

На правах рукописи



ШАДРИКОВА Татьяна Юрьевна

**РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСНОЙ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОЙ
ЗАЩИТЫ ОТ ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ
КАБЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ 6–10 кВ**

Специальность: 05.14.02 – Электрические станции
и электроэнергетические системы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Иваново 2016

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, ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет имени Р.Е. Алексеева», профессор кафедры «Электроэнергетика, электроснабжение и силовая электроника»

Наволочный Александр Альбертович, кандидат технических наук, ОАО «Всероссийский научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт релестроения с опытным производством», руководитель Центра моделирования электроэнергетических систем

Ведущая организация:

ОАО «Энергетический институт имени Г.М. Кржижановского» (ОАО «ЭНИН»), г. Москва

Защита состоится 13 мая 2016 г. в 11⁰⁰ на заседании диссертационного совета Д 212.064.01 при Ивановском государственном энергетическом университете 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 им. В.И. Ленина.

Текст диссертации размещен http://ispu.ru/files/Dissertaciya_Shadrikova_T.Yu_.pdf.

Автореферат диссертации размещен на сайте ИГЭУ <http://ispu.ru/>.

Автореферат разослан _____ 2016 г.

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



Бушуев Евгений Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В системах городского и промышленного электроснабжения основная часть электрической энергии распределяется потребителям через кабельные сети напряжением 6–10 кВ. В таких сетях преобладающим видом повреждений (75–90% от общего числа повреждений), и часто первопричиной аварий, являются однофазные замыкания на землю (ОЗЗ). Наиболее опасной разновидностью ОЗЗ являются дуговые перемежающиеся замыкания (ДПОЗЗ), сопровождающиеся перенапряжениями на неповрежденных фазах во всей электрически связанной сети. До 80–90% всех ОЗЗ в кабельных сетях в начальной стадии развития повреждения изоляции имеют дуговой прерывистый характер, а сопровождающие их переходные процессы оказывают значительное влияние на селективность и устойчивость функционирования (техническое совершенство) устройств защиты от данного вида повреждений. В то же время от эффективности функционирования устройств защиты от ОЗЗ зависит быстрота определения места повреждения и его ликвидации, а, следовательно, и показатели надежности электроснабжения потребителей.

В развитие и совершенствование принципов выполнения устройств защиты от ОЗЗ кабельных сетей 6–10 кВ значительный вклад внесли известные ученые и специалисты СССР и России: Сирота И.М. (ИЭД АН УССР), Кискачи В.М. (ВНИИЭ), Попов И.Н., Лачугин В.Ф. (ЭНИН), Шуляк В.Г. (ЮРГТУ-НПИ), Вайнштейн Р.А. (НИУ ТПУ), Дударев Л.Е. (ДПИ), Шуин В.А. (ИГЭУ) и др. Анализ опыта эксплуатации защит от ОЗЗ, выполненный в 2000 г. ОРГРЭС, выявил не всегда достаточное техническое совершенство устройств защиты от ОЗЗ.

Однако проблема заключается не только в недостаточной селективности и чувствительности защит от ОЗЗ. При ДПОЗЗ защитить сеть от опасных перенапряжений, а поврежденный элемент, прежде всего, электродвигатели, от значительных повреждений током дуги можно только отключением поврежденного присоединения. Поэтому эффективность функционирования защиты от ОЗЗ, как средства повышения надежности работы кабельных сетей 6–10 кВ и электроснабжения потребителей, определяется не только ее селективностью и чувствительностью, но и способностью распознавать опасные и неопасные для сети и поврежденного элемента разновидности ОЗЗ и автоматически выбирать наиболее эффективный способ действия (сигнал или отключение).

Применяемые в настоящее время исполнения устройств защиты от ОЗЗ такими свойствами не обладают. Для кабельных сетей 6–10 кВ, работающие с различными режимами заземления нейтрали, создать защиту от ОЗЗ, обладающую указанными свойствами, можно только на основе *многофункционального* подхода – совместного применения цифровых функций защиты от данного вида повреждений, основанных на использовании как составляющих установившегося режима, так и переходного процесса замыкания на землю. *Комплексность* предлагаемой многофункциональной защиты от ОЗЗ предполагает взаимодействие отдельных функций защиты на уровне измерительной (например, использование измерительной части одной функции защиты для функционирования другой) и логической (например, блокировка одной из функций защиты при срабатывании другой) частей, а также блока распознавания опасных разновидностей ОЗЗ, и автоматический выбор наиболее эффективного для сети и поврежденного элемента способа действия защиты (сигнал или отключение).

Комплексное решение рассматриваемой проблемы в общем случае должно включать также функцию определения места (зоны) ОЗЗ. Решение данной задачи в работе не рассматривается и должно составить предмет дальнейших исследований.

Отметим также, что комплексный многофункциональный подход к повышению эффективности функционирования защит от ОЗЗ предполагает необходимость расширения существующего понятия селективности защиты от ОЗЗ (Федосеев А.М.).

Целью настоящей работы являются разработка цифровой комплексной многофункциональной защиты от ОЗЗ кабельных сетей 6–10 кВ промышленного и городского электроснабжения с различными режимами заземления нейтрали, обладающей способностью

распознавать разновидности ОЗЗ и обеспечивать на этой основе возможность автоматического выбора наиболее эффективного способа действия (сигнал или отключение).

Основные задачи исследования. Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие основные задачи:

1. Анализ существующих принципов выполнения и исполнений защиты от ОЗЗ кабельных сетей 6–10 кВ с различными режимами заземления нейтрали, условий их применимости и области возможного применения.

2. Разработка требований, обоснование состава функций и структуры цифровой комплексной многофункциональной защиты от ОЗЗ кабельных сетей 6–10 кВ.

3. Исследование высших гармоник (ВГ) в токе устойчивого ОЗЗ и особенностей их применения в максимальной токовой защите на основе ВГ в составе функций комплексной защиты от данного вида повреждений компенсированных кабельных сетей 6–10 кВ.

4. Исследование спектра высших гармонических составляющих в переходных токах ОЗЗ и особенностей их использования для повышения технического совершенства максимальных токовых защит от данного вида повреждений в компенсированных и некомпенсированных кабельных сетях 6–10 кВ.

5. Разработка и исследование основных функциональных узлов цифровой комплексной защиты от ОЗЗ кабельных сетей 6–10 кВ с различными режимами заземления нейтрали.

6. Разработка способов повышения технического совершенства цифровых функций максимальных токовых защит от ОЗЗ, основанных на использовании 1-й гармоники и высших гармоник токов нулевой последовательности установившегося режима ОЗЗ.

7. Разработка уточненной методики выбора уставок по первичному току срабатывания максимальных токовых защит от ОЗЗ на основе ВГ для компенсированных кабельных сетей и максимальных токовых защит от ОЗЗ на основе составляющих промышленной частоты для некомпенсированных кабельных сетей.

8. Разработка технического задания на ОКР цифровой комплексной защиты от замыканий на землю компенсированных и некомпенсированных кабельных сетей 6–10 кВ.

Основные методы научных исследований. Для решения задач в работе использовались методы теории электрических цепей, электромагнитных переходных процессов в электроэнергетических системах, математического моделирования электрических цепей, имитационное моделирование на ЭВМ с использованием программного комплекса Matlab.

Научная новизна и значимость полученных результатов, по мнению автора, заключается в следующем:

1. Структура, состав функций и принципы выполнения комплексной многофункциональной защиты от ОЗЗ кабельных сетей 6–10 кВ с различными режимами заземления нейтрали, обеспечивающие не только определение поврежденного присоединения при всех разновидностях ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ, но и их распознавание.

2. Алгоритмы распознавания разновидностей дуговых ОЗЗ в кабельных сетях с различными режимами заземления нейтрали, обеспечивающие возможность раздельного действия защиты на отключение при опасных для сети и поврежденного элемента ОЗЗ и на сигнал при замыканиях, не представляющих прямой опасности.

3. Математические имитационные и упрощенные аналитические модели компенсированных кабельных сетей 6–10 кВ для оценки минимального уровня и степени нестабильности ВГ в токах устойчивого ОЗЗ.

4. Результаты исследований на имитационных моделях ВГ в токе устойчивого ОЗЗ, позволяющие определить требования к чувствительности максимальных токовых защит на основе ВГ по первичному току и оценить область их возможного применения на различных объектах компенсированных кабельных сетей 6–10 кВ.

5. Способы обеспечения динамической устойчивости функционирования максимальных токовых защит от ОЗЗ на основе ВГ и на основе составляющих промышленной частоты при дуговых прерывистых ОЗЗ и повышения чувствительности при устойчивых замыканиях в компенсированных и некомпенсированных кабельных сетях 6–10 кВ.

6. Методики выбора уставок по первичному току срабатывания модифицированных исполнений максимальных токовых защит от ОЗЗ на основе ВГ для компенсированных кабельных сетей и максимальных токовых защит от ОЗЗ на основе составляющих промышленной частоты для некомпенсированных кабельных сетей.

Достоверность результатов определяется 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 существующих исполнений и разработанного устройства защиты от ОЗЗ.

Обоснование соответствия диссертации паспорту научной специальности 05.14.02 – «Электрические станции и электроэнергетические системы».

