

На правах рукописи



ВОРОБЬЕВА Екатерина Андреевна

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРИНЦИПОВ ВЫПОЛНЕНИЯ
АДАПТИВНЫХ ТОКОВЫХ И АДМИТАНСНЫХ ЗАЩИТ
ОТ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ В КАБЕЛЬНЫХ СЕТЯХ 6–10 кВ**

Специальность: 05.14.02 – Электрические станции
и электроэнергетические системы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Иваново – 2018

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:

Шарыгин Михаил Валерьевич, доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», профессор кафедры «Электроэнергетика, электроснабжение и силовая электроника»;

Онисова Ольга Александровна, кандидат технических наук, Открытое акционерное общество «Всероссийский научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт релестроения с опытным производством» (ОАО «ВНИИР»), заведующий сектором НИОКР Центра моделирования электроэнергетических систем Департамента информационно-технологических систем.

Ведущая организация:

Акционерное общество «Энергетический институт им. Г.М. Кржижановского» (АО «ЭНИН»), г. Москва.

Защита состоится 1 марта 2019 года в 11-30 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», аудитория 237.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Ивановского государственного энергетического университета.

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

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

Автореферат разослан "___" _____ 201_ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.064.01



Ледуховский
Григорий Васильевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Более половины вырабатываемой в РФ электроэнергии распределяется потребителям систем промышленного и городского электроснабжения через кабельные сети напряжением 6–10 кВ, работающие, как правило, с изолированной нейтралью или с заземлением нейтрали через дугогасящий реактор (компенсацией емкостных токов). В указанных сетях преобладающим видом повреждений являются однофазные замыкания на землю (ОЗЗ), составляющие до 80–90% от общего числа электрических повреждений, а наиболее опасной разновидностью ОЗЗ – замыкания на землю через перемежающуюся дугу (ДПОЗЗ), сопровождающиеся опасными для всей распределительной сети перенапряжениями. Поэтому надежность электроснабжения потребителей в значительной мере зависит от технического совершенства устройств защиты от ОЗЗ распределительных кабельных сетей 6–10 кВ.

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. (ЮРГПУ–НПИ), Вайнштейн Р.А. (НИУ ТПУ), Дударев Л.Е. (ДПИ), Шуин В.А. (ИГЭУ) и др. Однако анализ опыта эксплуатации применяемых в настоящее время защит от данного вида повреждений, выполненный в 2000 г. ОРГРЭС, выявил не всегда достаточное их техническое совершенство (селективность и устойчивость функционирования).

Для защиты от ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ с изолированной нейтралью наиболее широкое применение получили максимальные токовые защиты нулевой последовательности (ТЗНП). Недостатками ТЗНП являются низкая селективность и устойчивость их функционирования, обусловленная влиянием переходных процессов при дуговых замыканиях на землю, а также не всегда достаточная чувствительность к замыканиям через переходное сопротивление. В компенсированных кабельных сетях 6–10 кВ для защиты от ОЗЗ основное применение получили максимальные токовые защиты нулевой последовательности на основе высших гармоник (ВГ), область возможного применения которых существенно ограничивается нестабильностью спектра ВГ в токе ОЗЗ компенсированных кабельных сетей 6–10 кВ. Поэтому совершенствование принципов выполнения защит от ОЗЗ в распределительных кабельных сетях 6–10 кВ является актуальной задачей.

Степень разработанности темы. Обоснование направления исследований. Большую селективность и устойчивость функционирования, чем у токовых защит, позволяют обеспечить устройства защиты от ОЗЗ, использующие измерительные органы с двумя подведенными величинами – током и напряжением нулевой последовательности $3i_0$ и $3u_0$.

К защитам, указанного типа, относятся прежде всего токовые направленные защиты нулевой последовательности (ТНЗНП), применяемые в сетях, работающих с изолированной нейтралью или с заземлением нейтрали через высокоомный резистор. Недостатком более универсальных ТНЗНП является не всегда недостаточная устойчивость их функционирования при ДПОЗЗ.

Автор выражает глубокую благодарность за научные консультации при выполнении работы к.т.н., доценту кафедры автоматического управления ЭЭС ИГЭУ Шадриковой Т.Ю. и д.т.н., профессору кафедры электрических систем ИГЭУ Слышалову В.К.

В европейских и некоторых других странах для защиты от ОЗЗ кабельных сетей среднего напряжения достаточно широкое применение получили защиты с двумя подведенными величинами, основанные на контроле проводимости нулевой последовательности защищаемого присоединения, называемые также адмитансными. К перспективным принципам выполнения защиты от ОЗЗ с двумя подведенными величинами, позволяющим обеспечить повышение их технического совершенства, на наш взгляд, относятся также практически не применяемые в настоящее время в России адаптивные токовые защиты нулевой последовательности.

Диссертационные исследования и разработки выполнены при финансовой поддержке 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 в ИГЭУ прикладных научно-исследовательских и экспериментальных работ (ПНИ-ЭР) по теме «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).

Целью настоящей работы является совершенствование принципов выполнения и алгоритмов функционирования адаптивных токовых и адмитансных защит от ОЗЗ распределительных кабельных сетей напряжением 6–10 кВ с различными режимами заземления нейтрали.

Задачи, решаемые в работе:

1 Совершенствование методов анализа переходных процессов при ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ для исследования динамических режимов функционирования защит от данного вида повреждений.

2 Анализ известных принципов выполнения и алгоритмов функционирования адаптивных токовых и адмитансных защит от ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ с различными режимами заземления нейтрали.

3 Разработка и исследование принципов выполнения и алгоритмов функционирования адаптивной токовой защиты от ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ с изолированной нейтралью и с компенсацией емкостных токов, обеспечивающей высокую устойчивость функционирования к замыканиям через переходное сопротивление и перемыкающуюся дугу.

4 Разработка и исследование способов повышения эффективности функционирования ненаправленной адмитансной защиты от ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ с изолированной и компенсированной нейтралью.

5 Разработка и исследование принципов выполнения направленной адмитансной защиты от ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ с изолированной и компенсированной нейтралью.

6 Сравнительный анализ эффективности адаптивных токовых и адмитансных защит от ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ.

7 Разработка функционально-структурных схем адаптивной токовой и адмитансной защит от ОЗЗ компенсированных и некомпенсированных кабельных сетей 6–10 кВ для выполнения на их основе макетного и экспериментального образцов защиты и проведения их испытаний на НПП «ЭКРА».

Методология и методы диссертационного исследования. Основным фактором, определяющим недостаточное техническое совершенство известных спо-

собов выполнения и исполнений адаптивных токовых и адмитансных защит, является существенное влияние на эффективность их функционирования переходных процессов при дуговых замыканиях на землю. Учитывая сложность переходных процессов при дуговых ОЗЗ основным методом их исследования в кабельных сетях 6–10 кВ с различными режимами заземления нейтрали в работе являлось математическое моделирование с использованием аналитических и имитационных моделей. Для решения задач в работе использовались также методы теории электрических цепей и электромагнитных переходных процессов в электроэнергетических системах.

Научную новизну работы представляют:

1 Методы повышения точности моделирования переходных процессов при ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ при исследованиях динамических режимов функционирования защит от данного вида повреждений, включающие модификацию аналитического решения уравнений переходных процессов при замыканиях на землю на основе двухчастотной схемы замещения, методику эквивалентирования имитационных моделей кабельных сетей 6–10 кВ, методику приближенного учета зависимости индуктивностей трехжильных кабелей от частоты токов переходного процесса.

2 Способ модификации адаптивной токовой защиты от ОЗЗ в кабельных сетях с изолированной нейтралью и с высокоомным заземлением нейтрали, основанный на использовании соотношений мгновенных значений для составляющих основной частоты тока и производной напряжения нулевой последовательности, позволяющий обеспечить повышение динамической устойчивости функционирования при замыканиях через перемежающуюся дугу.

