

*На правах рукописи*



ОНИСОВА Ольга Александровна

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ  
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ С МАЛЫМИ  
РАСПРЕДЕЛЁННЫМИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ СТАНЦИЯМИ**

Специальность 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Иваново 2016

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

Научный руководитель: кандидат технических наук, старший научный сотрудник  
**Нудельман Года Семёнович**

Официальные оппоненты: **Фишов Александр Георгиевич**, доктор технических наук, ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет», заведующий кафедрой автоматизированных электроэнергетических систем (АЭЭС)

**Лебедев Владимир Дмитриевич**, кандидат технических наук, ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», заведующий кафедрой автоматического управления электроэнергетическими системами (АУЭС)

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

Защита состоится 17 июня 2016 г. в 14<sup>00</sup> на заседании диссертационного совета Д 212.064.01 при Ивановском государственном энергетическом университете по адресу: 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, корпус Б, ауд. 237.

Отзывы на автореферат (в двух экземплярах, заверенные печатью организации) просим направлять по адресу: 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, Учёный 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 размещён: [http://ispu.ru/files/Dissertaciya\\_Onisovoy\\_O.A..pdf](http://ispu.ru/files/Dissertaciya_Onisovoy_O.A..pdf)

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

Автореферат разослан \_\_\_\_\_ г.

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

Бушуев Евгений Николаевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы работы.** В последние годы в энергосистеме России всё активнее используются электростанции малой мощности (ЭСММ), подключаемые на уровне распределительных сетей вблизи местной нагрузки, – малые распределённые электрические станции. Наблюдается тенденция к дальнейшему увеличению их количества в составе генерирующих мощностей энергосистемы.

Появление электростанций в распределительной сети приводит к изменению характеристик энергосистемы, на основе которых сложилась общепринятая концепция построения релейной защиты (РЗ): на уровне распределительной сети становится возможным многостороннее питание места повреждения, появляются новые, ранее нехарактерные виды возмущений и аварий, изменяются характеристики электромагнитных и электромеханических переходных процессов. В связи с этим возникает необходимость решения комплекса научно-исследовательских задач, направленных на обеспечение эффективности функционирования РЗ распределительной сети в новых условиях.

Решению проблем, сопутствующих созданию в энергосистемах малых распределённых электростанций, посвящены работы ряда отечественных авторов. Исследованию системных вопросов – работы Н.И. Воропая, П.М. Ерохина, Ю.Н. Кучерова, А.Г. Фишова. Технические аспекты внедрения ЭСММ, вопросы создания противоаварийной автоматики распределительной сети рассматривались в диссертационной работе и публикациях П.В. Илюшина. Опыт построения РЗ при подключении к сети ЭСММ нашёл отражение в работах А.В. Беляева, М.А. Шабада. Проблемы подключения ЭСММ (особенно на базе возобновляемых источников энергии) получили широкое обсуждение за рубежом (Н.-Ж. Hermann, J. Cardenas и др.). Тем не менее, на данный момент времени проработка вопросов построения РЗ распределительных сетей в условиях внедрения в них ЭСММ является недостаточной: отсутствуют теоретическая база и комплексные решения в части РЗ, требующиеся как при подключении ЭСММ к сети, так и на этапе планирования дальнейшего развития малой распределённой энергетики в России.

Автор выражает признательность доктору технических наук, профессору А.В. Булычеву, оказавшему во время работы в ГОУ ВПО «ВоГТУ» и ОАО «ВНИИР» поддержку, влияние на выбор направления научной деятельности.

Автор благодарен канд. техн. наук Н.А. Дони, канд. техн. наук А.В. Жукову, канд. техн. наук П.В. Илюшину, докт. техн. наук Ю.Н. Кучерову за ценные предложения по существу работы.

**Целью работы** является совершенствование системы релейной защиты, направленное на обеспечение эффективности её функционирования в условиях подключения к сети малых распределённых электростанций.

**Основные задачи, решаемые в работе.** Для достижения цели работы поставлены и решены следующие основные задачи:

1. Анализ проблемы построения РЗ распределительных электрических сетей с малыми распределёнными электростанциями.
2. Оценка эффективности функционирования существующей РЗ электрической сети, прилегающей к точке присоединения ЭСММ.
3. Разработка способов повышения технического совершенства РЗ электрической сети, прилегающей к точке присоединения ЭСММ.
4. Разработка принципов построения релейной защиты и автоматики (РЗА), устанавливаемой в точке присоединения ЭСММ.
5. Совершенствование принципов построения делительной автоматики, устанавливаемой в точке присоединения ЭСММ.

**Объект и предмет исследований.** Объектом исследования являются электрические распределительные сети с электростанциями малой мощности (газотурбинные установки, газопоршневые электростанции, дизельные электростанции на базе синхронных генераторов мощностью до 30 МВт, подключаемые к сети «напрямую»). Предмет исследований – система релейной защиты электрических распределительных сетей с электростанциями малой мощности.

**Основные методы исследований.** Для решения поставленных задач применялись методы системного анализа, теоретической электротехники, теоретических основ релейной защиты, математического моделирования электромагнитных и электромеханических переходных процессов. При выполнении работы использовались лицензионные программные и программно-аппаратные средства: программно-вычислительный комплекс расчёта электромагнитных и электромеханических переходных процессов PSCAD (Manitoba HVDC Research Centre, Канада), цифровые моделирующие комплексы реального времени RTDS (RTDS Technologies Inc., Канада) и eMEGAsim (OPAL-RT Technologies Inc., Канада).

**Научная новизна работы:**

1. Результаты анализа проблем построения и эффективности функционирования РЗ электрической сети, прилежащей к точке присоединения ЭСММ.
2. Требования к быстродействию РЗ, определяемые условиями устойчивости генераторов ЭСММ.
3. Способ продольной дифференциальной токовой защиты линии электропередачи, основанный на использовании комплекта защиты, устанавливаемого с одного конца линии, и контролирующего тока своего и удалённого концов.
4. Принцип выполнения дистанционной защиты линии электропередачи с двухсторонним питанием, предусматривающий адаптивное изменение параметров срабатывания на основе удалённых измерений параметров доаварийного режима в узлах присоединения ЭСММ.
5. Подходы к управлению малыми распределёнными электростанциями в аварийных режимах, направленные на оптимизацию требований к РЗ распределительных сетей с ЭСММ; принципы построения комплекса РЗА в точке присоединения ЭСММ.
6. Принцип построения и алгоритм функционирования делительной автоматики, основанный на контроле взаимных соотношений напряжения, значения и направления реактивной мощности в точке присоединения ЭСММ.

**Достоверность результатов** обеспечивается корректным использованием математического аппарата, качественным соответствием аналитических рассуждений и полученных путем моделирования результатов, применением апробированных ведущими научно-исследовательскими организациями и энергокомпаниями мира моделирующих комплексов (PSCAD, RTDS, eMEGAsim), а также обсуждением основных результатов с отечественными и зарубежными специалистами в рамках конференций и дискуссий по опубликованным статьям.

**Соответствие паспорту специальности.** *Соответствие диссертации формуле специальности:* в соответствии с формулой специальности 05.14.02 – «Электрические станции и электроэнергетические системы» в диссертационной работе целью исследования является совершенствование теоретической и технической базы одной из областей электроэнергетики с целью обеспечения надежного производства, транспортировки и снабжения потребителей электрической энергией.

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

– к п. 6 «Разработка методов математического и физического моделирования в электроэнергетике» относятся разработанные автором на базе специализированных программных и программно-аппаратных комплексов модели электрических сетей с малыми распределёнными электрическими станциями; результаты исследований электрических режимов таких сетей, выполненных с использованием разработанных моделей.

– к п. 9 «Разработка методов анализа и синтеза систем автоматического регулирования, противоаварийной автоматики и релейной защиты в электроэнергетике» относятся результаты анализа проблем построения и эффективности функционирования РЗ электрической сети, прилежащей к точке присоединения ЭСММ; требования к быстродействию РЗ распределительных сетей; способ продольной дифференциальной токовой защиты линии электропередачи; принцип выполнения дистанционной защиты линии электропередачи; рекомендации по выполнению органа направления мощности, используемого в составе направленной максимальной токовой защиты; принципы по-

строения комплекса РЗА в точке присоединения ЭСММ; рекомендации по составу функций защит распределительных сетей с ЭСММ; принцип построения делительной автоматики по напряжению.

**Практическую значимость** представляют следующие основные результаты работы:

1. Требования к РЗ распределительных сетей с ЭСММ и рекомендации по составу функций защит, базирующиеся на предложенных подходах к управлению малыми распределёнными электростанциями в аварийных режимах, позволяющие разрабатывать технические решения по построению РЗ электрических сетей при подключении к ним ЭСММ.