Соответствие диссертации формуле специальности: в соответствии с формулой специальности 05.14.02 – «Электрические станции и электроэнергетические системы»: в диссертационной работе объектом исследований являются компенсированные и некомпенсированные электрические кабельные сети напряжением 6–10 кВ, предметом исследований – переходные и установившиеся режимы при ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ, принципы выполнения и алгоритмы функционирования защит от данного вида повреждений, методы и средства повышения их технического совершенства.

Соответствие диссертации области исследования специальности: отраженные в диссертации научные положения соответствуют области исследования специальности 05.14.02 – «Электрические станции и электроэнергетические системы», а именно:

– п. 6 «Разработка методов математического и физического моделирования в электроэнергетике» паспорта специальности 05.14.02 – «Электростанции и электроэнергетические системы» (технические науки) соответствуют разработке математических имитационных и аналитических моделей компенсированных и некомпенсированных кабельных сетей 6–10 кВ для исследования высших гармонических составляющих в токах и напряжениях нулевой последовательности в установившихся и переходных режимах ОЗЗ и результаты исследований, выполненных с их применением;

– п. 9 «Разработка методов анализа и синтеза систем автоматического регулирования, противоаварийной автоматики и релейной защиты в электроэнергетике» соответствуют разработке структуры, состава функций, алгоритмов функционирования комплексной многофункциональной защиты от ОЗЗ и алгоритмов функционирования составляющих ее узлов и элементов; способов обеспечения динамической устойчивости функционирования и чувствительности максимальных токовых защит от ОЗЗ на основе ВГ в компенсированных кабельных сетях 6–10 кВ, способов повышения динамической устойчивости функционирования максимальных токовых защит нулевой последовательности на основе составляющих рабочей частоты в кабельных сетях с изолированной нейтралью, методики выбора уставок по току срабатывания максимальных токовых защит на основе ВГ.

– п. 13 «Разработка методов использования ЭВМ для решения задач в электроэнергетике» соответствуют разработке имитационных моделей кабельных сетей 6–10 кВ с различными режимами заземления нейтрали в среде моделирования Matlab для исследования установившихся и переходных режимов ОЗЗ, исследования и проверки эффективности принципов выполнения и алгоритмов функционирования разработанной комплексной защиты от замыканий на землю.

Практическая ценность результатов работы заключается в следующем:

1. Структура и принципы выполнения основных функциональных узлов комплексной многофункциональной защиты, которые могут быть использованы разработчиками для совершенствования функций защиты от ОЗЗ в микропроцессорных устройствах РЗА.

2. Имитационные модели компенсированных кабельных сетей 6–10 кВ могут быть использованы для исследования установившихся и переходных режимов ОЗЗ разработчиками устройств защиты от ОЗЗ на основе высших гармоник и переходных процессов.

3. Результаты исследований и оценки на имитационных моделях минимального уровня высших гармоник и степени нестабильности общего уровня ВГ в токе устойчивого ОЗЗ позволяют разработчикам уточнить требования к чувствительности максимальных токовых защит на основе высших гармоник по первичному току, а проектировщикам – оценить область их возможного применения на различных объектах компенсированных кабельных сетей 6–10 кВ.

4. Методика выбора уставок максимальных токовых защит на основе ВГ и максимальных токовых защит нулевой последовательности на основе составляющих рабочей частоты может быть использована проектными организациями.

Реализация результатов работы. Алгоритмы функций защиты в составе цифровой комплексной многофункциональной защиты от ОЗЗ, технические требования к характеристикам, алгоритмы и параметры настройки функциональных узлов и элементов комплексной защиты от ОЗЗ использованы при разработке технического задания на ОКР и выполнении опытных образцов комплексной многофункциональной защиты от ОЗЗ в ООО НПП «ЭКРА», один из которых установлен в опытную эксплуатацию в июле 2014 года в ячейке № 14 фидера 6 кВ ПС-8, питающей карьер Михайловского ГОК. Результаты исследований и разработки принципов выполнения направленной защиты непрерывного действия на основе переходных процессов применены ООО «ЛИСИС» при разработке функции защиты от ОЗЗ ВЛ 35 кВ цифрового комплекса РЗА подстанции «Эльгауголь». Разработанные уточнения и корректировки методик выбора уставок максимальных токовых защит нулевой последовательности от ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ используются в работе специалистами проектных организаций. Имитационные модели кабельных сетей 6–10 кВ для исследования переходных и установившихся режимов ОЗЗ используются в учебном процессе на кафедре «Автоматическое управление электроэнергетическими системами» Ивановского государственного энергетического университета имени В.И. Ленина.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Структура и принципы выполнения комплексной многофункциональной защиты от ОЗЗ и ее основных функциональных узлов и элементов для кабельных сетей 6–10 кВ с различными режимами заземления нейтрали.

2. Алгоритмы распознавания разновидностей ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ, обеспечивающие возможность действия комплексной защиты на отключение при опасных и на сигнал при неопасных для сети и поврежденного элемента замыканиях.

3. Математические имитационные и упрощенные аналитические модели компенсированных кабельных сетей 6–10 кВ и результаты исследований с их использованием минимального уровня ВГ и максимальной степени нестабильности общего уровня гармоник в токе ОЗЗ, определяющие условия применимости защит от ОЗЗ на их основе.

4. Способы повышения динамической устойчивости функционирования при дуговых ОЗЗ и повышения чувствительности при устойчивых замыканиях на землю максимальных токовых защит на основе ВГ и на основе составляющих промышленной частоты в компенсированных и некомпенсированных кабельных сетях 6–10 кВ.

5. Методики выбора уставок по первичному току срабатывания модифицированных максимальных токовых защит от ОЗЗ на основе ВГ компенсированных кабельных сетей 6–10 кВ и максимальных токовых защит нулевой последовательности от ОЗЗ на основе составляющих рабочей частоты некомпенсированных кабельных сетей 6–10 кВ.

Личный вклад автора заключается в постановке цели и конкретных задач исследования, разработке структуры и алгоритмов функционирования комплексной многофункциональной защиты от ОЗЗ кабельных сетей 6–10 кВ с различными режимами заземления нейтрали, алгоритмов распознавания разновидностей ОЗЗ, аналитических и имитационных моделей компенсированных кабельных сетей 6–10 кВ для исследования уровня ВГ в токе ОЗЗ, проведении вычислительных экспериментов на имитационных моделях, анализе и оценке полученных результатов, разработке и исследовании способов обеспечения динамической устойчивости функционирования при дуговых прерывистых ОЗЗ максимальных токовых защит от ОЗЗ на основе ВГ в компенсированных кабельных сетях 6–10 кВ и максимальных токовых защит нулевой последовательности в кабельных сетях с изолированной нейтралью, разработке методики выбора уставок по току срабатывания

модифицированных максимальных токовых защит на основе ВГ и токовых защит на основе составляющих 50 Гц, разработке технического задания на ОКР по созданию в ООО НПП «ЭКРА» опытного образца комплексной многофункциональной защиты от ОЗЗ.

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались на IV и V Международных научно-технических конференциях «Современные направления развития релейной защиты и автоматики энергосистем» (Екатеринбург, 2013 г.; Сочи, 2015 г.), на международном саммите «Power and energy student summit (PESS) 2015» (Дортмунд, Германия, 2015 г.), на Международной научно-практической конференции и выставке «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем России» (РЕЛАВЭКСПО 2013) (Чебоксары, 2013 г.), на XVII и XVIII Международных научно-технических конференциях «Состояние и перспективы развития электротехнологии» («Бенардосовские чтения») (Иваново, 2013 г., 2015 г.), на Девятнадцатой, Двадцатой и Двадцать первой международных научно-технических конференциях студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (Москва, 2013–2015 гг.), на III, IV и V и VI Международных научно-технических конференциях «Электроэнергетика глазами молодежи» (Екатеринбург, 2012 г.; Новочеркасск, 2013 г.; Томск, 2014 г., Иваново, 2015 г.), на Шестом Всероссийском форуме студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и инновации в технических университетах» (Санкт-Петербург, 2012 г.), на Всероссийской конференции «Национальный конгресс по энергетике» (Казань, 2014 г.), в III Всероссийской школе-семинаре «Коммерциализация научно-технических идей в энергетике» (Решма, 2014 г.), на VI и VII и VIII, IX и X Международных научно-технических конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия» (Иваново, 2011–2015 гг.).

Публикации. Результаты исследований опубликованы в 36 работах, в том числе 30 статьях, из них 4 – в научных журналах, входящих в перечень рекомендуемых изданий ВАК РФ, и 6 в тезисах докладов международных научно-технических конференций.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 206 наименований. Основной текст включает 184 стр., 76 илл.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, изложено состояние проблемы, сформулированы цель и задачи работы, отражена научная новизна и практическая ценность полученных результатов, дана общая характеристика работы.