3 Принципы выполнения мультимодальной адаптивной токовой защиты нулевой последовательности от ОЗЗ в компенсированных и некомпенсированных кабельных сетях 6–10 кВ, обеспечивающие адаптацию защиты как к влиянию переходного сопротивления в месте повреждения, так и к влиянию переходных процессов при дуговых перемежающихся замыканиях.

4 Принципы выполнения ненаправленной и направленной мультимодальной адмитансной защиты от ОЗЗ в компенсированных и некомпенсированных кабельных сетях 6–10 кВ, основанной на непосредственном контроле величины емкости нулевой последовательности защищаемого присоединения, обеспечивающие высокую динамическую устойчивость функционирования при замыканиях через перемежающуюся дугу.

Достоверность и обоснованность полученных результатов исследований определяются корректностью принятых допущений, использованием методов классической теории электрических цепей и теории электромагнитных переходных процессов в ЭЭС, сходимостью результатов, полученных аналитическими методами и на имитационных математических моделях, с данными исследований на физических моделях и с результатами исследований других авторов, опубликованными в литературных источниках, а также с данными исследовательских и лабораторных испытаний макетного образца адаптивной токовой и экспериментального образца максимальной и ненаправленной адмитансной защиты от ОЗЗ для кабельных сетей 6–10 кВ.

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» (технические науки): в диссертационной работе объектом исследований являются распределительные электрические кабельные сети среднего напряжения, предметом исследований – принципы выполнения и алгоритмы функционирования устройств защиты от наиболее частого вида повреждений – однофазных замыканий на землю.

Соответствие диссертации области исследования специальности: отраженные в диссертации научные положения соответствуют области исследования специальности 05.14.02, а именно:

– п. 6 «Разработка методов математического и физического моделирования в электроэнергетике» паспорта специальности 05.14.02 соответствует разработка принципов эквивалентирования математических имитационных моделей компенсированных и некомпенсированных кабельных сетей 6–10 кВ для исследований переходных процессов при однофазных замыканиях на землю;

– п. 9 «Разработка методов анализа и синтеза систем автоматического регулирования, противоаварийной автоматики и релейной защиты в электроэнергетике» паспорта специальности 05.14.02 соответствуют разработки новых принципов выполнения, структурно-функциональных схем, алгоритмов функционирования адаптивных токовых и адмитансных защит от ОЗЗ в распределительных кабельных сетях 6–10 кВ;

– п. 13 «Разработка методов использования ЭВМ для решения задач в электроэнергетике» паспорта специальности 05.14.02 соответствует разработка имитационных моделей кабельных сетей 6–10 кВ с различными режимами заземления нейтрали и цифровых моделей адаптивных токовых и адмитансных защит от ОЗЗ в среде моделирования Matlab для исследований эффективности функционирования разработанных новых принципов выполнения и алгоритмов функционирования адаптивных токовых и адмитансных защит от ОЗЗ.

Теоретическая значимость работы обусловлена следующим. **Доказана** возможность повышения селективности и устойчивости функционирования адаптивных токовых и адмитансных защит в переходных режимах при дуговых ОЗЗ на основе использования соотношений мгновенных значений между током и производной напряжения нулевой последовательности в диапазоне частот до 1,5–2 кГц. **Изложены** способы повышения динамической устойчивости функционирования адаптивных токовых и адмитансных защит от ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ с различными режимами заземления нейтрали. **Изучены** преимущества предложенных способов выполнения адаптивных токовых и адмитансных защит по сравнению с традиционными защитами указанных типов на основе интегральных соотношений между током и напряжением нулевой последовательности. **Проведена** модернизация существующих методик аналитического расчета переходных процессов при ОЗЗ на основе двухчастотной схемы замещения и формирования имитационных моделей кабельных сетей с применением программы Simulink с пакетом расширения SimPowerSystem. **Раскрыты** основные причины недостаточного технического совершенства существующих способов выполнения адаптивных токовых и адмитансных защит от ОЗЗ.

Практическую значимость результатов работы заключается в следующих основных положениях:

1 Методика эквивалентирования имитационных моделей кабельных сетей 6–10 кВ, которая может быть использована при анализе влияния переходных процессов при ОЗЗ на динамическую устойчивость функционирования защит от данного вида повреждений.

2 Результаты исследований на имитационных моделях кабельных сетей 6–10 кВ с различными режимами заземления нейтрали, позволяющие оценить эффективность функционирования мультичастотных адаптивной токовой и адмитансной защит от ОЗЗ при устойчивых и дуговых замыканиях на землю.

3 Результаты сравнительного анализа эффективности применения мультичастотных адаптивной токовой и адмитансной защит от ОЗЗ для кабельных сетей 6–10 кВ.

4 Техническое задание для выполнения НПП «ЭКРА» на базе микропроцессорного терминала МиР экспериментального образца комплексной защиты от ОЗЗ, включающей, кроме традиционных функций защиты от ОЗЗ, также функции универсальной мультичастотной адаптивной токовой защиты и универсальной мультичастотной адмитансной защиты от замыканий на землю.

Внедрение результатов исследований. Принципы выполнения, структурно-функциональные схемы и алгоритмы функционирования универсальных мультичастотных адаптивной токовой и адмитансной защит от ОЗЗ использованы Индустриальным партнером ИГЭУ по ПНИЭР RFMEFI57716X0215 НПП «ЭКРА» при разработке макетных образцов соответствующих защит и экспериментального образца комплексной защиты кабельных сетей 6–10 кВ от замыканий на землю.

Имитационные модели кабельных сетей 6–10 кВ, позволяющие исследовать переходные и установившиеся режимы ОЗЗ, и цифровые модели разработанных защит от ОЗЗ внедрены в учебном процессе на кафедре «Автоматическое управление электроэнергетическими системами» ИГЭУ при подготовке магистров по направлению 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника» при изучении дисциплин «Спецвопросы релейной защиты» и «Математическое моделирование объектов электроэнергетики и устройств автоматического управления ими», в научно-исследовательской работе, выполнении выпускных квалификационных работ.

Основные положения, выносимые на защиту:

1 Методы повышения точности моделирования переходных процессов при ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ при исследованиях динамических режимов функционирования защит от данного вида повреждений: модификация аналитического решения на основе двухчастотной схемы замещения, методика эквивалентирования имитационных моделей кабельных сетей 6–10 кВ, методика приближенного учета зависимости индуктивностей трехжильных кабелей от частоты токов переходного процесса.

2 Способ модификации адаптивной токовой защиты от ОЗЗ в кабельных сетях с изолированной нейтралью и с высокоомным заземлением нейтрали, обеспечивающий повышение динамической устойчивости функционирования при дуговых перемежающихся замыканиях.

3 Принципы выполнения мультичастотной адаптивной токовой защиты нулевой последовательности от ОЗЗ для компенсированных и некомпенсированных кабельных сетях 6–10 кВ, обеспечивающие адаптацию защиты как к влиянию переходного сопротивления в месте повреждения, так и к влиянию переходных процессов при дуговых перемежающихся замыканиях.

4 Принципы выполнения ненаправленной и направленной мультимодальной адмитансной защиты от ОЗЗ в компенсированных и некомпенсированных кабельных сетях 6–10 кВ, основанной на контроле величины емкости нулевой последовательности защищаемого присоединения, обеспечивающие повышение динамической устойчивости функционирования при замыканиях через перемежающуюся дугу.

5 Функционально-структурные схемы и алгоритмы функционирования макетных образцов универсальных мультимодальных адаптивной токовой и адмитансной защит от ОЗЗ и результаты их исследований на имитационных моделях компенсированных и некомпенсированных кабельных сетей 6–10 кВ.

6 Результаты сравнительного анализа эффективности применения в кабельных сетях 6–10 кВ мультимодальных адаптивной токовой и адмитансной защит от ОЗЗ.