2. Рекомендации по выбору расчётных схемно-режимных условий при проектировании токовых защит электрических сетей с ЭСММ от междуфазных коротких замыканий.

3. Рекомендации по выполнению органа направления мощности в составе направленной максимальной токовой защиты, позволяющие обеспечить её селективность в распределительных сетях с ЭСММ.

4. Структурные схемы продольной дифференциальной и дистанционной защит, основанных на использовании удалённых измерений параметров режима, предназначенные для совершенствования функций микропроцессорных устройств защиты.

5. Структурная схема и алгоритм делительной автоматики по напряжению, предназначенной для использования в точке присоединения ЭСММ, и позволяющей избежать излишних отключений станций при аварийных снижениях напряжения во внешней сети.

**Внедрение результатов работы.** Результаты выполненных исследований и разработок использованы в работе подкомитета С6 Российского национального комитета (РНК) СИГРЭ «Системы распределения энергии и распределённая генерация» при разработке концептуальных вопросов создания систем РЗА объектов малой генерации; в деятельности рабочей группы В5.43 «Coordination of Protection and Automation for Future Networks» Международного совета по большим энергосистемам CIGRE (в составе отчёта № 629 со ссылкой на материалы одной из работ автора); в научно-исследовательских и опытно-конструкторских работах, выполненных в ОАО «ВНИИР»: «Технологическое присоединение Энергоблока «Первой очереди Комплекса по подготовке и переработке нефти и газа производительностью 1 млн. тонн сырой нефти в год» (Площадка 1) к электрическим сетям ОАО «МРСК Северо-Запада «Комиэнерго» (по заказу ООО «Енисей»», «Расчет режимов работы сетей 6-35 кВ для нужд ОАО «МОЭСК» (по заказу ОАО «МОЭСК»», «Технологическое присоединение ГТЭС «Городецкая» ООО «Росмикс» к электрическим сетям ОАО «МОЭСК» (по заказу ООО «ЦентрИнжЭнергоПроект»).

Научные результаты и положения диссертационной работы используются в учебном процессе в Чувашском государственном университете имени И.Н. Ульянова при подготовке магистров (направление 13.04.02 – Электроэнергетика и электротехника, программа «Автоматика энергосистем») и бакалавров (направление 13.03.02 – Электроэнергетика и электротехника, профиль «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем») в лекционных курсах, на лабораторных занятиях, а также при научном руководстве работой студентов.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Результаты анализа эффективности функционирования РЗ электрической сети, прилегающей к точке присоединения ЭСММ.

2. Рекомендации по выполнению органа направления мощности в составе направленной максимальной токовой защиты распределительной сети с ЭСММ.

3. Принципы построения и структурные схемы продольной дифференциальной и дистанционной защит, использующих удалённые измерения параметров режима.

4. Подходы к управлению малыми распределёнными электростанциями в аварийных режимах, принципы построения комплекса РЗА в точке присоединения ЭСММ.

5. Требования к РЗ распределительных сетей с ЭСММ и рекомендации по составу функций защит.

6. Принцип построения и алгоритм функционирования делительной автоматики по напряжению.

**Апробация результатов исследований.** Основные научные положения и результаты доклады-вались и обсуждались на международных и всероссийских конференциях: Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем, 3-я Международная научно-техническая конференция (Санкт-Петербург, 2011 г.); Релейная защита и автоматика энергосистем – 2012, XXI конференция (Москва, 2012 г.); РЕЛАВЭКСПО-2013 – релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем России, II Международная научно-практическая конференция и выставка (Чебоксары, 2013 г.); Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем, 4-я Международная научно-техническая конференция (Екатеринбург, 2013 г.); Релейная защита и автоматика энергосистем – 2014, XXII Международная конференция (Москва, 2014 г.); РЕЛАВЭКСПО-2015: релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем России, III Международная научно-практическая конференция и выставка (Санкт-Петербург, 2015 г.); Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем, 5-я Международная научно-техническая конференция (Сочи, 2015 г.); Электроэнергетика глазами молодежи – 2015, VI Международная научно-техническая конференция (Иваново, 2015 г.).

**Публикации.** Содержание диссертационной работы нашло отражение в 20 научных работах, в числе которых 5 статей в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК РФ; 2 статьи в изданиях, индексируемых в SCOPUS; 1 патент на изобретение.

**Структура и объём диссертации.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 156 наименования, четырёх приложений. Общий объем работы составляет 186 страниц, в том числе 131 страница основного текста, 68 рисунков, 14 таблиц.

**Личный вклад автора в опубликованных работах:**

[1, 2, 7, 8, 11] – выполнены автором единолично; [3, 9, 13, 16, 17, 18] – разработка и проверка основных теоретических положений; [4, 5, 6, 14, 19] – участие в разработке теоретических положений, создание динамических моделей энергосистем; [10, 12, 15] – участие в разработке основных теоретических положений, разработка моделей и исследование режимов энергосистем; [20] – участие в создании изобретения.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цели и задачи исследования, отражена научная новизна и практическая ценность полученных результатов, приведена общая характеристика и структура диссертации.

**В первой главе** дана характеристика электроэнергетической системы с ЭСММ; выполнен анализ: применяемых в распределительных сетях типов защит и влияния на их работу ЭСММ, существующего отечественного и зарубежного опыта решения задач РЗ при подключении к электрической сети ЭСММ; поставлена задача диссертационного исследования; с целью исследования характеристик электрических режимов разработаны цифровые математические модели распределительных сетей с ЭСММ.

Малые распределённые электрические станции представляют собой электростанции мощностью единицы-десятки мегаватт, подключенные на уровне распределительной сети 6...110 кВ (в ряде случаев – 220 кВ) в непосредственной близости от потребителей. При внедрении ЭСММ электрические режимы распределительной сети усложняются: сетевые элементы начинают работать в условиях многостороннего питания, появляется возможность возникновения качаний и асинхронных режимов, несинхронных включений, режимов аварийного отделения фрагментов сети с малыми электростанциями от энергосистемы. Это усложняет условия функционирования РЗ.

Для решения задач диссертационного исследования электрическую сеть, прилежащую к точке присоединения ЭСММ (группы электростанций – эквивалентной ЭСММ), целесообразно условно разделить на внешнюю – «вышестоящую» и внутреннюю – «нижестоящую» (рисунок 1).

В главе дана оценочная характеристика влияния подключаемых ЭСММ на эффективность функционирования защит прилежащей электрической сети. Подключение ЭСММ оказывает наибольшее влияние на условия функционирования защит вышестоящей сети: вследствие промежуточ-

ной подпитки от ЭСММ снижается эффективность резервных ступеней защит, становится необходимым рассмотрение вопросов об изменении параметров срабатывания защит, введении направленности их действия. Показано, что требования к РЗ распределительной сети начинают определяться также условиями устойчивости генераторов ЭСММ.

Комплексное рассмотрение проблемы построения РЗ распределительной сети при подключении к ней ЭСММ требует решения двух основных групп задач: обеспечение в новых условиях требуемого технического совершенства РЗ электрических сетей, прилежащих к точке присоединения ЭСММ, и создание комплекса РЗА в узле присоединения ЭСММ (см. рисунок 1).

Заданы ограничения области диссертационного исследования. С учётом особенностей развития малой энергетики в России в работе рассматриваются газотурбинные установки (ГТУ), газопоршневые электростанции (ГПЭС) и дизельные электростанции (ДЭС) на базе синхронных генераторов мощностью до 30 МВт, подключаемых к сети «напрямую» (через линии 6...10 кВ, через разделительные трансформаторы, к шинам низшего напряжения трансформаторов распределительной сети). В качестве базовых приняты конфигурации электрической сети, включающие одну и несколько ЭСММ, работающих в параллель с эквивалентным источником внешней сети (рисунок 2). Такие конфигурации соответствуют наиболее распространенным схемам распределительных сетей (разомкнутые, изначально с односторонним питанием) и отражают основные закономерности изменения условий функционирования релейной защиты при подключении ЭСММ. Заданы количественные параметры элементов рассматриваемых базовых конфигураций электрических сетей.

Введён коэффициент ( $k$ ), отражающий соотношение сопротивлений ЭСММ и эквивалентного источника внешней сети ЭС, рассчитанных (эквивалентированных) относительно точки присоединения ЭСММ. Отмечено, что наибольший практический интерес представляет рассмотрение двух характерных граничных ситуаций:

- электростанция, работающая в мощной сети ( $k \geq 25$ ; ситуация характерна для электростанций, связанных с источниками энергосистемы линиями 110 кВ при величинах токов короткого замыкания в сети 15...20 кА);
- электростанция, работающая в «слабой» сети ( $k = 0,5...1$ ; характерный пример: электростанция мощностью 20 МВт, связанная с сетью 35 кВ; уровень токов короткого замыкания в сети – 2...3 кА).

