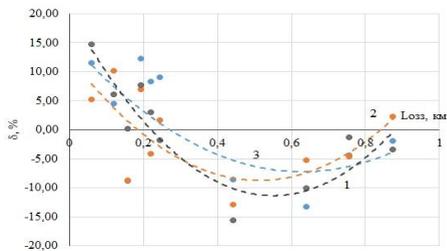
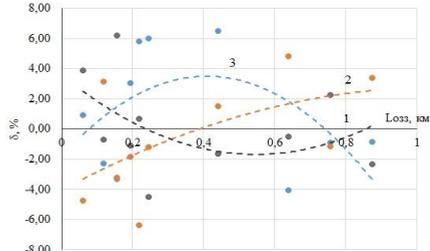


Рис. 12. Зависимости погрешностей замера I_3 от напряжения пробоя для сети с $U_{ном} = 6$ кВ, $I_{СЭ} = 30$ А: 1 — $u_{пр} = 0,5 U_{фм}$; 2 — $u_{пр} = 0,7 U_{фм}$; 3 — $u_{пр} = 0,8 U_{фм}$; 4 — $u_{пр} = 0,9 U_{фм}$; 5 — $u_{пр} = U_{фм}$



а)



б)

Рис. 13. Погрешности замера I_3 от удаленности ОЗЗ от шин для сети с $U_{ном} = 6$ кВ, $I_{СЭ} = 30$ А при $S_{нагр} = 1,6$ МВА, $u_{пр} = 0,7 U_{фм}$ без компенсации (а) и с применением компенсации суммарной погрешности (б) по (3) и (4) при различных параметрах электрической дуги в месте повреждения: 1 — $u_d = 0$; 2 — $u_d = 50$ В; 3 — $u_d = 100$ В (во всех экспериментах $r_d = 0,01$ Ом)

Все факторы, влияющие на точность замера по данному способу ДОМЗЗ на основе метода ПАР, можно разделить на 2 группы:

1. Факторы, параметры которых заранее известны или могут контролироваться в online-режиме (собственный емкостный ток КЛ, ток нагрузки, начальная фаза пробоя);
2. Факторы, контроль параметров которых невозможен (например, параметры дуги в месте повреждения).

Предложена методика компенсации влияния факторов, относящихся к первой группе, в предположении, что все факторы в первом приближении не зависят друг от друга и обусловленную их влиянием суммарную погрешность можно рассматривать как аддитивную:

$$\delta_{\Sigma}(I_3) \approx \delta_{I_c}(I_3) + \delta_{I_{нагр}}(I_3) + \delta_{U_{нр}}(I_3), \quad (3)$$

где $\delta_{I_c}(I_3)$ – погрешность замера, обусловленная влиянием собственного емкостного тока поврежденной КЛ; $\delta_{I_{нагр}}(I_3)$ – погрешность, обусловленная влиянием тока (мощности) нагрузки КЛ в момент возникновения ОЗЗ; $\delta_{U_{нр}}(I_3)$ – погрешность, обусловленная влиянием величины напряжения на поврежденной фазе в момент пробоя изоляции.

С учетом полученного по (3) значения суммарной погрешности производится корректировка расчетного значения $I_{3,расч}$ по выражению

$$I_{3,кор} = I_{3,расч} [1 - \delta_{\Sigma}(I_{3,расч})], \quad (4)$$

где $I_{3,расч}$ – расчетное расстояние до места ОЗЗ, определенное по (2).

Применение данной методики компенсации погрешности замера I_3 до места повреждения включает выполнение ряда дополнительных расчетных процедур и операций, а именно:

- 1) расчет собственных емкостных токов КЛ сети $I_{c,собс*};$
- 2) разработку имитационной модели контролируемой сети;
- 3) расчеты с использованием имитационной модели сети зависимостей $\delta_{I_{нагр}}(I_{нагр}, I_{зи})$ и $\delta_{U_{нр}}(u_{нр}, I_{зи})$ для дискретных значений $I_{зи} = \text{const}$ с шагом по I_3 , позволяющим с использованием простых методов аппроксимации полученных зависимостей получить значения $\delta_{I_{нагр}}(I_{нагр}, I_{зи})$ и $\delta_{U_{нр}}(u_{нр}, I_{зи})$ для значения $I_3 = I_{3,расч};$
- 4) расчет погрешности $\delta_{I_c}(I_3)$ по значению $I_3 = I_{3,расч}$ и известному для данного присоединения значению $I_{c,собс*};$
- 5) расчет погрешностей $\delta_{I_{нагр}} = \delta_{I_{нагр}}(I_{нагр}, I_{3,расч})$ и $\delta_{U_{нр}} = \delta_{U_{нр}}(u_{нр}, I_{зи})$ для вычисленного по (2) значения $I_3 = I_{3,расч}$ и замеренных в момент возникновения ОЗЗ значения тока нагрузки $I_{нагр}$ и напряжения на поврежденной фазе $u_{нр} = u_{ф}(t_{01})$ с использованием полученных семейств характеристики $\delta_{I_{нагр}}(I_{нагр}, I_{зи})$ и $\delta_{U_{нр}}(u_{нр}, I_{зи});$
- 6) расчет суммарной погрешности по (3);
- 7) корректировка расчетного значения $I_{3,расч}$ по (4).

Как показали расчеты на имитационных моделях кабельных сетей, компенсация влияния суммарной погрешности замера с применением рассмотренной методики позволяет уменьшить погрешность замера I_3 приближенно до 7–8% (рис. 13, б). Однако применение данной методики, во-первых, усложняет алгоритм ДОМЗЗ, во-вторых, требует большого количества предварительных вычислительных экспериментов на модели сети. Можно предположить, что аналогичные проблемы могут возникать и при использовании других методов ДОМЗЗ, основанных на использовании параметров электрических величин переходного процесса.

Исследования на имитационных моделях способа ДОМЗЗ, основанного на использовании АМО (способ 2, рис. 9) показали, что главным фактором, обуславливающим наибольшую погрешность замера I_3 , является ток (мощность) нагрузки. Существенное влияние на точность определения расстояния до места ОЗЗ является также переходное сопротивление электрической дуги в месте повреждения. В отличие от способа ДОМЗЗ, основанного на методе ПАР, влияние указанных факторов может быть учтено в модели контролируемой КЛ. Например, простой для реализации в алгоритме ДОМЗЗ способ компенсации по средним значениям ука-

занных влияющих факторов позволяет уменьшить погрешности определения расстояния до места повреждения с использованием метода АМО до 5–10 % (рис. 14).

Преимуществом способа 2 является большая простота его реализации по сравнению со способом 1, отсутствие необходимости разработки модели всей контролируемой сети и предварительных расчетов параметров для компенсации погрешностей, большая устойчивость к влиянию искажающих замер факторов, в частности, таких как собственный емкостный ток КЛ, напряжение в момент пробоя, изменение суммарного емкостного тока сети.