Личный вклад автора заключается в постановке цели и конкретных задач исследования, разработке методов повышения точности моделирования переходных процессов при ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ в целях исследований динамических режимов функционирования защит от данного вида повреждений, выполнении аналитического обзора известных принципов выполнения адаптивных токовых и адмитансных защит от ОЗЗ, разработке принципов выполнения, структуры и алгоритмов функционирования адаптивной токовой, ненаправленной максимальной адмитансной и направленной адмитансной защит от ОЗЗ кабельных сетей 6–10 кВ с различными режимами заземления нейтрали, разработке имитационных моделей компенсированных и некомпенсированных кабельных сетей 6–10 кВ и моделей адаптивных токовых и адмитансных защит от ОЗЗ для исследований эффективности их функционирования, получении аналитических решений отдельных задач исследования, разработке тестовых сигналов в формате Comtrade-осциллограмм для исследовательских испытаний макетного и экспериментального образцов адаптивных токовых и адмитансных защит, проведении и анализе результатов испытаний, внедрении результатов исследований и разработок в учебный процесс подготовки магистрантов по направлению 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника», в подготовке публикаций по теме диссертации.

Апробация работы. Результаты исследований докладывались и обсуждались на XL сессии семинара «Кибернетика энергетических систем» (Новочеркасск, 2018 г.), Международной молодежной научно-технической конференции IEEE «Релейная защита и автоматика» (Москва, 2018 г.), IV Международной научно-технической конференции «Современные направления развития релейной защиты и автоматизации энергосистем» (Екатеринбург, 2013 г.), Международной научно-практической конференции и выставке «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем России» (РЕЛАВЭКСПО 2013) (Чебоксары, 2013 г.), XVI, XVII и XVIII Международных научно-технических конференциях «Состояние и перспективы развития электротехнологии» («XVI Бенардосовские чтения») (Иваново, 2011 г., 2013 г., 2015 г.), Восемнадцатой и Девятнадцатой международных научно-технических конференциях студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (Москва, 2012г., 2013 г.), III, IV, V и VI Международных научно-технических конференциях «Электроэнергетика глазами молодежи» (Екатеринбург, 2012 г.; Новочеркасск, 2013 г.; Томск, 2014 г.; Иваново, 2015г.), на VIII, IX, X, XI и XII Международных научно-технических конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия - 2013» (Иваново, 2013 г., 2014 г., 2015 г., 2016 г., 2017 г.), VI и VII региональных научно-технических кон-

ференциях студентов, аспирантов и молодых ученых (с международным участием) «Энергия - 2011» и «Энергия - 2012» (Иваново, 2011, 2012 гг.).

Публикации. Результаты исследований опубликованы в 23 работах, из них 4 работы – в изданиях по перечню ВАК, 19 работ – в статьях и тезисах докладов международных научно-технических конференций.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 149 источников. Общий объем диссертации составляет 206 страниц, из них основной текст включает 188 стр., содержащий 64 ил. и 8 табл., список литературы 18 стр.

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 основные особенности и характеристики кабельных сетей 6–10 кВ, определяющие параметры электрических величин переходного процесса при ОЗЗ, как основного фактора, влияющего на техническое совершенство защит от данного вида повреждений, обоснованы методы, аналитическая и имитационные модели для исследований переходных процессов при замыканиях на землю. Предложена методика повышения точности аналитического решения уравнений переходного процесса при ОЗЗ на основе двухчастотной схемы замещения кабельной сети 6–10 кВ, обеспечивающая учет влияния емкостей кабельных линий (КЛ), расположенных за местом повреждения. Показано, что указанное выше аналитическое решение, имеет существенный недостаток, заключающийся в том, что оно не учитывает влияния разрядных и зарядных токов, обусловленных частью сети или КЛ, расположенных за местом повреждения (рис. 1).

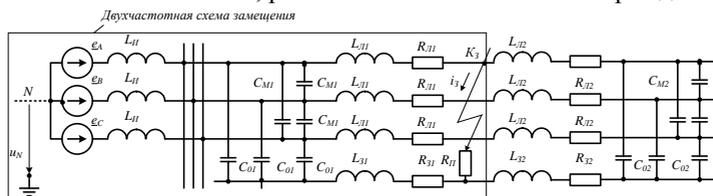


Рисунок 1 – Схема замещения кабельной сети 6-10 кВ для исследований переходных процессов при ОЗЗ с учетом влияния емкостей элементов, расположенных за местом повреждения

Для получения аналитического решения для схемы рис. 1 предложена модифицированная методика расчета переходного процесса при ОЗЗ, позволяющая свести расчеты разрядно и зарядной составляющих переходного тока в месте установки защиты к двум последовательным расчетам с использованием двухчастотной схеме замещения. Показано, что при расчете разрядной составляющей переходного тока по уравнениям для двухчастотной схемы замещения влиянием элементов сети, расположенных справа от места ОЗЗ (L_{j2} , L_{32} , R_{j2} , R_{32} , C_{02} , C_{M2}) можно пренебречь, а при расчетах по тем же уравнениям зарядной составляющей емкости сети, подключенные к шинам источника питания, определить как сумму емкостей, расположенных по обе стороны от места повреждения ($C_{0\Sigma} = C_{01} + C_{02}$, $C_{M\Sigma} = C_{M1} + C_{M2}$).

В системе Matlab разработаны имитационные модели для исследований переходных процессов при ОЗЗ, учитывающие особенности конфигурации и параметры кабельных сетей 6–10 кВ систем промышленного и городского электроснабжения. В целях уменьшения затрат времени на проведение вычислительных экспериментов обоснована методика эквивалентирования имитационных моделей кабельных сетей 6–10 кВ.

Разработана методика приближенного учета частотных зависимостей индуктивностей трехжильных КЛ, основанная на аппроксимации секторных жил кабеля эллипсами с полуосями a, b (рис. 2).

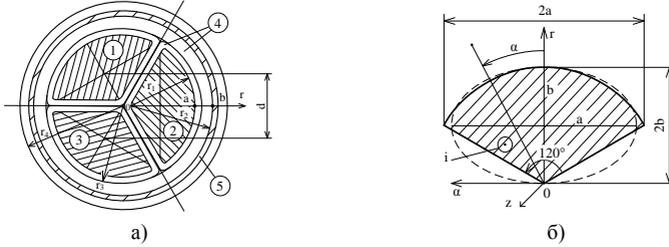


Рисунок 2 – Основные элементы конструкции трехжильного кабеля 6-10 кВ (а) и форма сечения одной из жил (б): 1, 2, 3 – жилы; 4 – изоляция; 5 – оболочка; a, b – полуоси эллипса

На основе указанного подхода получены выражения для расчета частотных зависимостей внутренних и внешних индуктивностей жил и оболочки кабеля и взаимной индукции между жилами (табл. 1).