Модели распределительных сетей, приведённых на рисунке 2, реализованы на базе специализированных моделирующих комплексов: программного комплекса PSCAD, предназначенного для исследования электромагнитных и электромеханических переходных процессов в электроэнергетических системах; программно-аппаратного цифрового моделирующего комплекса RTDS, позволяющего осуществлять расчёт переходных процессов в масштабе реального времени и обеспечивающего возможность интеграции физических образцов устройств релейной защиты и автоматики с моделируемой энергосистемой.

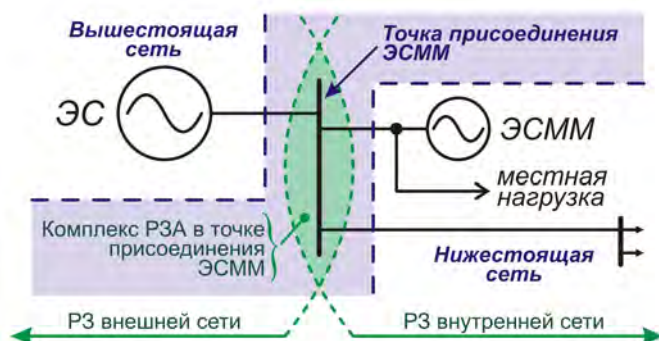


Рисунок 1 – Условное разделение электрической сети, прилежащей к точке присоединения ЭСММ

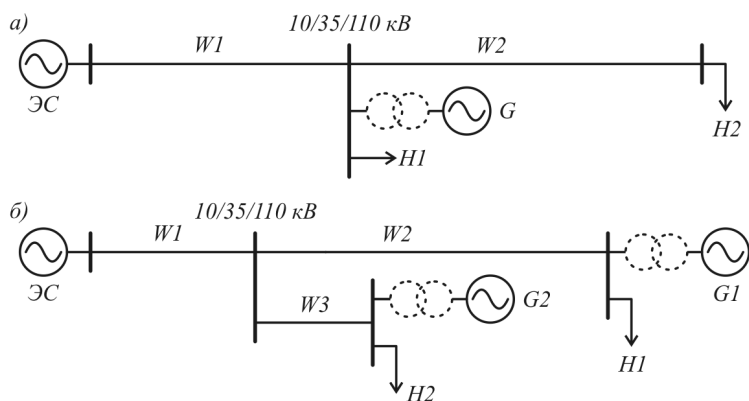


Рисунок 2 – Обобщенные конфигурации электрических сетей с ЭСММ: ЭС – эквивалентный источник внешней сети; G, G1, G2 – генераторы ЭСММ; H1, H2 – обобщенные комплексные нагрузки; W1, W2, W3 – линии электропередачи

Во второй главе проведены исследования эффективности функционирования РЗ электрической сети, прилежащей к точке присоединения ЭСММ. Рассматривались наиболее часто применяемые в распределительной сети защиты с относительной селективностью (максимальная токовая и дистанционная).

Выполнена оценка снижения чувствительности максимальной токовой защиты (МТЗ) вышестоящей сети при подключении ЭСММ. Однофазная схема замещения электрической сети с двухсторонним питанием (см. рисунок 2, а) для режимов коротких замыканий в конце линии W2 приведена на рисунке 3, а. На схеме приняты следующие обозначения:  $\underline{E}_{\text{ЭС}}$ ,  $\underline{Z}_{\text{ЭС}}$  – э.д.с. и сопротивление эквивалентного источника внешней сети ЭС;  $\underline{E}_G$ ,  $\underline{Z}_G$  – э.д.с. и сопротивление эквивалентного генератора малой электростанции G;  $\underline{Z}_{W1}$  и  $\underline{Z}_{W2}$  – сопротивления линий W1 и W2 соответственно;  $R_F$  – активное переходное сопротивление в месте повреждения. Для приведённой схемы замещения получено аналитическое выражение для замера токовой защиты, установленной со стороны ЭС:

$$\underline{I}_{\text{ЭС}} = E \frac{\underline{Z}_F (1 - k_e e^{j\delta}) + k\underline{Z}}{k\underline{Z}^2 + \underline{Z}\underline{Z}_F + k\underline{Z}\underline{Z}_F}, \quad (1)$$

где  $E = E_{\text{ЭС}}$ ,  $k_e = \frac{E_G}{E_{\text{ЭС}}}$ ,  $\underline{Z}_G = k\underline{Z}$ ,

$\underline{Z} = \underline{Z}_{\text{ЭС}} + \underline{Z}_{W1}$ ,  $\underline{Z}_F = \underline{Z}_{W2} + R_F$ ,  $\delta$  – угол между векторами э.д.с. эквивалентных источников ЭСММ и внешней сети.

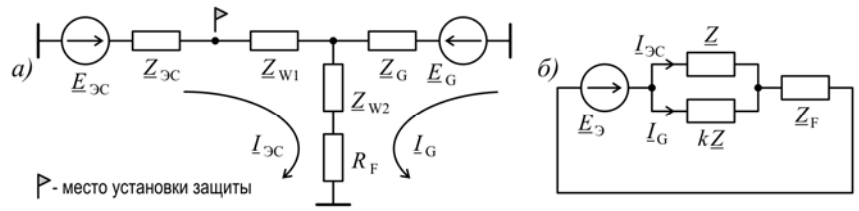


Рисунок 3 – Схемы замещения: а) однофазная электрической сети с двухсторонним питанием, б) эквивалентная

Снижение чувствительности (уменьшение коэффициента чувствительности) МТЗ вышестоящей сети в режиме резервного действия определяется снижением тока короткого замыкания от источника внешней сети при подключении ЭСММ (если ток срабатывания защиты при этом не изменялся):

$$K_I = \frac{\text{mod}(\underline{I}'_{\text{ЭС}})}{\text{mod}(\underline{I}_{\text{ЭС}})} = \text{mod} \left( \frac{k\underline{Z}^2 + \underline{Z}\underline{Z}_F + k\underline{Z}\underline{Z}_F}{(\underline{Z} + \underline{Z}_F)(\underline{Z}_F (1 - k_e e^{j\delta}) + k\underline{Z})} \right), \quad (2)$$

где  $\underline{I}'_{\text{ЭС}}$  – ток в месте установки защиты при отсутствии ЭСММ.

Если принять  $\underline{E}_{\text{ЭС}} = \underline{E}_G = \underline{E}_\Sigma$ , схему, представленную на рисунке 3, а, можно свести к эквивалентной схеме замещения (рисунок 3, б), наглядно отражающей распределение токов короткого замыкания в электрической сети с ЭСММ; выражение (2) при этом также может быть упрощено:

$$K_I = \text{mod} \left( 1 + \frac{\underline{Z}_F}{\underline{Z} + \underline{Z}_F} \frac{1}{k} \right). \quad (3)$$

С практической точки зрения выражение (3) удобно использовать для оценки снижения чувствительности МТЗ в зависимости от мощности эквивалентного источника внешней сети и мощности подключаемой электростанции. В главе выполнен соответствующий анализ для сетей 10, 35 и 110 кВ при характерных количественных параметрах распределительных сетей. Показано, что при подключении ЭСММ к радиальной распределительной сети со «слабым» источником ( $k = 0,5 \dots 1$ ) коэффициент чувствительности существующей МТЗ для режима резервного действия может снижаться в 1,5...1,7 раза. В условиях сильной связи электрической сети с энергосистемой (сеть с мощным источником) влияние подключенной в промежуточном узле электростанции проявляется в значительно меньшей степени: для сети 10 кВ составляющая тока от внешней сети при металлических коротких замыканиях (КЗ) может уменьшаться на 15%; для сетей более высокого класса напряжения – не более чем на 5%.

Выполнена оценка снижения чувствительности резервной ступени дистанционной защиты (ДЗ). В соответствии со схемой замещения, приведённой на рисунке 3, а, сопротивление, измеряемое ДЗ, установленной со стороны внешней сети:

$$\underline{Z}_{ЭСП} = \underline{Z}_{W1} + \frac{\underline{Z}_F k_e e^{j\delta} (\underline{Z} + \underline{Z}_{W1}) + k \underline{Z} \underline{Z}_F}{\underline{Z}_F (1 - k_e e^{j\delta}) + k \underline{Z}}. \quad (4)$$

С использованием (4) показано, что при подключении ЭСММ к сети 35 кВ со «слабым» источником «видимое» защитой сопротивление до места повреждения может увеличиваться в сравнении с фактическим значением более чем в 2 раза; в то же время ЭСММ практически не оказывают влияния на функционирование ДЗ вышестоящих сетей 110 кВ и выше.