В первой главе рассмотрены характеристики распределительных кабельных сетей напряжением 6–10 кВ и их объектов, определяющие требования по составу функций комплексной защиты от ОЗЗ и область применения функций защиты от ОЗЗ на различных принципах. На основе анализа данных по реальным кабельным сетям систем промышленного и городского электроснабжения определены диапазоны изменения и средние значения емкостных токов $I_{c\Sigma}$ кабельных сетей 6–10 кВ различного назначения и параметров кабельных линий (КЛ), подключенных к шинам центров питания (ЦП), распределительных и трансформаторных подстанций (РП и ТП). Приведена классификация основных принципов действия защит от ОЗЗ, получивших применение в кабельных сетях 6–10 кВ, и основных свойств устройств защиты на различных принципах.

На основе анализа библиографических источников и патентного поиска по теме исследований выполнен сравнительный анализ известных принципов выполнения и исполнений индивидуальных (на одно присоединение) устройств защиты от ОЗЗ кабельных сетей 6–10 кВ и условий их применимости. Показано, что сложности выполнения устройств защиты от ОЗЗ, обладающих высоким техническим совершенством, обусловлены рядом особенностей защищаемого объекта, основными из которых являются: различные режимы заземления нейтрали (изолированная нейтраль, резонансное заземление через дугогасящий реактор (ДГР), резистивное или комбинированное заземление через ДГР и резистор); существенные различия условий применимости защит от ОЗЗ на разных объектах кабельных сетей (ЦП, РП, ТП), определяемых соотношением между собственным емкостным током защищаемого присоединения и суммарным емкостным током сети, наличием или отсутствием трансформаторов напряжения нулевой последовательности (ТННП) и др.;

возможность возникновения в кабелях и других элементах сети дуговых неустойчивых ОЗЗ, сопровождающихся интенсивными переходными процессами, оказывающими значительное влияние на значения и соотношения электрических величин, подводимых к измерительным органам устройств защиты; ограниченные (до недавнего времени) возможности элементной базы РЗА. Сложности создания эффективных устройств защиты от ОЗЗ для кабельных сетей 6–10 кВ обусловлены также неполнотой информации (знаний разработчиков) о параметрах электрических величин переходных процессов и высших гармоник в токах ОЗЗ кабельных сетей 6–10 кВ, являющейся частью информационного обеспечения задач совершенствования существующих и разработки новых устройств защиты, что определяет актуальность дальнейших исследований в указанных направлениях.

На основе анализа показано, что в компенсированных кабельных сетях наихудшие показатели эффективности функционирования имеют получившие наиболее широкое применение максимальные токовые защиты на основе ВГ. Недостаточное техническое совершенство устройств защиты от ОЗЗ компенсированных кабельных сетей приводит к снижению эффективности данного режима заземления нейтрали и надежности электроснабжения потребителей, что определяет особую актуальность разработки способов повышения их селективности и чувствительности.

Основную опасность для сети при дуговых ОЗЗ представляют перенапряжения на неповрежденных фазах, возникающие при повторных зажиганиях заземляющей дуги. На основе анализа источников, посвященных исследованиям перенапряжений при дуговых ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ (W. Petersen, J. Peters и J. Slepian, Беляков Н.Н., Сиротинский Л.И., Лихачев Ф.А., Халилов Ф.Х., Евдокимов Г.А. и др.), а также исследований, выполненных на имитационных моделях указанных сетей, в качестве критерия опасности дуговых ОЗЗ для кабельных сетей 6–10 кВ принято расчетное значение кратности перенапряжений $K_{пер. расч} = U_{макс} / U_{ф.т} \approx 2,5$. В связи с этим предложено под ДПОЗЗ, как наиболее опасной для кабельных сетей разновидностью дуговых ОЗЗ, понимать такой вид замыкания, который сопровождается перенапряжениями, превышающими указанную величину. Возможность распознавать и отключать ДПОЗЗ позволяет значительно повысить эффективность функционирования защиты и надежность электроснабжения потребителей. Все остальные дуговые ОЗЗ в аспекте их распознавания можно разделить на два вида: дуговые прерывистые (ДПрОЗЗ), не сопровождаемые опасными перенапряжениями, однако в некоторых случаях представляющие опасность для поврежденного элемента по величине среднеквадратичного значения тока в месте повреждения, и кратковременные самоустраняющиеся ОЗЗ (КрОЗЗ), не представляющие прямой опасности ни для сети, ни для поврежденного элемента.

Учитывая, что прямой контроль величины сопровождающих дуговое ОЗЗ перенапряжений возможен только на объектах, оснащенных ТННП, и требует подключения устройства защиты на все фазные напряжения, что приводит к усложнению защиты, актуальной задачей является разработка косвенных способов распознавания опасных и неопасных для сети дуговых ОЗЗ.

Фиксацию всех разновидностей неустойчивых дуговых ОЗЗ, а также начальной стадии устойчивых ОЗЗ (УОЗЗ), начинающейся с пробоя изоляции фазы сети на землю, позволяют обеспечить только защиты на основе переходных процессов. Анализ опыта разработки и применения в кабельных сетях 6–10 кВ защит указанного типа, накопленного с 60-х годов (ОРГРЭС, ЭНИН, ИГЭУ, НПИ и др.), показал, что наиболее эффективными из них являются направленные защиты. Однако импульсные направленные защиты, к которым относится большинство известных исполнений защит данного типа, не обеспечивают возможность распознавания указанных выше разновидностей дуговых ОЗЗ. Решение задачи распознавания существенно упрощается при применении направленных защит, обладающих свойством непрерывности действия на интервале времени существования тока переходного процесса. К таким защитам относятся, в частности, устройства типа «Спектр» (ИГЭУ) и УИЗЗ (ИГЭУ, ООО НПП «АЛИМП»). Непрерывность действия при устойчивых ОЗЗ, необходимую для защит с действием на отключение, а также для защит с действием на сигнал при поиске поврежденного участка методом оперативных переключений в сети, обеспечивают только защиты, основанные на использовании различных составляющих установившегося режима ОЗЗ (составляющих 50 Гц, ВГ, «наложенных» токов).

С учетом результатов анализа предложен состав функций комплексной защиты индивидуального исполнения: для сетей, работающих с изолированной нейтралью и с высокоомным заземлением нейтрали, – направленная защита непрерывного действия на основе переходных процессов, токовая и токовая направленная защиты нулевой последовательности на основе составляющих рабочей частоты (ТЗНП и ТНЗНП); для компенсированных кабельных сетей 6–10 кВ – направленная защита непрерывного действия на основе переходных процессов и направленная защита на основе ВГ или максимальная токовая защита абсолютного замера ВГ.

Поставлены основные задачи исследований, связанные с развитием и совершенствованием информационного обеспечения задач разработки комплексной защиты от ОЗЗ, разработкой принципов выполнения основных функциональных узлов комплексной защиты, повышением технического совершенства составляющих ее функций. К ним относятся:

- 1) исследование высших гармоник в токах УОЗЗ компенсированных кабельных сетей;
- 2) исследование высших гармонических составляющих в переходных токах и напряжениях нулевой последовательности при дуговых ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ с различными режимами нейтрали;
- 3) на основе исследований по пп. 1, 2 разработка принципов выполнения и алгоритмов функционирования направленной защиты непрерывного действия на основе переходных процессов и направленной защиты на основе высших гармоник;
- 4) на основе исследований по пп. 1, 2 повышение технического совершенства максимальных токовых защит нулевой последовательности на основе составляющих рабочей частоты и ВГ, входящих в состав функций комплексной многофункциональной защиты.

В главе 2 показано, что для выявления причин недостаточной эффективности функционирования существующих исполнений токовых защит абсолютного замера ВГ, уточнения условий и области возможного их применения, а также для разработки методики выбора уставок должны быть решены две основные задачи:

- 1) оценка минимального уровня ВГ в токе ОЗЗ компенсированных кабельных сетей 6–10 кВ для определения требований к чувствительности по первичному току как токовых, так и направленных защит на основе ВГ;
- 2) оценка максимальной степени нестабильности общего уровня ВГ в токе ОЗЗ для уточнения условий применимости и области возможного применения токовых защит абсолютного замера ВГ на различных объектах компенсированных кабельных сетей 6–10 кВ.

В качестве основного метода исследования для решения поставленных задач применялось имитационное моделирование в Matlab, а для выявления основных факторов, влияющих на степень нестабильности уровня ВГ и его минимальное значение в токе ОЗЗ, – аналитические решения на основе упрощенных схем замещения кабельных сетей 6–10 кВ.

Спектр ВГ в токе ОЗЗ и, соответственно, в токах $3I_0$ неповрежденных присоединений в сетях 6–10 кВ определяется спектром ВГ напряжения на поврежденной фазе в момент, предшествующий возникновению повреждения. Основные источники ВГ в компенсированной кабельной сети 6–10 кВ показаны на рис. 1.

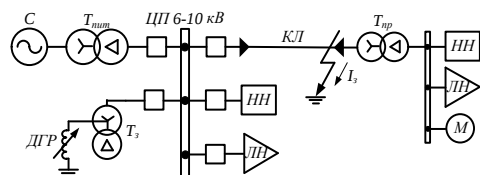


Рисунок 1 – Источники ВГ в компенсированной кабельной сети 6–10 кВ

В спектре указанных источников наиболее выражены 5, 7, 11 и 13-я гармоники, используемые в защитах от ОЗЗ на основе ВГ.