Таблица 1 – Расчетные выражения для определения частотных зависимостей индуктивностей трехжильного кабеля

Индуктивность контура «жила – оболочка»:	$L_{k \text{ эк-об}} = L_{ke} + L_{ki} + L_{об.i}, k = 1, 2, 3;$	(1)
Внутренняя индуктивность оболочки $L_{об.i}$:	$L_{об.i} = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \left(\frac{r_3^4}{r_4^2 - r_3^2} \cdot \ln \frac{r_4}{r_3} + \frac{r_4^2 - 3 \cdot r_3^2}{4 \cdot (r_4^2 - r_3^2)} \right);$	(2)
Внутренняя индуктивность жилы L_{ki} на низких частотах	$L_{ki}(0) = \frac{\mu_0}{8\pi};$	(3)
Внутренняя индуктивность жилы L_{ki} при резко выраженном поверхностном эффекте ($\Delta \ll a, b$):	$L_{ki} = \frac{1}{\omega} \cdot \frac{1}{2\pi r_s \Delta \gamma} = \frac{1}{2\pi r_s} \sqrt{\frac{\mu_0}{2\omega \gamma}};$ $\Delta = \sqrt{2 / \omega \mu_0 \gamma};$	(4) (5)
Внешняя индуктивность жилы L_{ke} при низких частотах ($f = 50$ Гц):	$L_{ke}(0) = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{r_2}{r_1} + 0,239 \frac{\mu_0}{\pi \cdot S_{\text{эк}}} r_1^2 \left(1 - \frac{r_1}{r_2} \right);$	(6)
Внешняя индуктивность жилы L_{ke} при резко выраженном поверхностном эффекте ($\Delta \ll a, b$):	$L_{e\Delta}(\omega) = L_{ke}(0) \frac{S_{\text{эк}}}{S_{\Delta}} - L_e^*(0) \left(\frac{S_{\text{эк}}}{S_{\Delta}} - 1 \right);$ $L_e^*(0) = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{r_2 - \Delta}{r_1 - \Delta} + 0,239 \frac{\mu_0}{\pi} \frac{(r_1 - 2\Delta)^2}{S_{\text{эк}} - S_{\Delta}} \left(1 - \frac{r_1 - \Delta}{r_2 - \Delta} \right).$	(7)

Проверка достоверности предложенной методики показала, что погрешности расчетов по (1)–(7) по сравнению с результатами, полученными другими авторами, не превышает 15–20%.

Показано, что с учетом особенностей переходных процессов при ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ применение моделей линий, для которых индуктивности прямой и нулевой последовательности определены по скорости распространения электромагнитных волн в трехжильных кабелях и не учитывают их зависимость от частоты, обу-

славливает погрешности по амплитуде и частоте свободных составляющих в пределах ~10–15%.

В главе 2 дан сравнительный анализ известных способов выполнения и исполнений адаптивных токовых и адмитансных защит от замыканий на землю. Сформулированы критерии для оценки эффективности известных технических решений в части защиты от ОЗЗ кабельных сетей 6–10 кВ. К ним, кроме технического совершенства, на наш взгляд, следует отнести:

- универсальность, определяющую возможность применения защиты в сетях с различными режимами заземления нейтрали сети;
- способность фиксировать все разновидности ОЗЗ, включая ДПОЗЗ и кратковременные самоустраняющиеся пробой изоляции;
- динамическую устойчивость функционирования (устойчивость в условиях влияния на работу защиты переходных процессов);
- непрерывность действия при устойчивых ОЗЗ;
- чувствительность к ОЗЗ через большое переходное сопротивление.

На основе анализа показано, что известные способы выполнения и исполнения адаптивных токовых и адмитансных защит от ОЗЗ не отвечают в полной мере сформулированным выше критериям. Так известные традиционные способы выполнения адаптивных ТЗНП, основанные на допущении о линейной зависимости между среднеквадратичными значениями тока $3I_0$ в месте ОЗЗ и напряжения $3U_0$, не позволяют обеспечить устойчивость функционирования при дуговых ОЗЗ и предназначены для применения только в сетях, работающих с изолированной нейтралью. Основным недостатком ненаправленной максимальной адмитансной защиты, основанной на контроле полной проводимости нулевой последовательности защищаемого присоединения $\underline{Y}_0 = 3I_0/U_0 = G_0 + jB_0$ или ее реактивной составляющей $B_0 = \omega C_0$, является необходимость значительного увеличения уставки срабатывания по воздействующей величине для отстройки от влияния переходных процессов при дуговых ОЗЗ, что, как и для традиционной ТЗНП, существенно ограничивает область ее возможного применения по относительной величине собственного емкостного тока защищаемого присоединения $I_{c\text{собс}}^* = I_{c\text{собс}}/I_{c\Sigma}$. Большее техническое совершенство обеспечивает направленная адмитансная защита, основанная на контроле знака реактивной составляющей вектора проводимости $3\underline{Y}_0$, однако ее эффективное применение возможно только в сетях с изолированной нейтралью. Недостатком направленной адмитансной защиты, выполненной на основе указанного способа, является также возможность отказов функционирования из-за искажений фазных соотношений контролируемых величин в переходных режимах при дуговых ОЗЗ.

В целях повышения устойчивости функционирования в переходных режимах при дуговых ОЗЗ в ABB Oy Medium Voltage Products (Finland) разработана направленная мультичастотная адмитансная защита, основанная на использовании для контроля проводимости \underline{Y}_0 не только 1-й гармоники, но и высших гармонических составляющих тока и напряжения нулевой последовательности, и кумулятивного (накопительного) метода вычислений проводимости \underline{Y}_0 , позволяющего повысить точность измерений существенных гармонических составляющих при неустойчивом характере замыкания. Недостатком рассмотренной мультичастотной адмитансной защиты является использование для замера проводимости \underline{Y}_0 дискретного спектра гармонических составляющих, что не позволяет, на наш взгляд, обеспечить высокую динамическую устойчивость функционирования, т.к.

в переходных режимах при дуговых ОЗЗ частота существенных гармонических составляющих (разрядной и зарядной) зависит от множества факторов: параметров сети и поврежденной линии, удаленности места ОЗЗ от источника питания, переходного сопротивления в месте повреждения и др. В описании защиты также не оговаривается частотный диапазон, в пределах которого сохраняется его работоспособность.

Следует также отметить, что рассмотренный мультичастотный способ позволяет выполнить только направленную защиту от ОЗЗ. В то же время известно, что в реальных условиях эксплуатации кабельных сетей 6–10 кВ в России достаточно часто встречаются отказы функционирования направленных защит из-за ошибок в полярности подключения к защите вторичной обмотки кабельных трансформаторов тока нулевой последовательности (ТТНП). Поэтому в эксплуатации предпочтение отдается ненаправленным защитам от ОЗЗ, а направленные защиты применяются только в тех случаях, когда использование ненаправленных защит не позволяет обеспечить селективность несрабатываний при внешних и требуемую чувствительность при внутренних замыканиях. С учетом этого, рассмотренную мультичастотную адмитансную защиту нельзя рассматривать как универсальное решение проблемы селективной защиты от ОЗЗ в распределительных кабельных сетях среднего напряжения с различными режимами заземления нейтрали.

В главе 3 приведены результаты разработки и исследований принципов выполнения токовых защит от ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ, обеспечивающих адаптивность не только к влиянию переходного сопротивления в месте повреждения, но и, что более важно, к влиянию переходных процессов при замыканиях через перемежающуюся дугу.

Анализ на имитационных моделях кабельных сетей 6–10 кВ с изолированной нейтралью показал, что при дуговых ОЗЗ спектральные составляющие основной частоты напряжения u_0 и тока $3i_0$, как и при устойчивых замыканиях, изменяются в одинаковой степени, т.е. для составляющих рабочей частоты токов нулевой последовательности неповрежденного и поврежденного присоединений выполняются соотношения:

$$3I_{0.50\text{ нен}}(t) \approx 3C_{0\text{собс}} \omega b_{50}(t) U_{\phi} = b_{50}(t) I_{c\text{собс}}; \quad (8)$$

$$3I_{0.50\text{ пов}}(t) \approx 3(C_{0\Sigma} - C_{0\text{собс}}) \omega b_{50}(t) U_{\phi} = b_{50}(t) (I_{c\Sigma} - I_{c\text{собс}}); \quad (9)$$

$$b_{50}(t) = U_{0.50} / U_{\phi.50} \approx U_{0.50} / U_{\phi.\text{ном}}, \quad (10)$$

где $3C_{0\Sigma}$ – суммарная емкость фаз сети на землю; $3C_{0\text{собс}}$ – собственная емкость фаз на землю неповрежденного присоединения; $b_{0.50}$ – коэффициент полноты замыкания по составляющей рабочей частоты 50 Гц.