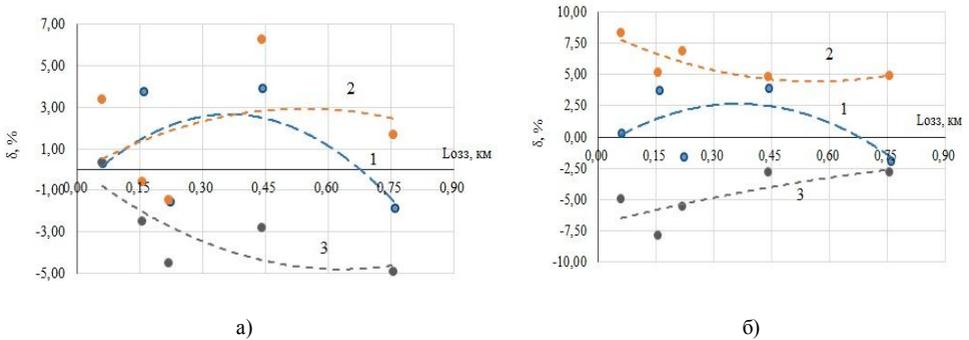


Рис. 14. Зависимости погрешности определения l_s с использованием способа ДОМ33 по методу АМО в сети с $U_{ном} = 6 \text{ кВ}$, $I_{сз} = 30 \text{ А}$ при компенсации погрешностей, обусловленных влиянием тока нагрузки и падающего напряжения на электрической дуге в месте ОЗЗ, по средним значениям факторов ($S_{нагр. мод} = 1,0 \text{ МВА}$, $u_{д.мог} = 75 \text{ В}$): а – при различных значениях $S_{нагр}$ и $u_{д} = 75 \text{ В}$ (1 – $S_{нагр} = 1,0 \text{ МВА}$; 2 – $S_{нагр} = 2,0 \text{ МВА}$; 3 – $S_{нагр} = 0$); б – при различных значениях $u_{д}$ и $S_{нагр} = 1,0 \text{ МВА}$ (1 – $u_{д} = 75 \text{ В}$; 2 – $u_{д} = 100 \text{ В}$; 3 – $u_{д} = 50 \text{ В}$)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основе анализа особенностей определения места повреждения при замыканиях на землю на кабельных линиях 6–10 кВ, находящихся под рабочим напряжением, сформулированы задачи ДОМ33 в кабельных сетях, их место в мероприятиях по диагностированию повреждений в кабелях и основные требования к устройствам автоматики данного назначения. Обоснованы подходы к решению задачи локализации зоны ОЗЗ на КЛ под рабочим напряжением в кабельных сетях систем промышленного и городского электроснабжения и определена область эффективного применения устройств ДОМ33.

2. Показано, что наиболее перспективными для решения задачи ДОМ33 в кабельных сетях 6–10 кВ являются методы, основанные на контроле параметров электрических величин переходного процесса при ОЗЗ, а также методы, использующие сравнение наблюдаемых электрических величин переходного процесса и электрических величин, полученных с использованием имитационной алгоритмической модели контролируемого объекта.

3. На основе исследований переходных процессов при ОЗЗ, выполненных с применением аналитической и имитационной моделей, выявлены информационные параметры переходных токов и напряжений, обладающие наибольшей устойчивостью к влиянию искажающих замер факторов, таких, как суммарный емкостный ток сети, переходное сопротивление в месте повреждения, напряжение на поврежденной фазе в момент пробоя изоляции.

4. На основе экспериментальных исследований частотных характеристик первичных преобразователей тока и напряжения нулевой последовательности, а также анализа спектров переходных токов при ОЗЗ показано, что верхняя частота рабочего диапазона частот устройств ДОМ33 в кабельных сетях 6–10 кВ не может быть выше 20 кГц.

5. Разработаны математические модели кабельного трансформатора тока и трансформатора напряжения нулевой последовательности 6–10 кВ для комплексных исследований на имитационных моделях эффективности методов ДОМ33, основанных на использовании электрических величин переходного процесса. Показано, что модель ТНП на основе уравнения

динамики перемагничивания сердечника трансформатора тока обеспечивает наиболее высокую точность расчета мгновенных значений вторичного тока при различных значениях нагрузки.

6. Предложен способ ДОМЗЗ, основанный на замере переходного напряжения поврежденной фазы и производной переходного тока в моменты времени, соответствующие переходу последнего через ноль, обеспечивающий повышение устойчивости замера к влиянию возможных в реальных условиях условий эксплуатации изменений суммарного емкостного тока сети и величины переходного сопротивления в месте повреждения.

7. Предложен способ ДОМЗЗ, основанный на использовании нескольких алгоритмических моделей контролируемой ЛЭП с различными значениями аварийных параметров, обеспечивающий возможность замера расстояния до места повреждения в online-режиме, т.е. без предварительной регистрации наблюдаемых величин и последующих расчетов с применением специальных расчетных программ.

8. На основе анализа влияния искажающих замер факторов и комплексных исследований на имитационной модели, имитирующей участок реальной городской кабельной сети напряжением 6 кВ, показано, что суммарное их влияние при выполнении ДОМЗЗ на основе способа по п. 6 может обусловить погрешности замера до 20% и более.

9. Предложена методика компенсации суммарной погрешности, обусловленной влиянием факторов, параметры которых известны или могут контролироваться в online-режиме, позволяющая уменьшить суммарную погрешность способа ДОМЗЗ на основе метода ПАР до ~10%. Применение компенсации приводит к существенному усложнению алгоритма и необходимости сложных предварительных расчетов зависимостей погрешностей, обусловленных влиянием контролируемых факторов, на модели сети.