Разработаны математические имитационные модели основных источников высших гармоник компенсированной кабельной сети 6–10 кВ (рис. 1):

– силовых трансформаторов: питающих $T_{пит}$, и трансформаторов 6–10/0,4 кВ

приемных подстанций (ТП и РТП) $T_{пр}$;

- нелинейной нагрузки (НН): вентильных неуправляемых и управляемых преобразователей (ВП); электросварочных установок (ЭСУ) электродуговой и контактной сварки с преобразователями в качестве источников питания и др.; электротермических установок (ЭТУ), использующих электрическую дугу и др.;

- дугогасящих реакторов (ДГР);

- электрической дуги в месте повреждения и др.

При оценке минимального уровня ВГ в токе ОЗЗ компенсированных кабельных сетей 6–10 кВ в качестве расчетного принимается режим, в котором источниками ВГ являются только силовые трансформаторы (Кискачи В.М., Жежеленко И.В.). На основе анализа состава узла комплексной нагрузки и суточных графиков предприятий различных отраслей промышленности показано, что практически возникновение таких режимов работы возможно в сетях 6–10 кВ систем электроснабжения предприятий, работающих по сменному суточному графику работы, на которых при ночном спаде нагрузки или в выходные дни все основные технологические установки и, соответственно, основные источники ВГ (прежде всего, НН), кроме трансформаторов, могут полностью отключаться. С учетом указанного допущения модель кабельной сети для оценки минимального уровня ВГ в токе ОЗЗ должна содержать только трансформаторы с нелинейной кривой намагничивания и линейную нагрузку (рис. 2).

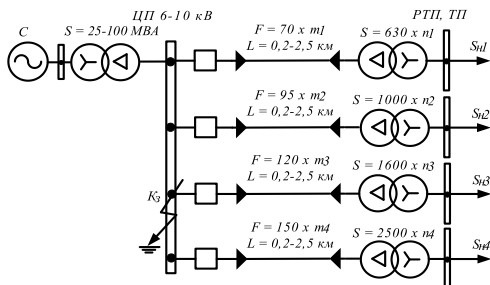


Рисунок 2 – Расчетная схема компенсированной кабельной сети 6–10 кВ для оценки минимального уровня ВГ в токе ОЗЗ

Исследования на модели по рис. 2 показали, что минимальный уровень ВГ в токе ОЗЗ компенсированных кабельных сетей 6–10 кВ в зависимости от соотношения мощности питающего трансформатора на ЦП и суммарной мощности приемных трансформаторов на ТП и РТП примерно равен $I_{ВГ\min} = \sim 1,0-1,5\%$ от суммарного емкостного тока сети $I_{c\Sigma}$. Оценки минимального уровня ВГ $I_{ВГ\min}$ в токе ОЗЗ компенсированных кабельных сетей 6–10 кВ, полученные в данной работе, достаточно точно совпадают с оценками в работах Кискачи В.М. и Жежеленко И.В., полученными на основе упрощенных схем замещения, при больших значениях суммарного емкостного тока сети $I_{c\Sigma} \geq 100$ А и существенно меньше последних при значениях $I_{c\Sigma} < 100$ А (рис. 3), что определяется более точным учетом в разработанных имитационных моделях факторов, влияющих на величину $I_{ВГ\min}$.

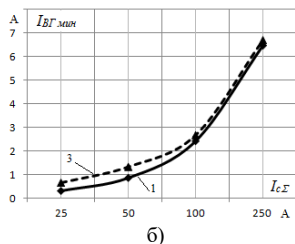
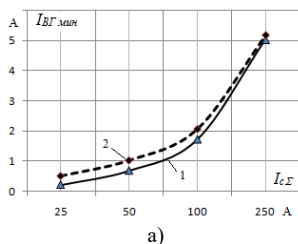


Рисунок 3 – Сравнение расчетных зависимостей $I_{ВГ\min} = f(I_{c\Sigma})$, полученных на имитационных моделях (кривая 1) и по данным в работах Кискачи В.М. (а, кривая 2) и Жежеленко И.В. (б, кривая 3)

Анализ показал, что величину $I_{ВГ\min}$ приближенно можно оценить аналитическим методом с использованием упрощенной комплексной схемы замещения, составленной с использованием метода симметричных составляющих, в которой в качестве источника ВГ учтены только трансформаторы приемных подстанций (ТП, рис. 2), а КЛ, соединяющие ТП с ЦП, представлены одной эквивалентной линией (рис. 4).

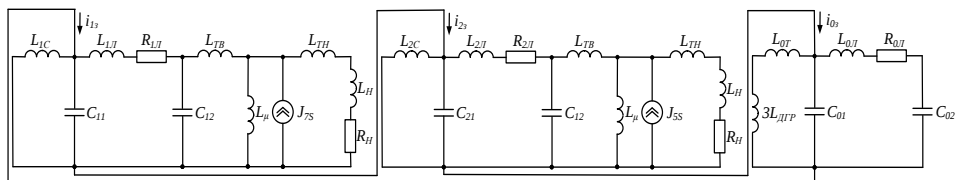


Рисунок 4 – Комплексная схема замещения для расчета минимального уровня ВГ в токе ОЗЗ

Сравнение результатов расчетов минимального уровня ВГ в сетях 6–10 кВ, выполненных на имитационных моделях в Simulink и с использованием упрощенной схемы замещения по рис. 4, показало, что погрешности аналитического решения не превышают ~10–15%.

С учетом полученных результатов при оценке требований к чувствительности токовых и токовых направленных защит на основе ВГ с некоторым запасом можно принять $I_{ВГ\min} \approx 0,01 I_{C\Sigma} (\sim 1\% I_{C\Sigma})$.

В главе 1 показано, что применение максимальных токовых защит от ОЗЗ на основе ВГ на объектах компенсированных кабельных сетей 6–10 кВ возможно при выполнении условия:

$$I_{Ci^*} = \frac{I_{Ci}}{I_{C\Sigma}} \leq \frac{1}{1 + (\alpha_{\max} / \alpha_{\min}) K_{отс} K_{ч,\min}} = \frac{1}{1 + Z K_{отс} K_{ч,\min}}, \quad (1)$$

где I_{Ci^*} – относительное значение собственного емкостного тока защищаемого i -того присоединения; $K_{отс}$ – коэффициент отстройки; $K_{ч,\min}$ – минимальный коэффициент чувствительности защиты; $\alpha_{\max}$ и $\alpha_{\min}$ – максимальный и минимальный соответственно относительные уровни ВГ в токе ОЗЗ контролируемой сети; Z – коэффициент, характеризующий нестабильность уровня ВГ в токе ОЗЗ.

В работе дана оценка максимального уровня ВГ в токе ОЗЗ, который определен по предельно допустимым ГОСТ 32144-2013 для сетей 6–10 кВ значениям коэффициента несинусоидальности напряжения $K_{Унс\max} \leq 0,08$ и предельно допустимым коэффициентам $K_{Ув\text{пред}}$ гармоник $\nu = 5, 7, 11, 13$. При рассмотренных условиях $\alpha_{\max\text{пред}} \leq 65\%$. По данным экспериментальных измерений в реальных компенсированных кабельных сетях 6–10 кВ максимальный уровень ВГ в токе ОЗЗ $\alpha_{\max\text{пред}}$ может достигать значений 35–40% и более. Учитывая практическую невозможность точного определения значения $\alpha_{\max}$ для контролируемой сети, при выборе уставок токовых защит абсолютного замера ВГ должно учитываться значение $\alpha_{\max\text{пред}}$.

Из (1) можно видеть, что условия применимости токовых защит абсолютного замера ВГ в значительной мере определяются степенью нестабильности уровня ВГ в токе ОЗЗ контролируемой сети Z . Основными факторами, определяющими степень нестабильности уровня ВГ в токах ОЗЗ кабельных сетей 6–10 кВ, являются: доля и состав НН в нагрузке ЦП, изменения общей нагрузки ЦП в течение суток (суточный график нагрузки), изменения режимов работы основных источников ВГ, колебания напряжения в сети.

Исследования на имитационных моделях показали, что степень нестабильности уровня ВГ в токе ОЗЗ Z выше в кабельных сетях 6–10 кВ систем электроснабжения предприятий со сменным режимом работы: $Z \approx 5$ –6 (например, черной металлургии, автомобилестроения, табл. 1). Еще больших значений (до 15 и более) параметр Z может достигать в кабельных сетях ЦП, в комплексной нагрузке которых основную долю (до 90% и более) составляют мощные источники ВГ, имеющие резко-переменный режим работы (электротяга, мощные электродуговые печи и т.п.). Полученные расчетные оценки параметра Z в 1,5–2 раза больше оценок степени нестабильности уровня ВГ в токе ОЗЗ, данных Кискачи В.М. в конце 60-х годов ($Z = 2$ –3).