На основе соотношений (8)–(10) разработана адаптивная максимальная токовая защита от ОЗЗ для кабельных сетей, работающих с изолированной нейтралью и с высокоомным заземлением нейтрали (рис. 3).

Для обеспечения несрабатываний при внешних устойчивых и дуговых ОЗЗ текущее значение уставки по току срабатывания предлагаемой адаптивной ТЗНП должно удовлетворять соотношению

$$I_{0.\text{уст}}(t) \geq K_{\text{омс}} b_{50}(t) I_{c\text{собс}}, \quad (11)$$

а условие применимости (селективности и устойчивости функционирования) в сетях с изолированной нейтралью имеет вид

$$I_{с\text{ собс}^*} \leq \frac{1}{1 + K_{отс} K_{ч.мин}}. \quad (12)$$

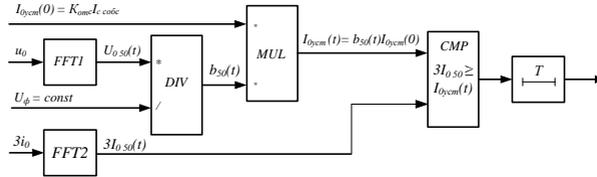


Рисунок 3 – Структурно-функциональная схема адаптивной ТЗНП на основе составляющих основной частоты тока $3i_0$ и напряжения u_0 : *FFT1*, *FFT2* – блоки преобразования Фурье для формирования составляющих рабочей частоты 50 Гц; *DIV* – блок деления; *MUL* – блок умножения; *CMP* – схема сравнения

Заземление нейтрали сети через высокоомный резистор увеличивает чувствительность защиты на основе данного способа при устойчивых ОЗЗ и обеспечивает такую же чувствительность, как и в сетях с изолированной нейтралью, при дуговых замыканиях.

Основным недостатком рассмотренной адаптивной ТЗНП является возможность ее применения только в некомпенсированных кабельных сетях 6–10 кВ, что ограничивает область ее применения, т.е. универсальность. Адаптивная ТЗНП на основе составляющих основной частоты 50 Гц тока $3i_0$ и напряжения u_0 по принципу действия не позволяет также фиксировать самоустраняющиеся КрОЗЗ, для использования информации о них в целях диагностирования состояния изоляции элементов контролируемой кабельной сети. Возможность фиксации КрОЗЗ, включая однократные пробои изоляции, обеспечивают только защиты, основанные на использовании электрических величин переходного процесса.

Значительно более эффективное решение в части адаптивных токовых защит можно получить на основе соотношений между мгновенными значениями тока и производной напряжения нулевой последовательности при ОЗЗ:

$$3i_{0\ 50\ неп} = 3C_{0\ собс} \frac{du_{0\ 50}}{dt}; \quad (13)$$

$$3i_{0\ 50\ нов} = 3(C_{0\ \Sigma} - C_{0\ собс}) \frac{du_{0\ 50}}{dt}. \quad (14)$$

Анализ показал, что указанные соотношения при характерных для кабельных сетей 6–10 кВ с изолированной нейтралью параметрах КЛ справедливы не только для составляющих рабочей частоты, но и высших гармонических составляющих установившегося и переходных режимов ОЗЗ в диапазоне частот примерно до ~2 кГц. Из (13) и (14) для среднеквадратичных значений тока $3i_0$ и производной напряжения u_0 можно получить:

$$3I_{0\ неп}(t) = 3C_{0\ собс} \sqrt{\frac{1}{T_u} \int_{t_0}^{t_0+T_u} [u'_0(t)]^2 dt} = 3C_{0\ собс} U'_0(t). \quad (15)$$

$$3I_{0\ нов}(t) = 3(C_{0\ \Sigma} - C_{0\ собс}) \sqrt{\frac{1}{T_u} \int_{t_0}^{t_0+T_u} [u'_0(t)]^2 dt} = 3(C_{0\ \Sigma} - C_{0\ собс}) U'_0(t). \quad (16)$$

Используя соотношения (15) и (16), можно построить мультимастотную адаптивную ТЗНП, основанную на использовании не только составляющих основной частоты 50 Гц, но и суммы высших гармонических составляющих. Текущее значение уставки по току срабатывания адаптивной мультимастотной ТЗНП в соответствии с (15) должно удовлетворять условию

$$I_{0\text{уст}}(t) \geq K_{\text{омс}} 3C_{0\text{соеб}} U_0'(t). \quad (17)$$

В компенсированных сетях соотношения (15) и (16) остаются справедливыми для высших гармонических составляющих тока и производной напряжения нулевой последовательности. Подавляя с помощью фильтров составляющие основной частоты в u_0 и $3i_0$, на основе (15) и (16) можно построить аналогичную адаптивную токовую защиту для компенсированных кабельных сетей. Текущее значение уставки защиты по току срабатывания в компенсированной сети, как и в сети с изолированной нейтралью, должно выбираться по (17). Таким образом, на основе рассмотренных принципов можно выполнить универсальную адаптивную токовую защиту, предназначенную для применения как в сетях с изолированной нейтралью или с высокоомным заземлением нейтрали, так и в компенсированных сетях (рис. 4).

В предложенной защите для перехода от режима изолированной нейтрали к режиму компенсации емкостных токов достаточно в схеме формирования сравниваемых величин переключателями *SX1* и *SX2* включить фильтры *ZF1*, *ZF2*

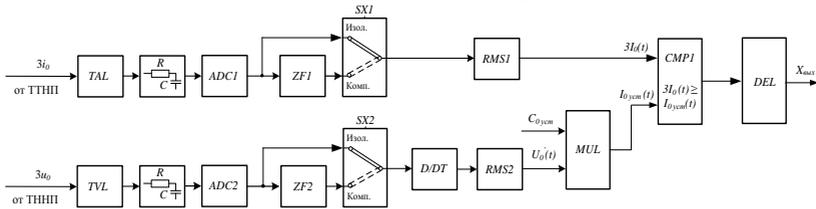


Рисунок 4 – Структурно-функциональная схема универсальной мультимастотной адаптивной ТЗНП для некомпенсированных и компенсированных кабельных сетей 6–10 кВ: *TAL*, *TVL* – вторичные преобразователи тока и напряжения; *RC* – аналоговые фильтры для подавления высокочастотных составляющих с $f > 2$ кГц; *ADC1*, *ADC2* – АЦП; *ZF1*, *ZF2* – частотные фильтры для подавления составляющих рабочей частоты $f = 50$ Гц; *RMS1*, *RMS2* – блоки вычисления среднеквадратичного значения; *D/DT* – дифференциатор; *DEL* – элемент временной задержки на срабатывание *MUL*, *CMP* – то же, что и на рис. 3

Результаты вычислительных экспериментов на имитационных моделях кабельных сетей с $U_{ном} = 6$ кВ с различными значениями суммарного емкостного тока $I_{c\Sigma}$ подтвердили эффективность функционирования мультимастотной адаптивной токовой защиты как при изолированной нейтрали сети, так и при заземлении нейтрали через высокоомный резистор или дугогасящий реактор. При всех разновидностях дуговых и устойчивых ОЗЗ защита обеспечивала заданный уровень отстронности по воздействующей величине, определяемый значением коэффициента отстройки $K_{омс}$, и требуемую чувствительность $K_{ч} \geq K_{ч,мин}$ (например, рис. 5).