Для сопоставления по критерию чувствительности защит с относительной селективностью предложен подход, заключающийся в определении максимальной мощности подключаемых в узлах распределительной сети электростанций, при которой защита внешней сети удовлетворяет требованиям чувствительности. Исследования проводились для сетей 10, 35, 110 кВ. В качестве примера на рисунке 4 представлено семейство кривых (при значении максимального рабочего тока в месте установки защиты  $I_{\text{МАКС}} = 500 \text{ А}$ ), условно «ограничивающих» мощность подключаемой ЭСММ. Подключение ЭСММ не приводит к недопустимому снижению чувствительности защит сетей 10, 35 кВ при мощной связи с энергосистемой (значение тока КЗ на шинах источника ЭС не ниже 9...10 кА), а также сетей 110 кВ; в распределительных сетях со «слабым» источником МТЗ может не обладать необходимой чувствительностью (при значении тока КЗ на шинах источника ЭС менее 5...6 кА допустимая по условиям чувствительности мощность подключаемой электростанции существенно ограничена). Выполненные исследования позволили обосновать целесообразность и необходимость более широкого применения в распределительной сети с ЭСММ дистанционных защит.

Выполнен анализ селективности действия дистанционных защит при подключении к электрической сети ЭСММ: рассматривалось изменение зоны действия быстродействующей (первой) ступени ДЗ внешней сети при КЗ с переходным сопротивлением на шинах противоположного конца линии. В исследуемом режиме изменение «видимого» защитой сопротивления определяется значением комплексного коэффициента токораспределения  $\underline{k}_T$ , характеризующегося отношением токов в переходном сопротивлении и в месте установки защиты:

$$\underline{k}_T = \frac{k_e e^{j\delta} \underline{Z} + k \underline{Z}}{R_F (1 - k_e e^{j\delta}) + k \underline{Z}}. \quad (5)$$

Модуль  $\underline{k}_T$  можно оценить по приведённому в работе упрощённому выражению, связывающему  $\underline{k}_T$  только с соотношением мощностей источников ЭС и ЭСММ:

$$k_T = \frac{1+k}{k}. \text{ Для сетей 10, 35 и 110 кВ со «слабым» источником}$$

максимальные значения коэффициента токораспределения составляют 3; 2,4; 1,6 соответственно (т.е., как правило, меньше, чем в сетях 110 кВ и выше с мощными централизованными электростанциями); при этом основным фактором, влияющим на искажение области замера в таких сетях являются параметры доаварийного режима, обуславливающие существенное изменение аргумента  $k_T$ . Для предотвращения неселективного действия первой ступени ДЗ возникает необходимость ограничения ширины характеристики и/или наклона её верхней границы на отрицательный угол; при этом зона действия первой ступени защиты уменьшается (в ряде случаев – значительно). Это ограничивает возможность отключения КЗ без выдержки времени на расчётных 80-85% длины линии (как правило, необходимого по условиям обеспечения устойчивости генераторов ЭСММ) и, следовательно, возможность применения ДЗ в качестве основной.

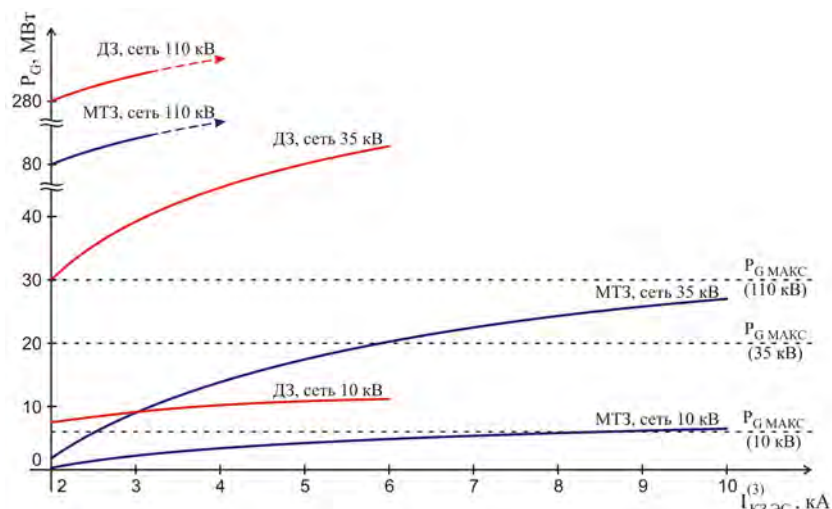


Рисунок 4 – Зависимость максимально допустимой по условию чувствительности защит мощности подключаемой к сети малой электростанции от тока короткого замыкания на шинах энергосистемы:  $P_{G \text{ МАКС}}$  – максимальное значение мощности ЭСММ, подключаемой к сети данного класса напряжения (ориентировочно)

максимальные значения коэффициента токораспределения составляют 3; 2,4; 1,6 соответственно (т.е., как правило, меньше, чем в сетях 110 кВ и выше с мощными централизованными электростанциями); при этом основным фактором, влияющим на искажение области замера в таких сетях являются параметры доаварийного режима, обуславливающие существенное изменение аргумента  $k_T$ . Для предотвращения неселективного действия первой ступени ДЗ возникает необходимость ограничения ширины характеристики и/или наклона её верхней границы на отрицательный угол; при этом зона действия первой ступени защиты уменьшается (в ряде случаев – значительно). Это ограничивает возможность отключения КЗ без выдержки времени на расчётных 80-85% длины линии (как правило, необходимого по условиям обеспечения устойчивости генераторов ЭСММ) и, следовательно, возможность применения ДЗ в качестве основной.

В сети с многосторонним питанием (с двумя и более ЭСММ; см. рисунок 2, б) на условия селективного действия дистанционных защит существенное влияние могут оказывать взаимные перетоки мощности между источниками сети в доаварийном режиме. В качестве примера на рисунке 5 на комплексной плоскости представлены области замеров дистанционной защиты линии W1 для распределительной сети 35 кВ со «слабым» источником ( $U_{НОМ} = 35 \text{ кВ}$ ,  $L_{W1} = 10 \text{ км}$ ,  $L_{W2} = 15 \text{ км}$ ,  $Z_{ЭС} = 10e^{j75} \text{ Ом}$ ,  $Z_{G1} = 1,5Z_{ЭС}$ ,  $Z_{G2} = 2,5Z_{ЭС}$ ): имеет место значительное перекрытие областей замеров защиты (более 50% площади; рисунок 5, а) в режимах коротких замыканий на линиях W1 и W2 при изменении состояния генераторов малых электростанций (включены/отключены) и параметров предшествующего повреждению режима. Наличие информации о параметрах доаварийного режима в месте установки защиты позволяет в значительной степени «разграничить» области замеров защиты (рисунок 5, б); к перекрытию областей замеров в этом случае приводит изменение взаимных перетоков мощности между источниками G1 и G2 (при этом в месте установки защиты параметры предшествующего режима не изменяются). Показано, что при известных перетоках мощности между всеми источниками сети, как правило, становится возможным с необходимой с практической точки зрения точностью разграничить области замеров сопротивлений (рисунок 5, в: области замеров формируются семейством годографов, пересекающихся в точке  $R_F \rightarrow \infty$ ).

Проведенные исследования селективности действия защит показали возможность повышения эффективности функционирования дистанционных защит за счёт использования информации о параметрах доаварийного режима.

В работе показано, что задача построения РЗ распределительной сети усложняется необходимостью принимать во внимание характеристики электромеханических переходных процессов, обусловленных подключением к сети ЭСММ.