Таблица 1 – Расчетные значения степени нестабильности уровня гармоник в токе ОЗЗ кабельных сетей 6–10 кВ предприятий различных отраслей промышленности

Отрасль промышленности	Z_{ν}				Z_{Σ}
	$\nu = 5$	$\nu = 7$	$\nu = 11$	$\nu = 13$	
Цветная металлургия	3,36	2,77	1,25	0,85	2,01
Химическая промышленность	3,38	3,05	1,91	1,24	2,44
Черная металлургия	9,22	7,57	3,98	2,98	4,99
Автомобилестроение	11,1	8,61	4,9	2,59	5,87

Результаты исследований на имитационных моделях позволяют сделать вывод, что наиболее вероятной причиной низких оценок технического совершенства токовых защит абсолютного замера ВГ является более высокая, чем обычно принимается, нестабильность уровня ВГ в токе ОЗЗ компенсированных кабельных сетей 6–10 кВ.

Для приближенных оценок параметра Z получено аналитическое решение:

$$Z = \frac{\alpha_{\max}}{\alpha_{\min}} = \sqrt{\frac{\sum_{\nu=5}^{13} \left(\nu \frac{I_{x\%}}{100} \alpha_{\nu, \max}^{(T)} + \nu \cdot \alpha_{\nu, \max}^{(BP)} K_3^{(T)} \cdot S_{\nu, \max}^{(BP)} \right)^2}{\sum_{\nu=5}^{13} \left(\nu \frac{I_{x\%}}{100} \alpha_{\nu, \min}^{(T)} + \nu \cdot \alpha_{\nu, \min}^{(BP)} K_3^{(T)} \cdot S_{\nu, \min}^{(BP)} \right)^2}}, \quad (2)$$

где $I_{x\%}$ – ток холостого хода трансформаторов приемных подстанций (ТП, РТП); $\alpha_{\nu, \max}^{(T)}$, $\alpha_{\nu, \min}^{(T)}$, $\alpha_{\nu, \max}^{(BP)}$, $\alpha_{\nu, \min}^{(BP)}$ – максимальный и минимальный относительные уровни ВГ, генерируемые соответственно силовыми трансформаторами и нелинейной нагрузкой.

Аналитические оценки параметра Z по (2) отличаются от оценок, полученных на имитационных моделях кабельных сетей, не более, чем на 15–20%, что можно считать приемлемым для приближенных оценочных расчетов.

Полученные оценки параметра Z позволяют оценить область возможного применения максимальных токовых защит абсолютного замера ВГ. Если в (1) принять $Z_{\max} = 6$, то при $K_{отс} = K_{ч, \min} = 1,5$ получим, что применение рассматриваемых защит возможно на присоединениях, относительное значение собственного емкостного тока которых не превышает значений:

$$I_{ci*} = \frac{I_{ci}}{I_{c\Sigma}} \leq \frac{1}{1 + Z_{\max} K_{отс} K_{ч, \min}} = \frac{1}{1 + 6 \cdot 1,5 \cdot 1,5} \approx 0,07.$$

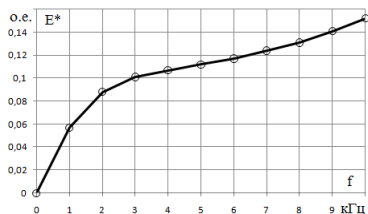
Доля таких присоединений на шинах 6–10 кВ ЦП не превышает 60–70%, что заметно ограничивает область возможного применения токовых защит абсолютного замера ВГ на таких объектах. Необходимость использования при расчетах уставок $\alpha_{\max, \text{пред}} > \alpha_{\max}$ практически означает увеличение параметра Z в (2), т.е. дополнительно ограничивает область применения токовых защит абсолютного замера ВГ. Учитывая полученные оценки, можно сделать вывод, что токовые защиты абсолютного замера ВГ неперспективны для применения на ЦП компенсированных кабельных сетей 6–10 кВ, и на объектах данного типа необходимо применять направленные защиты на ВГ. В то же время токовые защиты на основе ВГ могут иметь достаточно большую область применения на объектах типа РП и ТП кабельных сетей, для которых значение I_{ci*} , как правило, не превышает единиц процентов и на которых не всегда устанавливаются ТННП.

В главе 3 приведены результаты исследований высших гармонических составляющих в электрических величинах переходного процесса при ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ с различными режимами нейтрали. Для исследований разработаны имитационные модели компенсированных и некомпенсированных кабельных сетей 6–10 кВ промышленного и городского электроснабжения, учитывающие особенности их конфигурации и реальные параметры элементов. Исследования на разработанных моделях и аналитические расчеты на основе упрощенной схемы замещения показали, что частота разрядной составляющей тока ОЗЗ в зависимости от параметров сети и удаленности места замыкания от шин ЦП может изменяться в диапазоне от единиц до сотен килогерц, частота зарядной составляющей – от сотен герц до единиц килогерц. Обеспечить селективность и устойчивость функционирования направленных защит от ОЗЗ на основе переходных процессов в таком широком диапазоне частот нельзя, поэтому верхняя частота рабочего

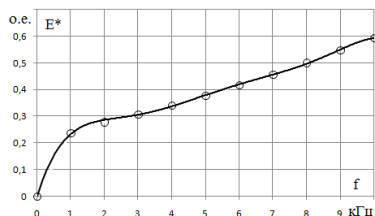
диапазона должна быть ограничена с помощью фильтров, что приводит к потере энергии сигнала переходного тока и уменьшению чувствительности защиты.

На рис. 5 в качестве примера приведены результаты оценки влияния фильтрации на относительное значение энергии броска переходного тока. Из рис. 5 можно видеть, что при близких к шинам ОЗЗ в сетях с малыми значениями $I_{C\Sigma}$ (порядка единиц ампер) в области спектра частот до 3 кГц сосредоточено ~10% энергии броска переходного тока, в сетях с $I_{C\Sigma}$ порядка десятков ампер доля энергии сигнала, сосредоточенная в указанной области частотного спектра броска переходного тока, возрастает, но остается менее 50%.

Полученные оценки отличаются от оценок распределения энергии сигнала в частотном спектре бросков переходного тока при ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ, приводимых в ряде источников, что можно объяснить более точным учетом в данной работе влияющих на частотный спектр факторов.



а)



б)

Рисунок 5 – Зависимость энергии броска переходного тока в месте ОЗЗ на выходе ФНЧ E^* от верхней частоты рабочего диапазона частот устройства защиты: а – ОЗЗ на шинах ЦП сети с $I_{C\Sigma} = 5$ А; б – ОЗЗ на шинах ЦП сети с $I_{C\Sigma} = 30$ А

Показано, что для обеспечения устойчивости функционирования направленной защиты на основе переходных процессов с измерительным органом непрерывного действия на всем интервале времени переходного процесса должны выполняться соотношения:

$$3i_{0\text{нел.}i} \approx 3C_{0i} du_0 / dt; \quad (3)$$

$$3i_{0\text{пов.}j} \approx -3(C_{0\Sigma} - C_{0j}) du_0 / dt, \quad (4)$$

где C_{0i} – емкость фазы на землю неповрежденного i -го присоединения; $C_{0\Sigma}$ – суммарная емкость фазы на землю сети; C_{0j} – емкость фазы на землю поврежденного j -го присоединения.

Аналитические расчеты и исследования на имитационных моделях показали, что для выполнения соотношений (3) и (4) рабочий диапазон частот направленных устройств защиты на основе переходных процессов для кабельных сетей 6–10 кВ должен быть ограничен «сверху» частотой $f_c \leq 2...3$ кГц.

Определены наиболее тяжелые расчетные условия для оценки чувствительности направленной защиты на основе переходных процессов. Расчеты на имитационных моделях показали, что для обеспечения $K_{\text{д.мин}} \geq 3$ минимальный первичный ток срабатывания защиты в рабочем диапазоне частот до 2–3 кГц $I_{\text{с.з.мин}}$ должен быть не более 10 А. В целях уменьшения вероятности отказов срабатывания из-за недостаточной чувствительности целесообразно принять первичный минимальный ток срабатывания $I_{\text{с.з.мин}} \leq 1\text{--}2$ А, что технически не представляет сложностей для устройств защиты на микропроцессорной базе.

Разработаны и исследованы косвенные способы оценки величины перенапряжений для распознавания опасных и неопасных для сети дуговых ОЗЗ. На основе исследований на имитационных моделях показано, что для косвенного контроля перенапряжений при дуговых ОЗЗ в кабельных сетях с изолированной нейтралью могут быть использованы 3 способа, основанные: на контроле интервалов времени между повторными зажиганиями заземляющей дуги, уровня высших гармонических составляющих в переходном напряжении $3i_0$ и общего уровня указанных составляющих в переходном токе $3i_0$ защищаемого присоединения (например, рис. 6–8).