Условие применимости мультимастотной адаптивной ТЗНП, как в сетях с изолированной нейтралью, так и в компенсированных сетях, определяется соотношением (12). Из (12) при $K_{омс} = 1,5$ и $K_{ч,мин} = 1,5$ можно получить $I_{c\text{соеб}^*} \leq 1/(1+1,5 \cdot 1,5) \approx 0,31$. Условие $I_{c\text{соеб}^*} \leq 0,31$ на ЦП кабельных сетей 6–10 кВ выполняется для 90 и более процентов присоединений, на РП практически для

100%. Отметим, что обычная ТЗНП может применяться с $I_{c\text{собо}}^* < 0,15\text{--}0,2$, а ТЗНПВГ в компенсированных сетях – на присоединениях с $I_{c\text{собо}}^* < 0,05\text{--}0,1$.

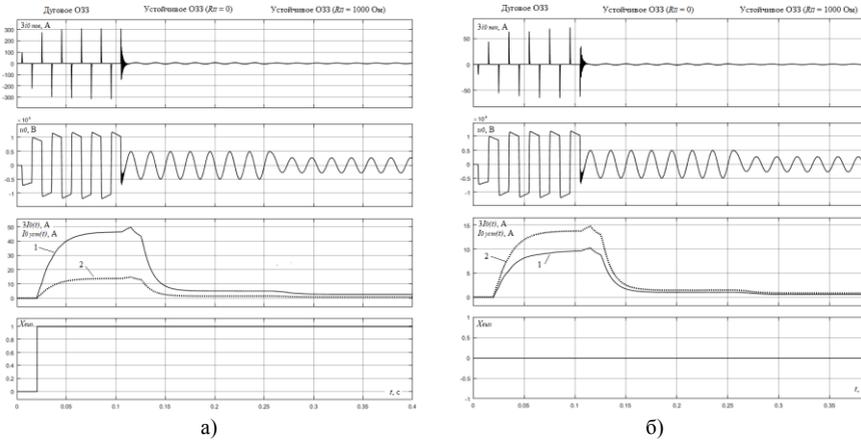


Рисунок 5 – Расчетные осциллограммы, иллюстрирующие работу универсальной мультимастотной адаптивной ТЗНП при внутреннем (а) и при внешнем (б) ОЗЗ в сети с изолированной нейтралью (переключатели SX1 и SX2 в положении «Изол»):
 1 – $3I_0(t)$; 2 – $I_{0уст}(t)$; $X_{вых}$ – сигнал на выходе схемы сравнения СМР

В главе 4 отражены результаты исследований по совершенствованию принципов выполнения адмитансных защит от замыканий на землю в кабельных сетях 6–10 кВ.

Показано, что значительное повышение динамической устойчивости адмитансных защит от ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ на основе мультимастотного принципа можно обеспечить, если в качестве воздействующей величины использовать не проводимость, а непосредственно емкость нулевой последовательности, величина которой не зависит от частоты тока $3i_0$ и напряжения $3u_0$. Из (13) и (14) для отношений текущих среднеквадратичных значений величин $3i_0(t)$ и $u'_0(t)$ для неповрежденного и поврежденного присоединений имеем:

$$C_{0\text{нет}}(t) = \frac{3I_{0\text{нет}}(t)}{U'_0(t)} = 3C_{0\text{собо}}; \quad (18)$$

$$C_{0\text{нов}}(t) = \frac{3I_{0\text{нов}}(t)}{U'_0(t)} = 3(C_{0\Sigma} - C_{0\text{собо}}). \quad (19)$$

В сетях с изолированной нейтралью соотношения (18) и (19) выполняются как для основной составляющей 50 Гц, так и для высших гармонических составляющих в диапазоне частот до ~ 2 кГц, в компенсированных сетях – только для высших гармонических составляющих $3i_0$ и $3u_0$. На основе указанных соотношений разработаны ненаправленные максимальные мультимастотные защиты от ОЗЗ, основанные на непосредственном контроле емкости нулевой последовательности защищаемого присоединения. Условия применимости указанных защит, как и мультимастотных адаптивных токовых защит от ОЗЗ, определяются соотношением (12).

Предложено универсальное решение проблемы селективной защиты от всех разновидностей ОЗЗ для компенсированных и некомпенсированных кабельных сетей 6–10 кВ, основанное на применении комплексной направленной и ненаправленной

мультичастотной защиты, основанной на контроле емкости нулевой последовательности защищаемого присоединения с использованием соотношения

$$C_0 = \frac{\int_0^{T_n} 3i_{0\text{нен}}(t) \cdot u_0'(t)}{\int_0^{T_n} u_0'(t) \cdot u_0'(t)} \quad (20)$$

При внешних ОЗЗ отношение (20) равно усредненному на интервале времени наблюдения значению $C_{0\text{нен}}$

$$C_{0\text{нен}} = \frac{\int_0^{T_n} 3i_{0\text{нен}}(t) \cdot u_0'(t)}{\int_0^{T_n} u_0'(t) \cdot u_0'(t)} \approx 3C_{0\text{собс}}, \quad (21)$$

а при внутренних замыканиях – усредненному на интервале времени наблюдения значению $C_{0\text{нов}}$

$$C_{0\text{нов}} = \frac{\int_0^{T_n} 3i_{0\text{нов}}(t) \cdot u_0'(t)}{\int_0^{T_n} u_0'(t) \cdot u_0'(t)} \approx -3(C_{0\Sigma} - C_{0\text{собс}}). \quad (22)$$

На рис. 6 приведена структурно-функциональная схема универсальной комплексной защиты от ОЗЗ для компенсированных и некомпенсированных кабельных сетей 6–10 кВ на основе соотношений (21) и (22).

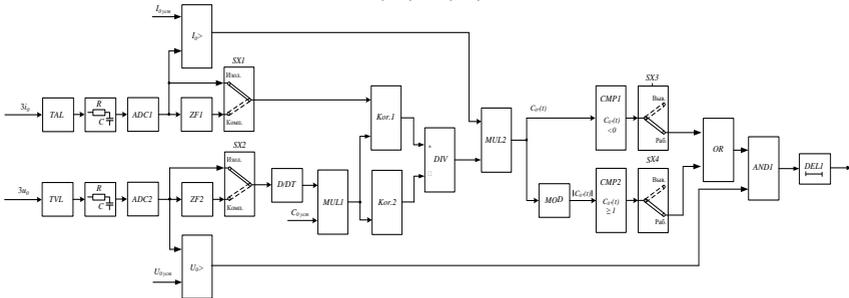


Рисунок 6 – Структурно-функциональная схема мультичастотной комплексной направленной и ненаправленной адмитансной защиты на основе контроля емкости нулевой последовательности для некомпенсированных и компенсированных кабельных сетей: *Kor1, Kor2* – корреляторы; $I_{0>}, U_{0>}$ – пусковые максимальные органы тока и напряжения нулевой последовательности; *TAL, TVL, RC, ADC, ZF, SX, D/DT, MUL, DIV, CMP, DEL* – то же самое, что и на рис. 4

Проведенные на имитационных моделях кабельных сетей 6–10 кВ с различными режимами заземления нейтрали исследования в целом подтвердили работоспособность и эффективность предлагаемого способа выполнения защиты на основе контроля емкости нулевой последовательности защищаемого присоединения (например, рис. 7).

Сравнительный анализ двух подходов к выполнению универсальной защиты от ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ с различными режимами заземления нейтрали – на основе адаптивного и адмитансного принципов – показал, что мультичастотная адмитансная защита, основанная на контроле емкости нулевой последовательности защищаемого присоединения, обеспечивает большее техническое совершенство по сравнению с мультичастотной адаптивной ТЗНП.

На основе результатов исследований для индустриального партнера ИГЭУ – по ПНИЭР RFMEFI57716X0215 НПП «ЭКРА» – разработано техническое задание на экспериментальный образец комплексной защиты от ОЗЗ на базе терминала

МиР (рис. 8), реализующей функции универсальной мультимастотной адмитансной и адаптивной токовой защит.