На основе проведённых исследований динамической устойчивости генераторов ЭСММ установлены требования к быстродействию РЗ распределительной сети. Предложено использовать ступенчатую зависимость максимально допустимого по условиям устойчивости генераторов ЭСММ времени отключения КЗ от остаточного напряжения на шинах ЭСММ (рисунок 6). Отключение близких к шинам ЭСММ КЗ в ряде случаев необ-

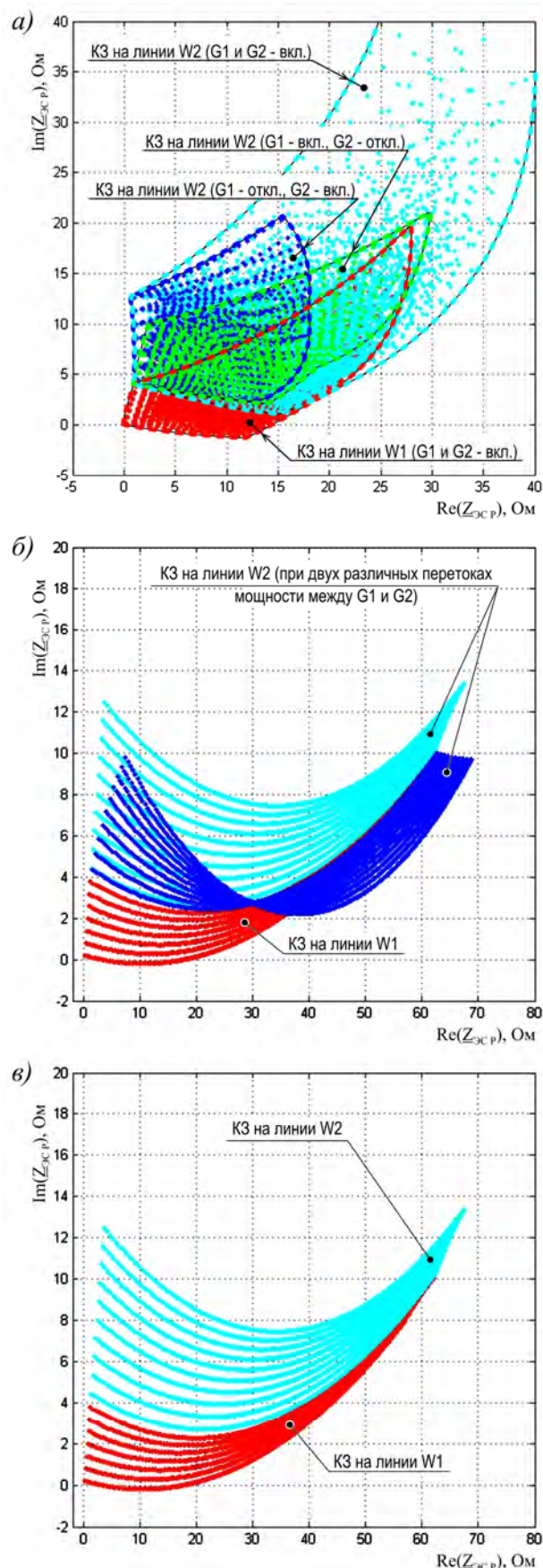


Рисунок 5 – Области замеров дистанционной защиты линии W1 на комплексной плоскости: а) при изменении состояния генераторов ЭСММ и параметров предшествующего повреждению режима; б) при фиксировании значения замера сопротивления в предшествующем повреждению режиме; в) при фиксировании значений перетоков мощности между всеми источниками сети

ходимо осуществлять за время менее 0,12 с; таким образом, требования к быстродействию защит распределительных сетей становятся жестче, чем в сетях более высокого класса напряжения. Показано, что быстродействие существующих защит с относительной селективностью во многих случаях оказывается недостаточным; кроме того, повышаются требования к быстродействию алгоритмов защит: искусственное введение дополнительных (постоянных) замедлений в логику алгоритма становится недопустимым.

Для анализа эффективности функционирования релейной защиты электрических сетей с ЭСММ в условиях переходных процессов, а также с целью оценки сценариев и последствий развития аварий при затянутых, ложных или излишних срабатываниях РЗ необходимо учитывать появление в таких сетях новых видов режимов, практически не характерных для энергосистем, содержащих только крупные централизованные электростанции: асинхронных режимов с высокой частотой скольжения (типичное значение – 10 Гц), многочастотных асинхронных режимов, нарушений устойчивости по напряжению, режимов аварийного отделения от внешней сети (в зарубежной литературе – Loss of Mains, Islanding). В диссертации систематизированы основные характеристики этих режимов; отмечено, что в новых условиях возникает необходимость принятия дополнительных мер по обеспечению устойчивости функционирования защит распределительной сети при отклонениях частоты, синхронных качаниях и асинхронных режимах с высокой частотой скольжения.

Проведённые в главе исследования позволили количественно оценить влияние ЭСММ на эффективность функционирования РЗ прилегающей электрической сети, показать необходимость повышения технического совершенства релейной защиты распределительных сетей в связи с подключением ЭСММ.

**Третья глава** посвящена разработке способов повышения технического совершенства РЗ распределительной сети, прилегающей к точке присоединения ЭСММ: рассмотрены вопросы выбора параметров срабатывания токовых защит; даны рекомендации по выполнению органа направления мощности в составе направленных максимальных токовых защит; предложены принципы и способы построения защит, основанные на удалённых измерениях параметров электрического режима.

Ряд особенностей выбора параметров срабатывания токовых защит в сетях с ЭСММ освещён в работах А.В. Беляева, М.А. Шабада. В диссертации систематизированы и приведены в обобщённом виде расчётные условия для согласования и проверки чувствительности защит, в частности, рассмотрены вопросы применения и согласования защит с зависимыми от тока выдержками времени срабатывания.

Проведены исследования органа направления мощности (ОНМ), выполненного по «90-градусной» схеме, используемого в составе направленной МТЗ (НМТЗ). Показано, что электрические режимы распределительных сетей с ЭСММ имеют особенности, ухудшающие условия функционирования ОНМ и НМТЗ в целом. Так, при работе ЭСММ в сети с мощным источником ток срабатывания направленной в сторону внешней сети МТЗ, как правило, меньше, чем максимальный рабочий ток в противоположном действии защиты направлении (рисунок 7: максимальный рабочий ток

$I_{\text{МАКС}}^* = 3$ ; ток срабатывания МТЗ, отстроенной от максимального рабочего тока электростанции  $I_{\text{МАКСГ}}^* : I_{\text{МТЗ}}^* = 1,25 I_{\text{МАКСГ}}^* = 1,25$ ). В этих условиях ухудшается устойчивость функционирования НМТЗ в режимах несимметричных коротких замыканий. Показана возможность излишнего срабатывания НМТЗ при несимметричных коротких замыканиях «за спиной» вследствие срабатывания

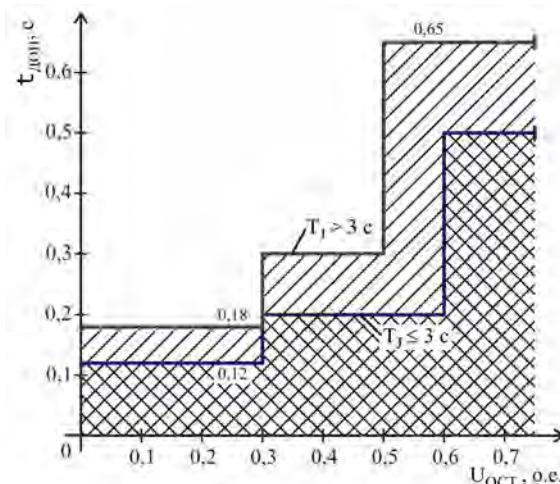


Рисунок 6 – Обобщённые требования к быстродействию релейной защиты распределительных сетей с электростанциями малой мощности:  $T_J$  – механическая постоянная инерции агрегата «генератор-первичный двигатель» ЭСММ

ОНМ, «включенного» на ток неповрежденной фазы (рисунок 8, а). Выявлена возможность отказа в срабатывании защиты при несимметричных коротких замыканиях в направлении её действия в условиях, если в предшествующем повреждению режиме значительный поток мощности был направлен в противоположном действии защиты направлении (рисунок 8, б: в режиме КЗ все вектора фазных токов находятся за пределами области срабатывания ОНМ). Кроме того показано, что возможны ложные срабатывания НМТЗ в аномальных рабочих режимах, когда вектор тока рабочего режима попадает в зону срабатывания ОНМ (например, при значительных снижениях напряжения во внешней сети, отключении индуктивной нагрузки в сети 10 кВ, некорректной работе систем возбуждения генераторов ЭСММ); отмечено, что такие режимы необходимо учитывать при выборе тока срабатывания защиты и угла максимальной чувствительности ОНМ.

Исследована работа ОНМ обратной последовательности (ОНМ ОП) в распределительной сети с ЭСММ и большой долей асинхронных электродвигателей в составе нагрузки. Показано, что в таких сетях даже при отключенной ЭСММ (т.е. при отсутствии источника «за спиной» защиты) могут возникать условия для срабатывания ОНМ ОП и НМТЗ. На рисунке 9 приведена векторная диаграмма, соответствующая однофазному короткому замыканию через переходное сопротивление в направлении действия защиты с отключенной ЭСММ. При значительном потоке мощности прямой последовательности, направленном в противоположном действии защиты направлении (ток прямой последовательности  $\underline{I}_1^* = 3,2e^{j158^\circ}$ ), замеряемый защитой ток превышает ток срабатывания НМТЗ; протекание в месте установки защиты тока обратной последовательности от двигательной нагрузки ( $\underline{I}_2^* = 1,7e^{j107,7^\circ}$ ) приводит к срабатыванию ОНМ ОП ( $\varphi_{мч\text{ ОНМ ОП}} - \pi/2 \leq \varphi(\underline{U}_2, \underline{I}_2) \leq \varphi_{мч\text{ ОНМ ОП}} + \pi/2$ ) и направленной защиты в целом.