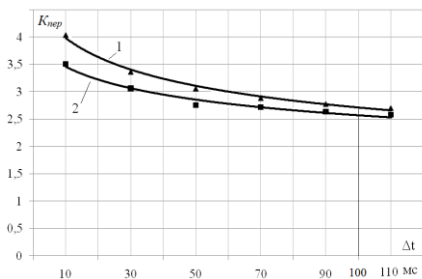


Рисунок 6 – Зависимость кратности перенапряжений $K_{пер}$ при дуговом ОЗЗ от интервалов времени между повторными зажиганиями заземляющей дуги Δt в кабельной сети 6 кВ с изолированной нейтралью: 1 – $I_{сз} = 10$ А; 2 – $I_{сз} = 30$ А

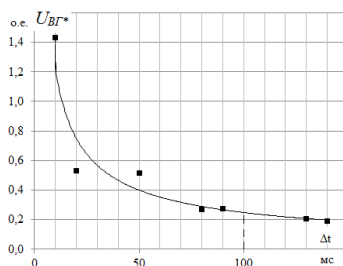


Рисунок 7 – Зависимость относительного уровня высших гармонических составляющих $U_{вг*}$ от интервалов времени между повторными пробоями изоляции Δt для кабельной сети 6 кВ с изолированной нейтралью

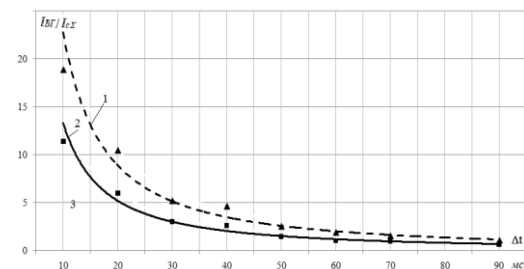


Рисунок 8 – Зависимости среднеквадратичного значения высших гармонических составляющих в токе ОЗЗ от интервалов времени между повторными пробоями изоляции для кабельной сети 6 кВ с изолированной нейтралью: 1 – $I_{сз} = 10$ А; 2 – $I_{сз} = 30$ А

значения интервалов времени между повторными пробоями изоляции $\Delta t < 100$ мс или уровень высших гармонических составляющих в напряжении, превышающий ~25–30% от $U_{ном}$, являются косвенными признаками опасного для сети дугового ОЗЗ.

Относительный уровень высших гармонических составляющих $I_{вг}/I_{сз}$ в емкостном токе ОЗЗ зависит не только от интервалов времени между повторными пробоями Δt (т.е. величины перенапряжений в сети), но и от величины суммарного емкостного тока сети (например, рис. 8). Поэтому данный способ косвенного контроля опасных для сети перенапряжений при дуговых ОЗЗ целесообразно использовать в тех случаях, когда на защищаемом объекте не предусмотрена установка ТННП (например, на ТП, РП, РТП).

Исследования на имитационных моделях показали, что в кабельных сетях с резонансным заземлением нейтрали через ДГР величина интервалов времени между повторными зажиганиями заземляющей дуги, а также уровень высших гармонических составляющих в переходных напряжении и токе нулевой последовательности не являются однозначными признаками существования в сети опасных перенапряжений, а лишь свидетельствуют о возможности возникновения таковых. Следует отметить, что, как показали исследования на имитационных моделях, в компенсированных кабельных сетях 6–10 кВ даже при возможных в эксплуатации расстройках компенсации вероятность возникновения опасных для сети перенапряжений невелика.

Функция распознавания опасных дуговых ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ в составе комплексной защиты может использоваться также для блокировки или автоматического изменения уставок функций максимальных токовых защит на основе составляющих рабочей частоты или ВГ в целях повышения динамической устойчивости их функционирования.

В главе 4 отражены результаты разработки общей структуры и основных функциональных узлов комплексной многофункциональной защиты от ОЗЗ компенсированных и некомпенсированных кабельных сетей 6–10 кВ и способы повышения селективности и чувствительности функций максимальных токовых защит от ОЗЗ, основанных на использовании 1-й гармоники и ВГ тока нулевой последовательности, в составе комплексной многофункциональной защиты.

Сформулированы основные функциональные требования к комплексной многофункциональной защите кабельных сетей 6–10 кВ:

1) селективность и устойчивость функционирования при всех допустимых режимах заземления нейтрали кабельных сетей 6–10 кВ;

2) селективность и устойчивость функционирования при всех возможных в кабельных сетях 6–10 кВ разновидностях ОЗЗ, а также их распознавание для автоматической оценки степени опасности повреждения для сети и поврежденного элемента и выбора наиболее эффективного способа действия защиты (сигнал или отключение);

3) возможность применения на всех типах объектов кабельных сетей 6–10 кВ (ЦП, РП, ТП), в том числе на РП и ТП при отсутствии ТННП;

4) независимость эффективности функционирования комплексной многофункциональной защиты от ОЗЗ в целом от факторов, влияющих на эффективность работы отдельных ее функций;

5) возможность дистанционного определения места повреждения при всех разновидностях ОЗЗ (ОМЗЗ).

Как уже отмечалось выше, в данной работе задачи ОМЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ не рассматриваются, т.к. являются предметом отдельных исследований и разработок.

Варианты структурно-функциональной схемы комплексной многофункциональной защиты от ОЗЗ для кабельных сетей 6–10 кВ с изолированной нейтралью и с высокоомным заземлением нейтрали приведена на рис. 9, для компенсированных сетей – на рис. 10.

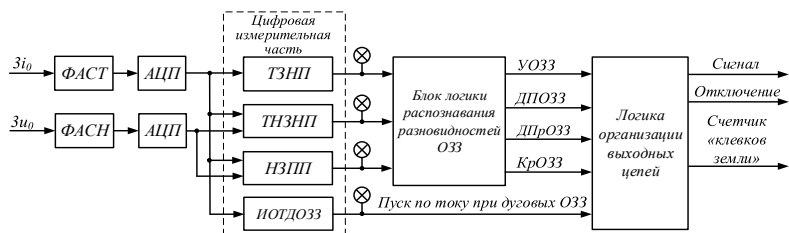


Рисунок 9 – Структурно-функциональная схема комплексной многофункциональной защиты от ОЗЗ кабельных сетей 6–10 кВ с изолированной нейтралью и с высокоомным заземлением нейтрали

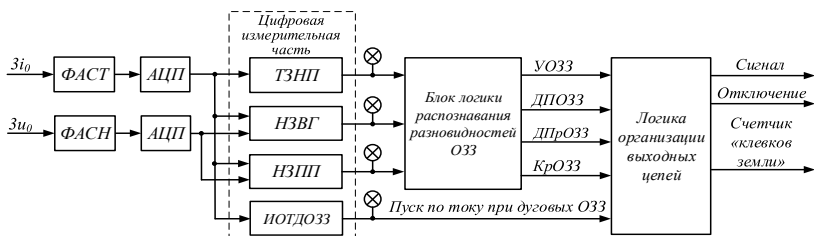
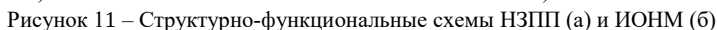


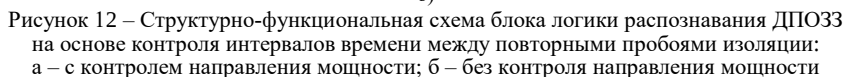
Рисунок 10 – Структурно-функциональная схема комплексной многофункциональной защиты от ОЗЗ для компенсированных кабельных сетей 6–10 кВ

На рис. 9, 10: ФАСТ, ФАСН – формирователи аналогового сигнала тока и напряжения; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; ТЗНПВГ – токовая защита абсолютно замера ВГ; НЗПП – направленная защита непрерывного действия на основе переходных процессов; НЗВГ – направленная защита на основе ВГ; ИОТДОЗЗ – измерительный орган среднеквадратичного значения тока дугового ОЗЗ.

Разработаны требования к основным функциональным узлам комплексной защиты, принципы выполнения и алгоритмы их функционирования. Определены требования к частотным характеристикам формирователей аналоговых сигналов тока и напряжения, цифровых фильтров для НЗПП и НЗВГ и АЦП. Показано, что необходимым условием обеспечения непрерывности действия НЗПП на интервале времени существования переходного процесса является согласование частотных характеристик каналов тока и напряжения. Разработаны принципы выполнения и алгоритм функционирования основных узлов и элементов НЗПП: измерительного органа направления мощности нулевой последовательности (ИОНМ), пускового органа максимального напряжения $3U_0$ (ПО $3U_0$), пускового органа по напряжению ВГ $3U_0$ (ПОВГ $3U_0$) (рис. 11). Логическая часть НЗПП осуществляет фиксацию каждого кратковременного ОЗЗ и формирование общих сигналов "ОЗЗ – линия" и "ОЗЗ – шины".



Разработаны принципы выполнения блока распознавания разновидностей ОЗЗ. На рис. 12, 13 в качестве примера приведены структурно-функциональные схемы логики распознавания ДПОЗЗ с использованием рассмотренных выше способов косвенного контроля величины перенапряжений в сети при дуговых замыканиях.



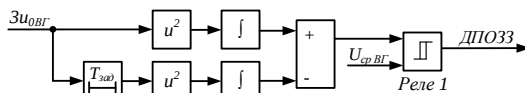


Рисунок 13 – Структурно-функциональная схема блока логики распознавания ДПОЗЗ на основе контроля общего уровня ВГ в напряжении $3U_0$

Алгоритмы работы функций защиты, предназначенных для действия в установившемся режиме ОЗЗ (ТЗНП, ТНЗНП, ТЗНПВГ), в основном соответствуют алгоритмам аналогичных функций, применяемых в микропроцессорных устройствах РЗА.