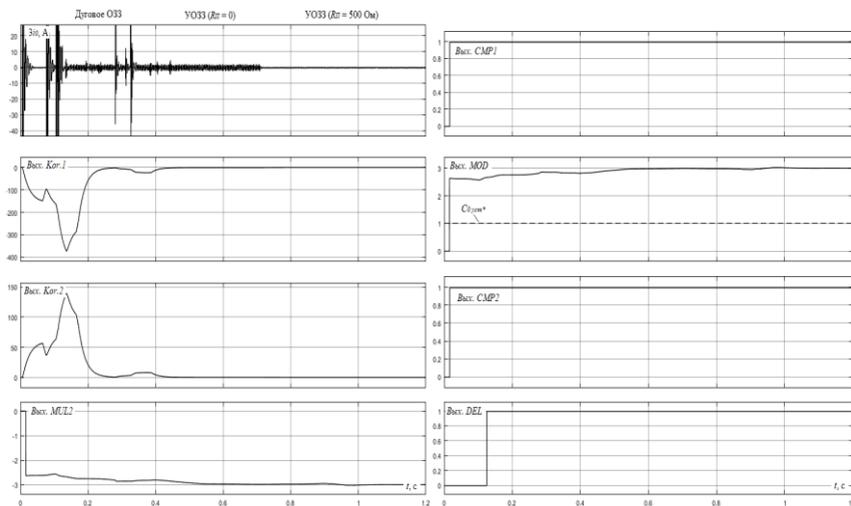


Рисунок 7 – Осциллограммы работы мультимастотной комплексной адмитансной защиты при внутреннем ОЗЗ в компенсированной кабельной сети 6 кВ с $I_{c.2} = 30$ А (SX1 и SX2 в положении «Комп»), работающей с недокомпенсацией 20%



Рисунок 8 – Внешний вид экспериментального образца комплексной защиты от ОЗЗ на базе микропроцессорного терминала РЗА типа МиР

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1 Разработаны способы повышения точности моделирования переходных процессов при ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ при исследованиях динамических режимов функционирования защит от данного вида повреждений, включающие модификацию аналитического решения уравнений переходных процессов при замыканиях на землю на основе двухчастотной схемы замещения, методику эквивалентирования имитационных моделей кабельных сетей 6–10 кВ без существенной потери точности расчетов мгновенных и среднеквадратичных значений переходных токов и напряжений, методику приближенного учета зависимости индуктивностей трехжильных кабелей от частоты токов переходного процесса. Достоверность предложенных способов повышения точности расчетов переходных процессов при ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ с использованием аналитических и имитационных математических моделей проверена сравнением с теоретическими и экспериментальными результатами, полученными другими авторами.

2 На основе сравнительного анализа с использованием сформулированных критериев для оценки общей эффективности защит от ОЗЗ кабельных сетей 6–10 кВ показано, что известные способы выполнения адаптивных токовых защит от ОЗЗ обеспечивают адаптивность только к влиянию на чувствительность больших переходных сопротивлений в месте повреждения, но не позволяют обеспечить высокую динамическую устойчивость функционирования в переходных режимах при дуговых ОЗЗ и могут применяться только в сетях с изолированной нейтралью или с высокоомным заземлением нейтрали.

3 Предложен способ модификации адаптивной токовой защиты от ОЗЗ в кабельных сетях с изолированной нейтралью и с высокоомным заземлением нейтрали, основанный на использовании соотношений мгновенных значений для составляющих основной частоты тока и производной напряжения нулевой последовательности и позволяющий обеспечить не только высокую чувствительность к повреждениям через большое переходное сопротивление, но и значительное повышение динамической устойчивости функционирования при замыканиях через перемежающуюся дугу.

4 Разработаны принципы выполнения мультичастотной адаптивной токовой защиты нулевой последовательности от ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ с изолированной нейтралью и с высокоомным заземлением нейтрали, основанной на использовании составляющей основной частоты и высокочастотных составляющих тока и производной напряжения нулевой последовательности в диапазоне частот до ~2 кГц, обеспечивающие адаптацию защиты как к влиянию переходного сопротивления в месте повреждения, так и к влиянию переходных процессов при дуговых перемежающихся замыканиях.

5 Разработаны принципы выполнения мультичастотной адаптивной токовой защиты от ОЗЗ в компенсированных кабельных сетях 6–10 кВ, основанные на использовании соотношений мгновенных значений высокочастотных составляющих тока и производной напряжения нулевой последовательности в диапазоне частот до ~2 кГц, обеспечивающие высокую устойчивость функционирования при дуговых перемежающихся ОЗЗ, возможных при больших расстройках компенсации.

6 На основе технических решений по пп. 4 и 5 разработана функционально-структурная схема универсальной мультичастотной адаптивной токовой защиты от ОЗЗ в компенсированных и некомпенсированных кабельных сетях 6–10 кВ для выполнения на ее основе макетного и экспериментального образцов защиты и проведения их испытаний на НПП «ЭКРА». Результаты исследований макета защиты на имитационных моделях кабельных сетей 6–10 кВ с различными режимами заземления нейтрали подтвердили эффективность ее функционирования при всех разновидностях замыканий и режимах заземления нейтрали защищаемой сети.

7 Разработаны принципы выполнения ненаправленной мультичастотной адмитансной защиты от ОЗЗ в компенсированных и некомпенсированных кабельных сетях 6–10 кВ, основанной на непосредственном контроле величины емкости нулевой последовательности защищаемого присоединения, обеспечивающие высокую динамическую устойчивость функционирования при замыканиях через перемежающуюся дугу.

8 Разработаны принципы выполнения мультичастотной направленной и ненаправленной адмитансной защиты от ОЗЗ, основанной на контроле знака (направленная защита) и величины (ненаправленная защита) емкости нулевой последовательности защищаемого присоединения, в компенсированных и некомпенсированных кабельных сетях 6–10 кВ.

9 На основе технических решений по п. 8 разработана структурно-функциональная схема универсальной мультичастотной адмитансной защиты от ОЗЗ в компенсированных и некомпенсированных кабельных сетях 6–10 кВ для выполнения на ее основе макетного и экспериментального образцов защиты и проведения их испытаний на НПП «ЭКРА». Результаты исследований макета защиты на имитационных моделях кабельных сетей 6–10 кВ с различными режимами заземления нейтрали подтвердили эффективность ее функционирования.

10 Разработано техническое задание для выполнения НПП «ЭКРА» на базе микропроцессорного терминала МиР экспериментального образца комплексной защиты от ОЗЗ, включающей, кроме традиционных функций защиты от ОЗЗ, также функ-

ции универсальной мультитемной адаптивной токовой защиты и универсальной мультитемной адмитансной защиты от замыканий на землю.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

По перечню рецензируемых изданий ВАК

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

2 Шуин, В.А. Информационные параметры электрических величин переходного процесса для определения места замыкания на землю в распределительных кабельных сетях напряжением 6 – 10 кВ / В.А. Шуин, Г.А. Филатова, **Е.А. Воробьева**, Д.И. Ганджаев // Вестник ИГЭУ – 2017 – Вып.2 – С34–42.

3 Шуин, В.А. Принципы выполнения адаптивной токовой защиты от замыканий на землю в некомпенсированных кабельных сетях напряжением 6–10 кВ / В.А. Шуин, **Е.А. Воробьева**, О.А. Добрягина, Т.Ю. Шадрикова // Вестник ИГЭУ – 2018. – Вып. 3. – С. 29 – 37.

4 Шуин, В.А. Способ повышения эффективности функционирования адмитансной защиты от замыканий на землю в кабельных сетях 6–10 кВ с изолированной нейтралью / В.А. Шуин, **Е.А. Воробьева**, О.А. Добрягина, Т.Ю. Шадрикова // Вестник ИГЭУ – 2018. – Вып. 4. – С. 20 – 30.