На основе проведенных исследований даны рекомендации по выполнению ОНМ в составе НМТЗ, ориентированные на обеспечение селективности её действия в распределительных сетях с ЭСММ. Обосновано, что в таких сетях ОНМ на основе «90-градусной» схемы имеет ограниченную область применения. Рекомендовано использование в составе НМТЗ этих сетей ОНМ ОП в сочетании с органом направления мощности прямой последовательности (для определения направления мощности при симметричных КЗ). Показана необходимость и предложены способы блокирования НМТЗ с ОНМ ОП при отключённой ЭСММ «за спиной» защиты.

На основе анализа влияния предшествующего режима на замеры ДЗ в сетях со «слабыми» источниками предложен принцип выполнения дистанционной защиты линии электропередачи распределительной сети с многосторонним питанием, предусматривающий адаптивное изменение характеристики срабатывания защиты: характеристика срабатывания дистанционных органов формируется на основе удалённых измерений, хранения и обработки информации о параметрах доаварийного режима в точках подключения ЭСММ. Реализация устройства на основе предложенного принципа не предъявляет жёстких требований к каналам связи с точками удалённых измерений в части пропускной способности и скорости передачи информации.

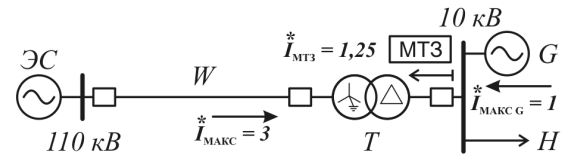
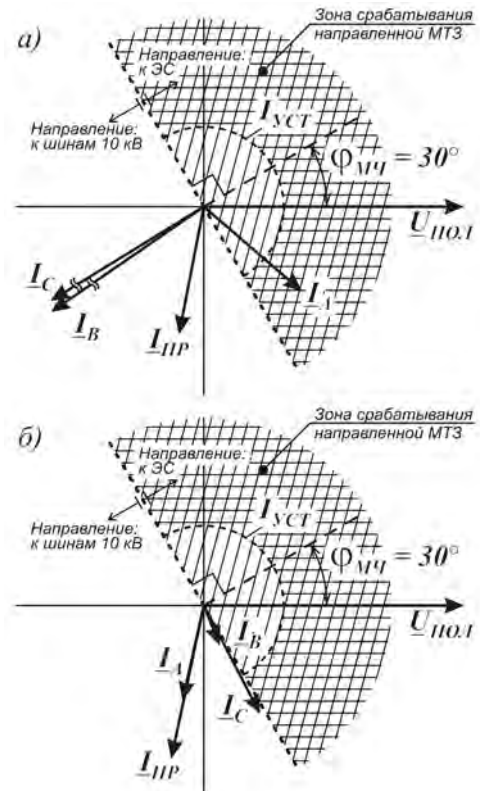


Рисунок 7 – Фрагмент схемы распределительной сети с ЭСММ



С участием автора предложен способ продольной дифференциальной защиты линии электропередачи, ориентированный на электрические сети с ЭСММ, основанный на использовании одного микропроцессорного терминала, размещенного со стороны внешней сети. В составе устройства предусматриваются два комплекта измерительных токовых органов (ИО1, ИО2 – рисунок 10), один из которых предназначен для получения по проводному каналу связи цифровых сигналов о токе в линии со стороны малой электростанции. Решение о срабатывании принимается блоком сравнения (БС) на основе сопоставления значений токов «своего» и удалённого концов защищаемого объекта; при возникновении условия срабатывания защиты команда отключения передается на «свой» и противоположный концы линии. Способ позволяет упростить реализацию защиты и ее обслуживание, обеспечивает надежное отключение генераторов малых электростанций перед действием сетевого устройства автоматического повторного включения со стороны внешней сети.

**В четвертой главе** разработаны требования к РЗ распределительных сетей с ЭСММ и рекомендации по составу функций защит, принципы построения РЗА в точке присоединения ЭСММ.

Обоснована необходимость установки в точке присоединения ЭСММ комплекса РЗА, выполняющего в общем случае следующие функции:

- отделение ЭСММ с местной нагрузкой от внешней сети или отключение генераторов ЭСММ;
- выполнение функций чувствительной релейной защиты со стороны ЭСММ;
- резервирование релейной защиты внешней и внутренней сети.

С целью оптимизации требований к РЗ распределительных сетей с ЭСММ введены в рассмотрение три подхода к управлению малыми распределёнными электростанциями в аварийных режимах: отключение малых электростанций, выделение малых электростанций на местную нагрузку, сохранение параллельной работы малых электростанций с источниками внешней сети. Характеристика области применения подходов приведена в таблице 1.

В соответствии с этими подходами разработаны требования к релейной защите и рекомендации по составу и размещению функций защит распределительной сети при подключении к ней ЭСММ (рисунок 11), в том числе определены принципы построения, состав функций и диапазоны параметров срабатывания комплекса РЗА в точке присоединения электростанций.

Реализация первых двух подходов упрощает решение задачи построения РЗ, однако требует критической оценки применимости в новых условиях существующих решений в части РЗ, сопряжена с детальной проработкой вопросов создания делительной защиты. Третий подход организационно и технически наиболее затратен: его применение требует совершенствования релейной защиты с учётом особенностей режимов, присущих распределительным сетям с ЭСММ.

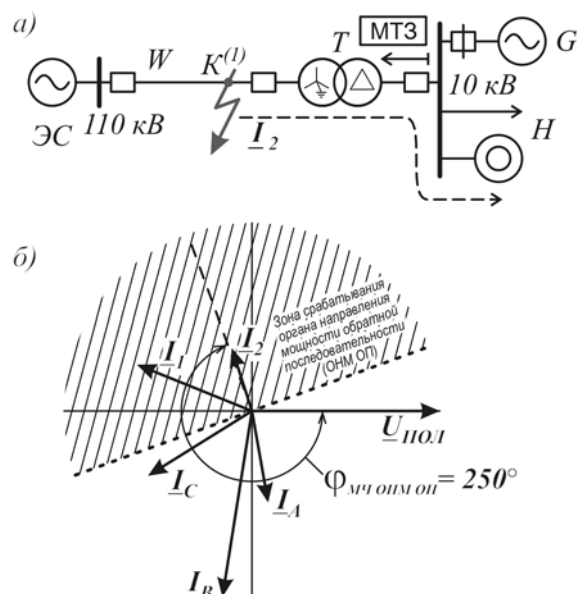


Рисунок 9 – Режим однофазного короткого замыкания через переходное сопротивление в сети 110 кВ: а) схема электрической сети; б) векторная диаграмма токов в месте установки защит

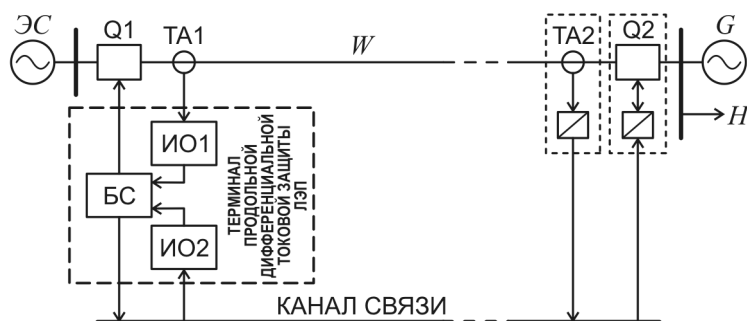
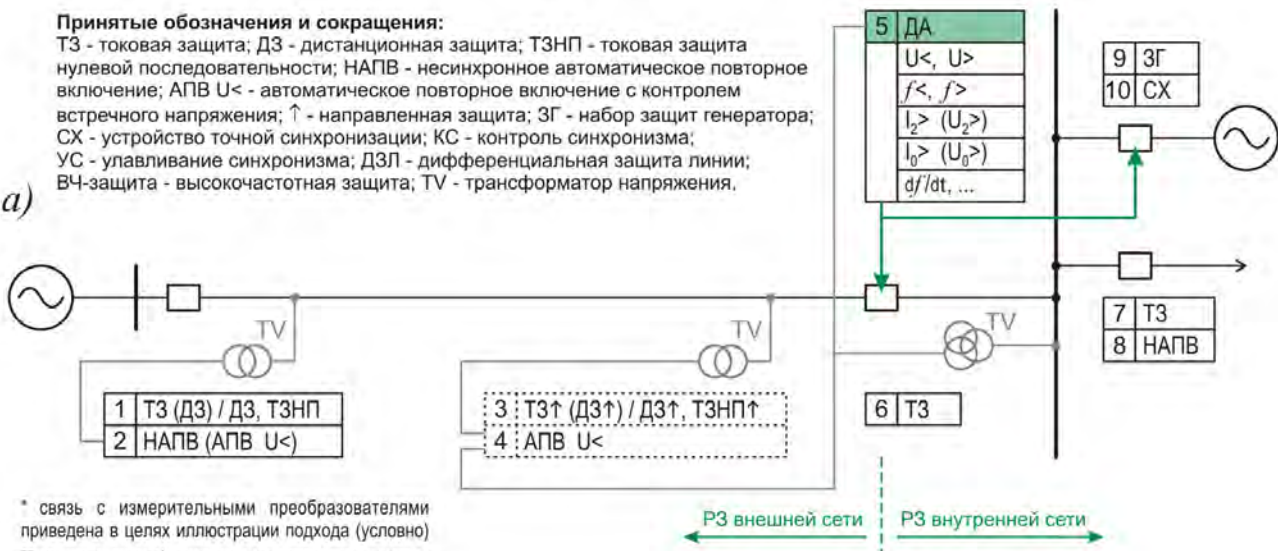