Предложены способы повышения технического совершенства ТЗНП и ТЗНПВГ в составе комплексной защиты от ОЗЗ, основанные на использовании двух ступеней защиты, «грубой» и «чувствительной». «Грубая» ступень предназначена для действия при наиболее опасных дуговых перемежающихся ОЗЗ, «чувствительная» ступень – для действия только при устойчивых ОЗЗ и блокируется при ДПОЗЗ. На основе результатов, полученных в главе 3 при исследованиях переходных процессов при ОЗЗ, предложен также способ выполнения трехступенчатой ТЗНП с «адаптивной» ступенью, действующей при всех разновидностях ОЗЗ, уставка по току срабатывания которой автоматически изменяется в зависимости от величины интервалов времени между повторными зажиганиями заземляющей дуги.

Для существующих исполнений ТЗНП и ТЗНПВГ и для усовершенствованных защит разработаны методики выбора уставок по току срабатывания.

Исследования, проведенные на имитационных моделях «Кабельная сеть 6–10 кВ – комплексное многофункциональное устройство защиты», выполненных в среде Matlab, подтвердили эффективность разработанных принципов выполнения и алгоритмов функционирования комплексной защиты от ОЗЗ. На рис. 14 в качестве примера показаны осциллограммы сигналов на выходе НЗПП (P_{0+}), на выходе НЗВГ ($P_{0уст+}$), на выходе блока распознавания ДПОЗЗ, сигнал внутреннего устойчивого ОЗЗ (УОЗЗ–линия) и общий сигнал внутреннего замыкания (ОЗЗ–линия) при сложном ОЗЗ: дуговом прерывистом, переходящем в перемежающееся, а затем в устойчивое ОЗЗ.

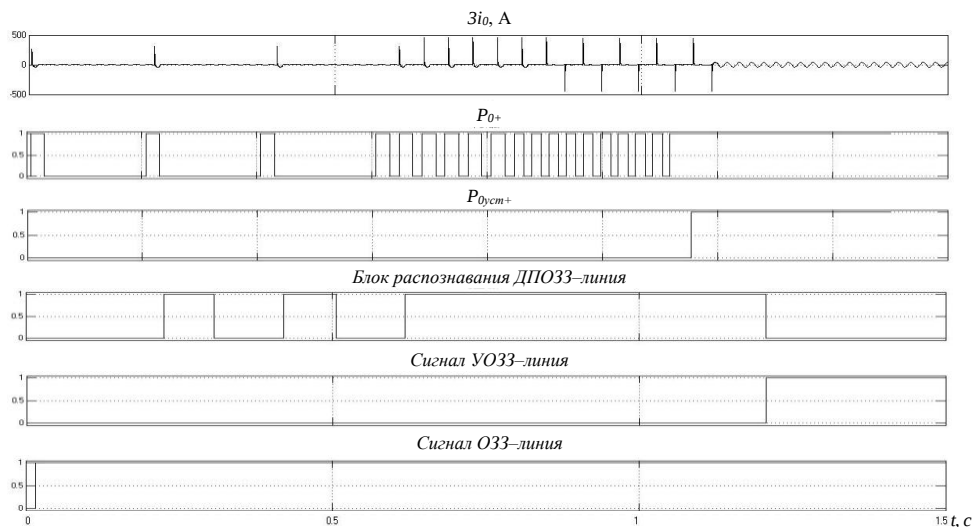


Рисунок 14 – Осциллограммы выходных сигналов комплексной защиты при внутреннем сложном ОЗЗ в кабельной сети 6–10 кВ с изолированной нейтралью

В рамках НИР по теме «Исследование и разработка защиты от замыканий на землю в распределительных кабельных сетях 6–10 кВ», выполненных по договору с ООО НПП «ЭКРА», разработано техническое задание на ОКР устройства комплексной многофунк-

циональной защиты от ОЗЗ кабельных сетей 6–10 кВ, на основе которого предприятием изготовлен макетный и опытный образцы защиты. В настоящее время образец комплексной защиты установлен в опытную эксплуатацию в кабельных сетях г. Чебоксары.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. На основе анализа известных принципов выполнения и исполнений устройств защиты от ОЗЗ и эффективности их работы в кабельных сетях 6–10 кВ предложен комплексный многофункциональный подход к повышению их технического совершенства, предполагающий способность распознавания всех разновидностей ОЗЗ в сетях с любыми режимами заземления нейтрали для автоматической оценки степени опасности повреждения и выбора способа действия защиты (сигнал или отключение), основанный на использовании нескольких различных функций защиты от данного вида повреждений, взаимодействующих между собой для повышения эффективности функционирования каждой из них и защиты в целом.

2. Разработаны основные требования к комплексной многофункциональной защите от ОЗЗ индивидуального исполнения, обеспечивающую распознавание всех разновидностей ОЗЗ, и обоснован состав образующих ее функций для кабельных сетей 6–10 кВ с различными режимами заземления нейтрали.

3. С использованием имитационных моделей и аналитических решений на основе упрощенных схем замещения решены задачи оценки минимального и максимального уровней высших гармоник в токе ОЗЗ компенсированных кабельных сетей 6–10 кВ промышленного и городского электроснабжения, а также оценки степени нестабильности уровня ВГ в зависимости от различных влияющих факторов для определения требований к чувствительности, уточнения условий и области применения максимальных токовых защит на основе ВГ.

4. На основе исследований на имитационных моделях переходных процессов при ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ определены характеристики частотных спектров переходных токов в поврежденном и неповрежденных присоединениях, обоснован рабочий диапазон частот и требования к чувствительности направленной защиты, основанной на способе непрерывного контроля фазных соотношений электрических величин переходного процесса.

5. Предложены способы косвенного контроля перенапряжений в кабельных сетях с изолированной нейтралью, основанные на измерении интервалов времени между повторными зажиганиями заземляющей дуги, уровня высших гармоник в напряжении и токе нулевой последовательности, позволяющие распознавать опасные и неопасные для сети дуговые замыкания на землю.

6. Разработаны структурно-функциональные схемы комплексной многофункциональной защиты от ОЗЗ кабельных сетей 6–10 кВ с различными режимами заземления нейтрали, принципы выполнения и алгоритмы функционирования ее основных функциональных узлов: направленной защиты непрерывного действия на основе переходных процессов, направленной защиты на основе высших гармоник, блока, обеспечивающего распознавание опасных и неопасных разновидностей ОЗЗ.

7. Предложены способы повышения технического совершенства токовых защит нулевой последовательности, входящих в состав комплексной многофункциональной защиты: двухступенчатая защита с «грубой» и «чувствительной» ступенями, последняя из которых блокируется при дуговых замыканиях на землю, а также адаптивной токовой защиты с автоматическим изменением уставки по току срабатывания в зависимости от величины интервалов времени между повторными зажиганиями заземляющей дуги, действующей при всех разновидностях ОЗЗ.

8. Разработаны методики выбора уставок по току срабатывания существующих исполнений токовых защит нулевой последовательности на основе составляющих промышленной частоты и высших гармоник и усовершенствованных защит по п. 7.

9. Для выполнения комплексной защиты от ОЗЗ кабельных сетей 6–10 кВ в рамках работы с ООО НПП «ЭКРА» разработано техническое задание на ОКР, на основе которого изготовлен и протестирован опытный образец комплексной многофункциональной защиты от ОЗЗ, установленный в эксплуатацию в кабельных сетях г. Чебоксары.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

По перечню рецензируемых изданий ВАК

1. **Винокурова (Шадрикова), Т.Ю.** Математическая модель для оценки минимального уровня высших гармоник в токе однофазного замыкания на землю в компенсированных сетях 6–10 кВ / Т.Ю. Винокурова, В.А. Шуин, Е.С. Шагурина // Вестник ИГЭУ. Вып. 6. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина. – 2013. – С. 35–41.

2. **Винокурова (Шадрикова), Т.Ю.** Применение имитационного моделирования для оценки уровня нестабильности высших гармоник в токе однофазного замыкания на землю в компенсированных кабельных сетях 6–10 кВ / Т.Ю. Винокурова, В.А. Шуин, Е.С. Шагурина // Вестник ИГЭУ. Вып. 6. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина. – 2014. – С. 31–38.

3. **Винокурова (Шадрикова), Т.Ю.** Выбор воздействующих величин токовых защит от однофазных замыканий на землю в кабельных сетях среднего напряжения / Т.Ю. Винокурова, М.С. Аль-Хомиди, О.А. Добрыгина, В.А. Шуин // Вестник ИГЭУ. Вып. 2. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина. – 2015. – С. 21–29.

4. **Винокурова (Шадрикова), Т.Ю.** Методика выбора параметров срабатывания максимальных токовых защит от замыканий на землю на основе высших гармоник в компенсированных кабельных сетях 6–10 кВ / Т.Ю. Винокурова, Е.С. Шагурина, В.А. Шуин // Вестник ИГЭУ. Вып. 3. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина. – 2015. – С. 20–28.

Основные публикации в других изданиях

5. **Винокурова (Шадрикова), Т.Ю.** Применение программного комплекса ATPDesigner для расчетов аварийных режимов ЭЭС в целях релейной защиты / Т.Ю. Винокурова, Т.М. Бакина, В.А. Шуин // ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА: Материалы региональн. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина. Т. 3. – 2011. – С. 93–101.