Основные публикации в других изданиях

5 **Мурзина (Воробьева), Е.А.** Условия возникновения максимальных перенапряжений при дуговых однофазных замыканиях на землю в сетях 6-10 кВ с изолированной нейтралью / Е.А. Мурзина, В.А. Шуин // Электроэнергетика. Материалы региональной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Энергия – 2011». – Иваново. – Т. 3, с. 68 – 74.

6 Шуин, В.А. Максимальные перенапряжения при дуговых перемежающихся замыканиях на землю в кабельных сетях 6-10 кВ / В.А. Шуин, **Е.А. Мурзина (Воробьева)** // Сборник научных трудов Международной научно-технической конференции «Состояния и перспективы развития электроэнергетики» (XVI Бенардосовские чтения). – Иваново, 2011. – Т. 1, с. 150 – 153.

7 **Мурзина (Воробьева), Е.А.** Исследования перенапряжений при дуговых замыканиях на землю на математической модели сети 6-10 кВ / Е.А. Мурзина, В.А. Шуин // Радиозлектроника, электротехника и энергетика. Восемнадцатая международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов. Тезисы докладов. – М.: 2012. – Т. 4, с. 467.

8 **Мурзина (Воробьева), Е.А.** Расчет переходного процесса при однофазном замыкании на землю в сетях 6-10 кВ. / Е.А. Мурзина, В.А. Шуин, О.А. Добрягина // Электроэнергетика России: современное состояние, проблемы и перспективы: сб. науч. тр. / под ред. Д.Р. Любарского, В.А. Шуина. / ОАО «Институт “Энергосетьпрот”». – Иваново: ПресСтО, 2012. – с. 394 – 401.

9 **Мурзина (Воробьева), Е.А.** Расчет перенапряжений при замыканиях на землю в сетях 6-10 кВ с изолированной нейтралью / Е.А. Мурзина, В.А. Шуин // Электроэнергетика. «Энергия – 2012» региональная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых (с международным участием). – Иваново, 2012. – Т. 3, с. 107 – 116.

10 **Мурзина (Воробьева), Е.А.** Оценка перенапряжений при замыканиях на землю в кабельных сетях 6-10 кВ с изолированной нейтралью / Е.А. Мурзина, В.А. Шуин // ОАО «СО ЕЭС» Электроэнергетика глазами молодежи. Научные труды III международной научно-технической конференции. – Екатеринбург, 2012. – Т. 2, с. 244 – 249.

11 **Мурзина (Воробьева), Е.А.** О выборе схемы замещения для расчета переходных процессов при замыканиях на землю в сетях 6-10 кВ / Е.А. Мурзина, В.А. Шуин // Радиозлектроника, электротехника и энергетика. Девятнадцатая международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов. Тезисы докладов. – М.: 2013. – Т. 4, с. 281.

12 **Мурзина (Воробьева), Е.А.** Математическая модель сети 6-10 кВ для расчета переходных процессов при замыканиях на землю / Е.А. Мурзина, В.А. Шуин // Тезисы докладов II международной научно-практической конференции и выставке «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем России», РЕЛАВЭКСПО-2013. – Чувашская республика, г. Чебоксары, 2013. – с. 114 – 115.

13 **Мурзина (Воробьева), Е.А.** Сравнительный анализ аналитических решений уравнений переходного процесса при замыканиях на землю в сетях 6-10 кВ / Е.А. Мурзина, В.А. Шуин // Электроэнергетика. «Энергия – 2013». Восьмая региональная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых. – Иваново, 2011. – с. 139 – 144.

14 **Мурзина (Воробьева), Е.А.** Особенности применения двухчастотной схемы замещения для расчета переходных процессов при замыканиях на землю в кабельных сетях 6-10 кВ / Е.А. Мурзина // Материалы Международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электротехнологий» (XVII Бенардосовские чтения). – Иваново, 2013. – Т. 1, с. 179 – 182.

15 Добрягина, О.А. О выборе схемы замещения для расчета переходных процессов при замыканиях на землю в сетях 6-10 кВ / О.А. Добрягина, **Е.А. Мурзина (Воробьева)**, В.А. Шуин //4-я Международная научно-техническая конференция «Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем». Аннотации докладов. – Екатеринбург, 2013 г.

16 **Мурзина (Воробьева), Е.А.** Методы аналитического расчета переходных процессов при замыканиях на землю / Е.А. Мурзина // Научные труды IV международной научно-технической конференции «Электроэнергетика глазами молодежи». – Новочеркасск, 2013. – Т.2, с. 137 – 140.

17 **Воробьева, Е.А.** Обоснование схем замещения для расчета переходных процессов при замыканиях на землю в сетях 6 – 10 кВ / Е.А. Воробьева, В.А. Шуин // Электроэнергетика. Девятая международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия – 2014»: материалы конференции. – Иваново, 2014. – Т. 3, Ч. 1. С. 203 – 207.

18 **Воробьева, Е.А.** Определение частотных характеристик индуктивностей трехжильных кабелей 6 – 10 кВ / Е.А. Воробьева, Г.А. Филатова // Электроэнергетика глазами молодежи. Научные труды V Международной молодежной научно-технической конференции, 10 – 14 ноября 2014 г.: материалы конференции.— Томск: ТПУ.— 2014.— Т.1. – С.558 – 563.

19 **Воробьева, Е.А.** Анализ достоверности эквивалентных моделей кабельных сетей 6 – 10 кВ для расчета переходных процессов при однофазных замыканиях на землю / Е.А. Воробьева, В.А. Шуин // Материалы международной научно-технической конференции «Состояния и перспективы развития электро- и теплотехнологии» (XVIII Бенардосовские чтения) / ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2015. – Т. III. – С. 456 – 460.

20 **Воробьева, Е.А.** Эквивалентирование схем замещения кабельных сетей 6 – 10 кВ для расчета переходных процессов при замыканиях на землю / Е.А. Воробьева, В.А. Шуин // Десятая международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия – 2015»: материалы конференции.– Иваново: ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», 2015. – Т. 3, С. 112 – 114.

21 **Воробьева, Е.А.** Оценка точности эквивалентных моделей кабельных сетей 6–10 кВ для расчета переходных процессов при однофазных замыканиях на землю/ Е.А. Воробьева, В.А. Шуин // Электроэнергетика глазами молодежи. Труды VI Международной молодежной научно-технической конференции: материалы конференции.— Иваново: ИГЭУ, 2015. – Т.2, С.63 – 66.

22 **Воробьева, Е.А.** Аналитическое решение уравнений переходного процесса при однофазных замыканиях на землю в α , β , 0-составляющих / Е.А. Воробьева, О.А. Добрягина, В.А. Шуин // Одиннадцатая международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия –2016 »: материалы конференции. – Иваново: ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», 2016. – Т. 3, С. 160 – 162.

23 **Воробьева, Е.А.** Способ повышения динамической устойчивости функционирования адмитансных защит от замыканий на землю в кабельных сетях 6–10 кВ / Е.А. Воробьева, В.А. Шуин, Т.Ю. Шадрикова // Тринадцатая международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2018» материалы конференции. – Иваново: ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», 2018. – Т. 3, С. 73 – 74.

Личный вклад автора в работах, опубликованных в соавторстве:

[1-2,4-21,23] – 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; [3, 22] – анализ известных исполнений устройств защиты.

ВОРОБЬЕВА Екатерина Андреевна

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРИНЦИПОВ ВЫПОЛНЕНИЯ АДАПТИВНЫХ ТОКОВЫХ И АДМИТАНСНЫХ ЗАЩИТ ОТ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ В КАБЕЛЬНЫХ СЕТЯХ 6–10 кВ

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Подписано в печать **18.12.2018**. Формат 60×80^{1/16}.

Печать плоская. Усл. печ. л. 1,16. Тираж 100 экз. Заказ № 18

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

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

Отпечатано в УИУНЛ ИГЭУ