Рисунок 10 – Способ продольной дифференциальной защиты линии электропередачи

**Принятые обозначения и сокращения:**

ТЗ - токовая защита; ДЗ - дистанционная защита; ТЗНП - токовая защита нулевой последовательности; НАПВ - несинхронное автоматическое повторное включение; АПВ  $U_{<}$  - автоматическое повторное включение с контролем встречного напряжения;  $\uparrow$  - направленная защита; ЗГ - набор защит генератора; СХ - устройство точной синхронизации; КС - контроль синхронизма; УС - улавливание синхронизма; ДЗЛ - дифференциальная защита линии; ВЧ-защита - высокочастотная защита; TV - трансформатор напряжения.

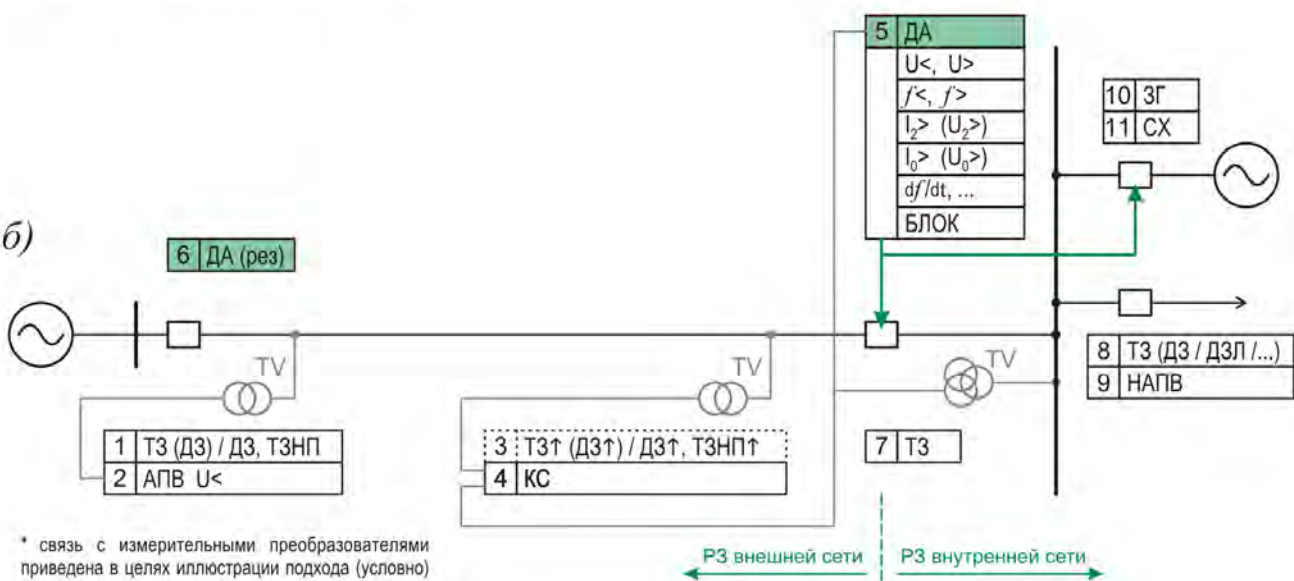
а)



\* связь с измерительными преобразователями приведена в целях иллюстрации подхода (условно)

\*\* силовые трансформаторы на схеме не показаны

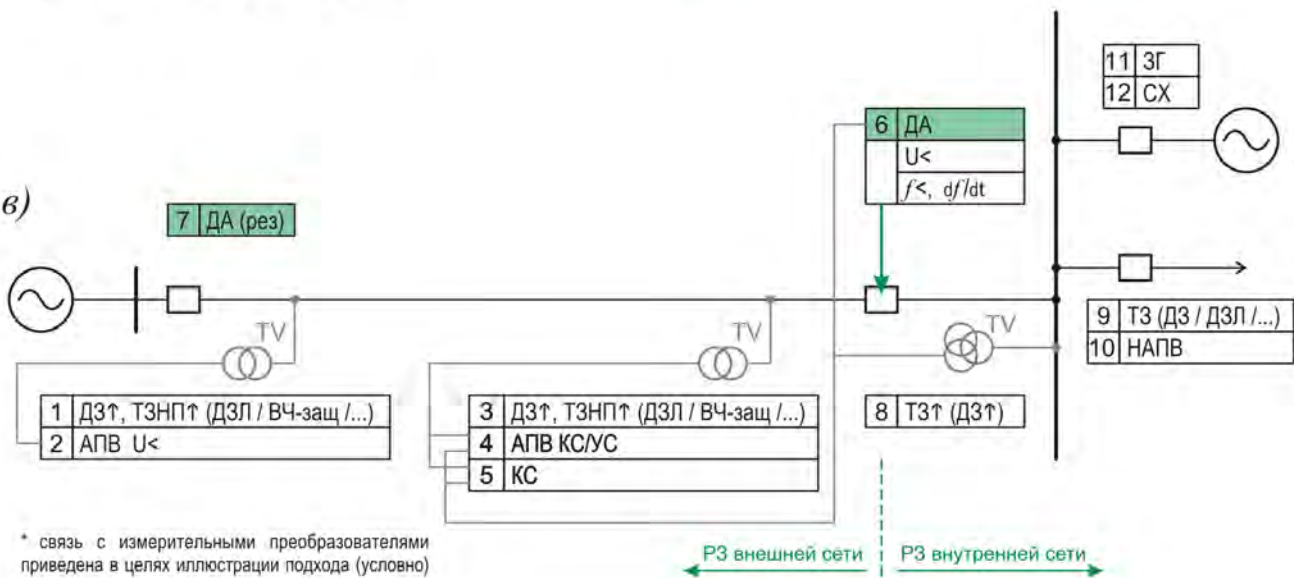
б)



\* связь с измерительными преобразователями приведена в целях иллюстрации подхода (условно)

\*\* силовые трансформаторы на схеме не показаны

в)



\* связь с измерительными преобразователями приведена в целях иллюстрации подхода (условно)

\*\* силовые трансформаторы на схеме не показаны

Рисунок 11 – Состав и размещение базовых функций релейной защиты для принятых подходов к управлению малыми электростанциями в аварийных режимах: а) отключение малых электростанций; б) выделение малых электростанций на местную нагрузку; в) сохранение параллельной работы малых электростанций между собой и с источниками внешней сети

Таблица 1 – Подходы к управлению электростанциями малой мощности в аварийных режимах и область их применения

| №  | Подход                                                                                       | Области применения                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|----|----------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. | Отключение малых электростанций                                                              | – энергорайоны с небольшой долей малых электростанций;<br>– электростанции мощностью не более 1-2 МВА (не «покрывающие» в необходимой степени мощность местной нагрузки или не предназначенные для работы в автономном режиме).                                                           |
| 2. | Выделение малых электростанций на местную нагрузку                                           | – электростанции, обеспечивающие электроснабжение близких по мощности потребителей и предназначенные для работы в автономном режиме;<br>– группы электростанций, обеспечивающих электроснабжение потребителей в микроэнергосистеме.                                                       |
| 3. | Сохранение параллельной работы малых электростанций между собой и с источниками внешней сети | – энергорайоны с большой долей малых электростанций в составе генерирующих мощностей (когда излишние отключения малых электростанций приводят к снижению запаса реактивной мощности в системе, к перегрузкам и отключению сетевого оборудования, усугубляя развитие аварийного процесса). |

Применение разработанных в главе решений проиллюстрировано на примере построения релейной защиты и автоматики системы электроснабжения комплекса по подготовке и переработке нефти и газа при внедрении ЭСММ.