6. **Винокурова (Шадрикова), Т.Ю.** Модели трансформаторов для анализа спектра высших гармоник при замыканиях на землю в сетях 6–10 кВ / Т.Ю. Винокурова // Энергетика глазами молодежи: научные труды III Международной научно-технической конференции: сборник статей. В 2 т. Т. 2. – Екатеринбург: УрФУ. – 2012. – С. 355–359.

7. **Винокурова (Шадрикова), Т.Ю.** Модель компенсированной сети 6–10 кВ для исследования режимов функционирования защит от замыканий на землю на основе высших гармоник. / Т.Ю. Винокурова, В.А. Шуин, Е.С. Шагурина // ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА: Материалы региональной научно-технической конференции студентов и аспирантов. Т. 3. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина. – 2012. – С. 92–99.

8. **Винокурова (Шадрикова), Т.Ю.** Требования к чувствительности защит от однофазных замыканий на землю на основе высших гармоник / Т.Ю. Винокурова, В.А. Шуин, Е.С. Шагурина // Доклады межд. науч.-техн. конф. СИГРЕ «Современные направления развития релейной защиты и автоматики энергосистем» [Электронный ресурс]. – Екатеринбург. – 2013.

9. **Винокурова (Шадрикова), Т.Ю.** Схема замещения для расчета минимального уровня высших гармоник в токе однофазного замыкания на землю в компенсированных сетях 6–10 кВ / Т.Ю. Винокурова // Материалы Международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электротехнологии» («XVII Бенардосовские чтения»). Т. 1. – Иваново: ПресСТО. – 2013. – С. 137–140.

10. **Винокурова (Шадрикова), Т.Ю.** Сравнительный анализ принципов выполнения защит от замыканий на землю на основе высших гармоник для компенсированных сетей 6–10 кВ / Т.Ю. Винокурова, В.А. Шуин, Е.С. Шагурина // Материалы VIII Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия – 2013». Т.3 Ч. 1. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина. – 2013 – С. 184–194.

11. **Винокурова (Шадрикова), Т.Ю.** Расчеты высших гармоник в токе замыкания на землю на математических моделях компенсированных сетей 6–10 кВ / Т.Ю. Винокурова, В.А. Шуин, Е.С. Шагурина // Электроэнергетика глазами молодежи: науч. Тр. IV междунар. науч.-техн. конф. Т. 2. – Новочеркасск: Лик. – 2013. – С. 211–215.

12. **Винокурова (Шадрикова), Т.Ю.** О требованиях к чувствительности защит от замыканий на землю кабельных сетей 6–10 кВ на основе переходных процессов / Т.Ю. Винокурова, В.А. Шуин, Е.С. Шагурина // ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА: Девятая международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2014»: материалы конференции. В 7 т. Т.3. Ч. 1. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина. – 2014. – С. 176–181.

13. **Винокурова (Шадрикова), Т.Ю.** Оценка нестабильности уровня высших гармоник в токе однофазного замыкания на землю в компенсированных кабельных сетях 6–10 кВ / Т.Ю. Винокурова, В.А. Шуин // ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА: IX международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2014»: материалы конференции. В 7 т. Т.3. Ч. 1. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет. – 2014. – С. 181–189.

14. **Винокурова (Шадрикова), Т.Ю.** Условия и области применения токовых защит от замыканий на землю в сетях 6–10 кВ на основе абсолютного замера высших гармоник / Т.Ю. Винокурова, В.А. Шуин, Е.С. Шагурина // Сборник докладов XXII конференции «Релейная защита и автоматика энергосистем». – М.: РЗА Экспо. – С. 100–102.

15. **Винокурова (Шадрикова), Т.Ю.** Высшие гармоники и их применение в защитах от замыканий на землю кабельных сетей 6–10 кВ / О.А. Добрыгина, Е.С. Шагурина, Т.Ю. Винокурова // Электроэнергетика глазами молодежи. Научные труды V Международной молодежной научно-технической конференции, 10–14 ноября 2014 г.: материалы конференции. Т. 1. – Томск: ТПУ. – 2014. – С. 547–551.
16. **Винокурова (Шадрикова), Т.Ю.** О выборе воздействующей величины токовой защиты от замыканий на землю кабельных сетей 6–10 кВ с изолированной нейтралью / О.А. Добрыгина, Е.С. Шагурина, Т.Ю. Винокурова // Электроэнергетика глазами молодежи. Науч. тр. V Междунар. молодежн. науч.-техн. конф., 10–14 ноября 2014 г.: Материалы конференции. Т. 1. – Томск: ТПУ. – 2014. – С. 551–555.
17. **Vinokurova (Шадрикова), T.Yu.** Application of higher harmonics in protection against single-phase earth faults in resonant grounded cable networks of medium voltage / T.Yu. Vinokurova, O.A. Dobryagina, E.S. Shagurina, V.A. Shuin // Tagungsband zum Power and Energy Student Summit 2015. – Dortmund. – 2015 – S03.2.
18. **Vinokurova (Шадрикова), T.Yu.** Selection of actualizing quantity for single-phase earth fault current protections of medium-voltage cable system / T.Yu. Vinokurova, O.A. Dobryagina, E.S. Shagurina, V.A. Shuin // Tagungsband zum Power and Energy Student Summit 2015. – Dortmund. – 2015. – P01.5.
19. **Vinokurova (Шадрикова), T.Yu.** Selective complex single-phase earth fault protection for distribution medium-voltage networks / T.Yu. Vinokurova, O.A. Dobryagina, E.S. Shagurina, V.A. Shuin // Tagungsband zum Power and Energy Student Summit. – Dortmund. – 2015. – P01.6.
20. **Винокурова (Шадрикова), Т.Ю.** Условия применимости защиты от замыканий на землю сетей 6–35 кВ, основанной на сравнении высших гармоник фазных токов / Т.Ю. Винокурова // Материалы Международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электротехнологии» («XVIII Бенардосовские чтения»). Т. III. – Иваново: ПресСТО. – 2015. – С. 434–437.
21. **Винокурова (Шадрикова), Т.Ю.** Комплексный подход к решению проблемы селективной защиты распределительных кабельных сетей среднего напряжения от однофазных замыканий на землю / Т.Ю. Винокурова, О.А. Добрыгина, Г.А. Филатова, Е.С. Шагурина, В.А. Шуин, С.Н. Пашковский // Сборник докладов 5-й международной научно-технической конференции "Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем" [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://cigre.ru/activity/conference/relayprotect5/participants/materials/>.
22. **Винокурова (Шадрикова), Т.Ю.** Способы распознавания опасных дуговых прерывистых замыканий на землю в кабельных сетях 6–10 кВ / Т.Ю. Винокурова, О.А. Добрыгина, В.А. Шуин // Электроэнергетика глазами молодежи: труды VI Междунар. молодежн. науч.-техн. конф., 9–13 ноября 2015 г., Иваново. В 2 т. Т. 2. – Иваново: Ивановск. госунар. энрг. ун-т им. В.И. Ленина. – 2015. – С. 213–218.
23. **Винокурова (Шадрикова), Т.Ю.** Оценка уровня высших гармонических составляющих в переходных и установившихся токах однофазного замыкания на землю в компенсированных кабельных сетях 6–10 кВ на землю / Т.Ю. Винокурова, О.А. Добрыгина, В.А. Шуин // ВЕСТНИК Российского национального комитета СИГРЭ. Выпуск № 7. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина. – 2015. – С. 55–58.
24. **Винокурова (Шадрикова), Т.Ю.** Оценка минимального уровня высших гармоник в токе замыкания на землю в электрических сетях 6–10 кВ / Т.Ю. Винокурова, Е.С. Шагурина, В.А. Шуин // Сборник тезисов докладов II Междунар. науч.-практ. конф. и выставки РЕЛАВЭКСПО 2013. – Чебоксары: РИЦ СРЗАУ. – 2013. – С. 105–106.
25. **Винокурова (Шадрикова), Т.Ю.** О влиянии аппроксимации кривой намагничивания на точность оценки спектра высших гармоник, генерируемых трансформаторами / Т.Ю. Винокурова, В.А. Шуин // РАДИОЭЛЕКТРОНИКА, ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭНЕРГЕТИКА: Девятнадцатая Междунар. научн.-техн. конфер. студентов и аспирантов: Тез. докл. В 4 т. Т. 4. – М.: Изд. дом МЭИ. – 2013. – С. 314.

Личный вклад автора в работах, опубликованных в соавторстве:

[1–5, 7–8, 11–19, 21–25] – участие в разработке имитационных моделей, проведении вычислительных экспериментов на полученных моделях, анализе и оценке полученных результатов, получении аналитических решений отдельных задач исследования, подготовке иллюстраций результатов; [10] – анализ известных исполнений устройств защиты.

ШАДРИКОВА Татьяна Юрьевна

**РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСНОЙ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ
ОТ ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ КАБЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ 6–10 кВ**
Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Подписано в печать 10.03.2016 г. Формат 60×80 ¹/₁₆.

Печать плоская. Усл.печ. л. 1,16. Тираж 100 экз. Заказ № 133.

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический
университет имени В.И. Ленина»

153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34.

Отпечатано в УИУНЛ ИГЭУ