10. На основе анализа на имитационных моделях кабельных сетей показано, что способ ДОМЗЗ по п. 7 с использованием алгоритмических моделей контролируемой ЛЭП обеспечивает более высокую устойчивость замера в условиях влияния различных искажающих факторов и имеет более простой алгоритм по сравнению со способом, основанным на контроле параметров электрических величин переходного процесса. При использовании простых методов компенсации по средним значениям влияющих факторов, реализуемых в АМО контролируемой КЛ, суммарная погрешность определения расстояния до места повреждения по данному способу может быть уменьшена до ~10%.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

По перечню рецензируемых изданий ВАК

1. Лебедев В.Д. Моделирование кабельных трансформаторов тока для защиты от однофазных замыканий на землю в сетях 6 – 10 кВ / В.Д. Лебедев, Г.А. Филатова, В.А. Шуин // Вестник ИГЭУ. – 2014. – Вып. 1 – С 25-32.

2. Воробьева Е.А. Методика определения индуктивностей трехфазных силовых кабелей при расчетах переходных процессов в электрических сетях 6–10 кВ / Е.А. Воробьева, А.В. Куванов, В.К. Слышалов, Г.А. Филатова, В.А. Шуин // Вестник ИГЭУ. – 2015. – Вып. 6. – С 17-22.

3. Воробьева Е.А. Информационные параметры электрических величин переходного процесса для определения места замыкания на землю в распределительных кабельных сетях напряжением 6-10 кВ / Е.А. Воробьева, Д.И. Ганджаев, Г.А. Филатова, В.А. Шуин // Вестник ИГЭУ. – 2017. – Вып. 2. – С. 34–42.

По перечню изданий, индексируемых в базе данных SCOPUS

4. **Filatova G.A.** Study and Modeling of Zero Sequence Current Sensors in the Transient Modes in Matlab / **G.A. Filatova**, V.D. Lebedev, V.A. Shuin // Proceedings of Tenth International Vacuum Electron Sources Conference (IVESC). – 2014. – P. 1-2.

5. **Filatova G.** Modeling of measuring current and voltage transformers in dynamic modes / **G. Filatova**, V. Lebedev, V. Shuin, A. Yablokov // Proceedings of International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS). – 2014. – P. 1-7.

6. **Filatova G.** Study of Possibility of Digital Voltage Transformers Usage in Fault Location Determination / **G. Filatova**, V. Lebedev, V. Shuin // Proceedings of 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). – 2016. – P. 1-4.

Публикации в других изданиях

7. Лебедев В.Д. Определение параметров и характеристик трансформаторов тока нулевой последовательности с использованием NI технологий / В.Д. Лебедев, **Г.А. Филатова** // Образовательные, научные и инженерные приложения в среде LabVIEW и технологии National Instruments: Сборник трудов IX Научно-практической конференции. – М.: РУДН. – 2010 – С. 418-419.

8. Лебедев В.Д. Математическое моделирование трансформатора тока в программе MATLAB на основе экспериментальных данных / В.Д. Лебедев, **Г.А. Филатова** // Проектирование инженерных и научных приложений в среде MATLAB: материалы V Международной научной конференции / сост. В.В. Замаруев. – Харьков: ФЛП Шейнина Е.В. – 2011. – С. 652-658.

9. Лебедев В.Д. Исследование процессов перемagnичивания сердечников трансформаторов тока / В.Д. Лебедев, **Г.А. Филатова** // ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА: Материалы региональной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Энергия-2011». – Иваново: ИГЭУ. – 2011. – Т. 3. – С 74-78.

10. Лебедев В.Д. Разработка математической модели кабельного трансформатора тока нулевой последовательности на основе экспериментальных данных / В.Д. Лебедев, **Г.А. Филатова** // РАДИОТЕХНИКА, ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭНЕРГЕТИКА: XVIII Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов: Тез. докл. В 4 т. – М: Издательский дом МЭИ. – 2012. – Т. 4. – С. 392.

11. Лебедев В.Д. О подходах к моделированию трансформаторов тока нулевой последовательности / В.Д. Лебедев, **Г.А. Филатова**, В.А. Шуин // ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА: Материалы региональной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Энергия-2012» – Иваново: ИГЭУ. – 2012. – Т.3. – С. 86-92.

12. **Филатова Г.А.** Разработка модели кабельного трансформатора тока нулевой последовательности / **Г.А. Филатова** // Электроэнергетика глазами молодежи: научные труды III международной научно-технической конференции: сборник статей. В 2 т. – Екатеринбург: УрФУ. – 2012. – Т. 2. – С. 289-294.

13. **Филатова Г.А.** Модель для исследования трансформаторов тока нулевой последовательности в установившихся и переходных режимах / **Г.А. Филатова**, В.А. Шуин // РАДИОТЕХНИКА, ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭНЕРГЕТИКА: XIX Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов: Тез. докл. В 4 т. – М.: Издательский дом МЭИ. – 2013. – Т. 4. – С. 284.

14. Лебедев В.Д. Сравнительный анализ способов выполнения измерительных преобразователей тока нулевой последовательности / В.Д. Лебедев, **Г.А. Филатова** // ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА: Восьмая международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2013»: материалы конференции. В 7 т. – Иваново: ИГЭУ. – 2013. – Т. 3. Ч. 1 – С. 134-139.

15. Лебедев В.Д. Измерительные преобразователи тока для цифровых устройств релейной защиты и автоматики / В.Д. Лебедев, А.Е. Нестерихин, **Г.А. Филатова** // IV международная научно-техническая конференция "Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем": электронный ресурс. – 2013.

16. Лебедев В.Д. Математическая модель кабельного трансформатора тока нулевой последовательности / В.Д. Лебедев, **Г.А. Филатова**, В.А. Шуин // IV международная научно-техническая конференция "Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем": электронный ресурс. – 2013.

17. **Филатова Г.А.** Применение уравнения динамики перемagnичивания для моделирования трансформаторов тока нулевой последовательности / **Г.А. Филатова** // Материалы международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электротехнологии» (XVII Бенардосовские чтения). – Иваново: ИГЭУ. – 2013. – Т. 1. – С. 140-143.

18. **Филатова Г.А.** Исследование работы кабельных трансформаторов тока в переходных режимах замыкания на землю в сетях 6-35 кВ / **Г.А. Филатова** // Электроэнергетика глазами молодежи: Научные труды IV международной научно-технической конференции. В 2 т. – Новочеркасск: ЮРГТУ (НПИ). – 2013. – Т. 2. – С. 196-199.

19. **Филатова Г.А.** Исследование работы кабельных трансформаторов тока в переходных режимах замыкания на землю в сетях 6-10 кВ / **Г.А. Филатова**, В.А. Шуин // РАДИОТЕХНИКА, ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭНЕРГЕТИКА: XX Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов: Тез. докл. В 4 т. – М: Издательский дом МЭИ. – 2014. – Т. 4. – С. 313.

20. **Филатова Г.А.** О способах дистанционного определения места повреждения при однофазных замыканиях на землю в кабельных сетях 6-10 кВ, основанных на использовании переходного процесса / **Г.А. Филатова**, В.А. Шуин // ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА: Девятая международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2014»: материалы конференции. В 7 т. – Иваново: ИГЭУ. – 2014. – Т. 3. Ч. 1 – С. 190-196.

21. **Филатова Г.А.** Модели кабельных трансформаторов тока для исследования защит от однофазных замыканий на землю в сетях 6–10 кВ в широком диапазоне частот / **Г.А. Филатова**, В.А. Шуин //

Сборник материалов докладов Национального конгресса по энергетике: в 5 т. – Казань: КГЭУ — 2014. – Т. 4. – С. 68-77.

22. **Филатова Г.А.** Оценка методов определения места однофазного замыкания на землю в кабельных сетях 6–10 кВ на основе электрических величин переходного процесса / **Г.А. Филатова**, В.А. Шуин // Вестник Российского национального комитета СИГРЭ. – Иваново: ИГЭУ. – 2014. – № 4. – Т. 1. – С. 278-285.

23. **Филатова Г.А.** Модели кабельных трансформаторов тока на основе частотных характеристик / **Г.А. Филатова**, В.А. Шуин // Вестник Российского национального комитета СИГРЭ. – Иваново: ИГЭУ. – 2014. – № 4 – Т. 1. – С. 285-292.

24. Воробьева Е.А. Определение частотных характеристик индуктивностей трехжильных кабелей 6-10 кВ / Е.А. Воробьева, **Г.А. Филатова** // Электроэнергетика глазами молодежи: Науч. тр. V Международной молодежной научно-технической конференции. – Томск. – 2014. – Т.1. – С. 558-563.

25. Воробьева Е.А. Использование электрических величин переходного процесса для определения зоны однофазного замыкания на землю в кабельных сетях 6-10 кВ / Е.А. Воробьева, **Г.А. Филатова** // Электроэнергетика глазами молодежи: Науч. тр. V Международной молодежной научно-технической конференции. – Томск. – 2014. – Т.1. – С. 569-574.

26. **Filatova G.** Modeling of magnetization reversal processes in magnetic circuits of measuring transformers / **G. Filatova**, V. Lebedev, A. Makarov, A. Yablokov // Tagungsband zum Power and Energy Student Summit 2015. – Dortmund. – 2015. – S05.3.

27. **Filatova G.** Information Parameters of Electrical Quantities of the Transient for Determining the Single-Phase Earth Fault Location in Cable Medium-Voltage Systems / **G. Filatova**, V. Shuin // Tagungsband zum Power and Energy Student Summit 2015. – Dortmund. – 2015. – P01.3.

28. **Филатова Г.А.** Определение места замыкания на землю в кабельных сетях 6-10 кВ по параметрам переходного процесса / **Г.А. Филатова**, В.А. Шуин // РАДИОТЕХНИКА, ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭНЕРГЕТИКА: XXI Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов: Тез. докл. В 4 т. – М: Издательский дом МЭИ. – 2015. – Т.4. – С. 299.

29. **Филатова Г.А.** Влияние частотных характеристик трансформаторов напряжения трансформаторов тока и напряжения нулевой последовательности на точность замера электрических величин переходного процесса для решения задачи определения места однофазного замыкания на землю / **Г.А. Филатова**, В.А. Шуин // ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА: Десятая международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2015»: материалы конференции. В 7 т. – Иваново: ИГЭУ. – 2015. – Т.3. – С. 108-110.

30. **Филатова Г.А.** Определение места замыкания на землю в кабельных сетях 6-10 кВ по параметрам переходного процесса / **Г.А. Филатова**, В.А. Шуин // Материалы докладов X Международной молодежной научной конференции «Тинчуринские чтения». – Казань: КГЭУ. – 2015. – Т. 1. – С. 21-22.

31. **Филатова Г.А.** Частотные характеристики и модель трансформатора напряжения в аспекте задачи определения места замыкания на землю в кабельных сетях 6-10 кВ / **Г.А. Филатова**, В.А. Шуин // Материалы международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии» (XVIII Бенардосовские чтения). – Иваново: ИГЭУ. – 2015. – Т. 3. – С. 438-441.

32. **Филатова Г.А.** Дистанционное определение места однофазного замыкания на землю в кабельных распределительных сетях 6-10 кВ по параметрам переходного процесса / В.А. Шуин, **Г.А. Филатова** // Электроэнергетика глазами молодежи: труды VI международной научно-технической конференции. В 2 т. – Иваново: ИГЭУ. – 2015. – Т.2. – С. 193-198.

33. Винокурова Т.Ю. Комплексный подход к решению проблемы селективной защиты распределительных кабельных сетей среднего напряжения от однофазных замыканий на землю / Т.Ю. Винокурова, О.А. Добрягина, С.Н. Пашковский, **Г.А. Филатова**, Е.С. Шагурина, В.А. Шуин // Релейщик. – 2015. – № 2. – С.23-29.

Филатова Галина Андреевна

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБОВ И АЛГОРИТМОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ
МЕСТА ОДНОФАЗНОГО ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ В КАБЕЛЬНЫХ СЕТЯХ 6-10 кВ
ПО ПАРАМЕТРАМ ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Подписано в печать 06.07.2017 г. Формат 60x84 1/16.

Печать плоская. Усл. печ. л. 1,16. Тираж 100 экз. Заказ №

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34. Отпечатано в УИУНЛ ИГЭУ.