**Пятая глава** посвящена совершенствованию принципов построения делительной автоматики, устанавливаемой в точке присоединения ЭСММ: предложен принцип и разработан алгоритм делительной автоматики по напряжению (ДАН); осуществлено исследование функционирования разработанного алгоритма с применением технологий цифрового моделирования в режиме реального времени.

Актуальность решения задачи построения ДАН обусловлена с одной стороны тем, что значительная доля аварий, требующих отделения ЭСММ от сети, связана со снижениями напряжения; с другой – появлением новых требований к делительной автоматике, направленных на предотвращение излишних отключений ЭСММ от сети в условиях увеличения их числа в составе генерирующих мощностей энергосистемы.

Существующие принципы выполнения ДАН, описанные в литературе (М.А. Шабад, А.В. Беляев), а также отраженные в исследованиях, выполненных применительно к распределительным сетям 110...220 кВ с парогазовыми электростанциями (Е.Ю. Гуревич, П.В. Илюшин и др.) основаны на контроле напряжения в выбранном месте деления; характеристика срабатывания ДАН представляет собой ступенчатую зависимость  $t = f(U)$  (как правило, одна или две ступени, в ряде случаев – с контролем направления мощности). В диссертационной работе отмечено, что допустимое время отделения может существенно варьироваться вследствие недетерминированности режимов распределительной сети, значительного влияния на их характеристики электрически близкой к ЭСММ соизмеримой по мощности двигательной нагрузки. По этой причине использование описанного принципа может приводить к излишним срабатываниям ДАН в условно неопасных (нормально устраняемых действием РЗА внешней сети) режимах.

На основе анализа изменений и взаимосвязи параметров режима при снижении напряжения в электрической сети с ЭСММ предложен усовершенствованный принцип деления сети при авариях, связанных со снижениями напряжения.

Линеаризованные уравнения установившегося режима энергосистемы, записанные в полярной системе координат в форме баланса мощности имеют вид:

$$\begin{bmatrix} W_p(U, \delta) \\ W_q(U, \delta) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial W_p}{\partial \delta} & \frac{\partial W_p}{\partial U} \\ \frac{\partial W_q}{\partial \delta} & \frac{\partial W_q}{\partial U} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta U \end{bmatrix}, \quad (6)$$

где  $W_p(U, \delta)$ ,  $W_q(U, \delta)$  - векторы-функции небалансов активной и реактивной мощности соответственно;  $U$ ,  $\delta$  - модули и фазы напряжений в узлах сети соответственно (зависимые параметры режима);  $\left[\frac{\partial W_p}{\partial \delta}\right]$ ,  $\left[\frac{\partial W_p}{\partial U}\right]$ ,  $\left[\frac{\partial W_q}{\partial \delta}\right]$ ,  $\left[\frac{\partial W_q}{\partial U}\right]$  - квадратные (в общем случае) матрицы-блоки частных производных небаланса мощности по зависимым параметрам режима.

Если рассматривать только процессы, связанные со снижением напряжения (при  $\Delta P = 0$ ), уравнение (6) приобретает вид:

$$\Delta U = \left[ \frac{\partial W_q}{\partial U} - \frac{\partial W_q}{\partial \delta} \cdot \left( \frac{\partial W_p}{\partial \delta} \right)^{-1} \cdot \frac{\partial W_p}{\partial U} \right]^{-1} \Delta Q = W_{UQ} \Delta Q. \quad (7)$$

При функционировании системы в области устойчивости элементы матрицы  $W_{UQ}$  положительны; достижение предела статической устойчивости определяется условием сингулярности матрицы  $W_{UQ}$ . Выражение (7) иллюстрирует взаимосвязь напряжения и реактивной мощности (являющейся наиболее значимым параметром, характеризующим «тяжесть» режима энергосистемы, т.е. его близость к предельному по условиям устойчивости при известном снижении напряжения).

Для исследования изменений и взаимосвязи реактивной мощности и напряжения в переходных процессах выполнено моделирование с использованием цифровых динамических моделей на базе ПО PSCAD. Рассматривались процессы при аварийном отделении от внешней энергосистемы фрагмента сети, содержащего эквивалентный генератор и местную нагрузку (с различной долей асинхронных электродвигателей в её составе). На рисунке 12 в качестве примера (при доле двигателей в составе местной нагрузки – 60%) приведена кривая, отражающая взаимосвязь напряжения в месте установки автоматики с реактивной мощностью по электрической связи «малая электростанция – эквивалентная энергосистема» в момент времени, соответствующий предельно допустимому времени отделения: чем ниже значение напряжения, тем больший «запас» реактивной мощности необходим для обеспечения устойчивости отделившегося фрагмента.

В соответствии с предложенным принципом разработан алгоритм делительной автоматики по напряжению с контролем реактивной мощности. ДАН содержит две ступени: при значительных снижениях напряжения (до 20-30% от номинального) срабатывание защиты происходит с фиксированной (минимальной) выдержкой времени; при больших значениях остаточного напряжения решение о срабатывании принимается на основе измеряемых защитой напряжения и реактивной мощности в соответствии с условием:

$$Q < \frac{Q_{\min} - Q_{\max}}{U_{II} - U_I} (U - U_{II}) + Q_{\min}.$$

Характеристика срабатывания ДАН приведена на рисунке 13. В ряде случаев может быть целесообразно дополнение ДАН третьей ступенью, предназначенной для отделения ЭСММ при её переходе в режим потребления реактивной мощности (при значениях напряжения более 80% номинального).

Цифровой модельный прототип разработанной ДАН реализован на базе цифрового моделирующего программно-аппаратного комплекса реального времени eMEGAsim. Укрупнённая структурная схема программной части прототипа приведена на рисунке 14. Проведены испытания прототипа с использованием цифровой динамической модели реального времени электроэнергетической системы с малой электростанцией на базе моделирующего комплекса RTDS. Методика проведения испытаний включала моделирование

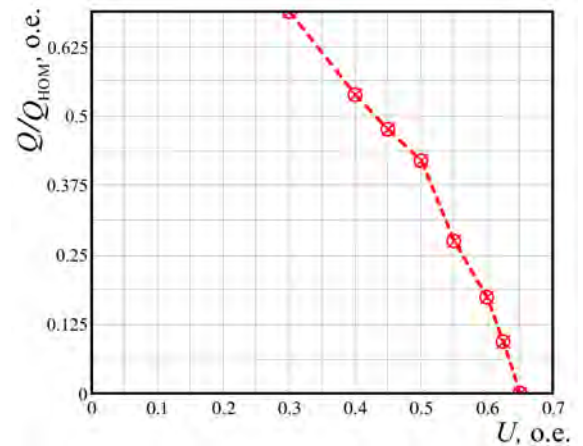


Рисунок 12 – Зависимость реактивной мощности, соответствующей предельно допустимому времени деления, от напряжения

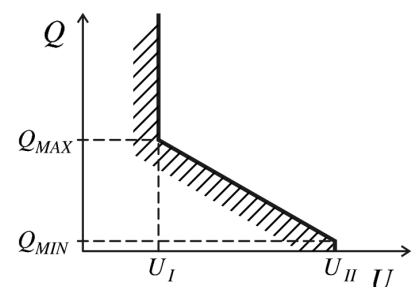


Рисунок 13 – Характеристика срабатывания ДАН

Цифровой модельный прототип разработанной ДАН реализован на базе цифрового моделирующего программно-аппаратного комплекса реального времени eMEGAsim. Укрупнённая структурная схема программной части прототипа приведена на рисунке 14. Проведены испытания прототипа с использованием цифровой динамической модели реального времени электроэнергетической системы с малой электростанцией на базе моделирующего комплекса RTDS. Методика проведения испытаний включала моделирование

электрических режимов при аварийном выделении малой электростанции на местную нагрузку (при варьировании видов возмущений, параметров предшествующего отделению режима, состава и параметров нагрузки). Фиксировались значения реактивной мощности  $Q_{\text{ДАН}}$  и напряжения  $U_{\text{ДАН}}$  в точке деления, время срабатывания ДАН. Зафиксированное значение времени срабатывания опытного образца  $t_{\text{ДАН}}$  сравнивалось с фактически допустимым  $t_{\text{доп}}$ , а также со значением, полученным при использовании «настроенной» для рассматриваемой ситуации характеристики  $t = f(U)$ ,  $t_U$ . Время  $t_{\text{ДАН}}$  в большинстве моделируемых режимов было близким к  $t_{\text{доп}}$ , в то время как  $t_U$  существенно превышало  $t_{\text{доп}}$ : при снижениях напряжения до 50-60% номинального разница  $t_{\text{доп}}$  в сравнении с  $t_U$  составила более одной секунды.

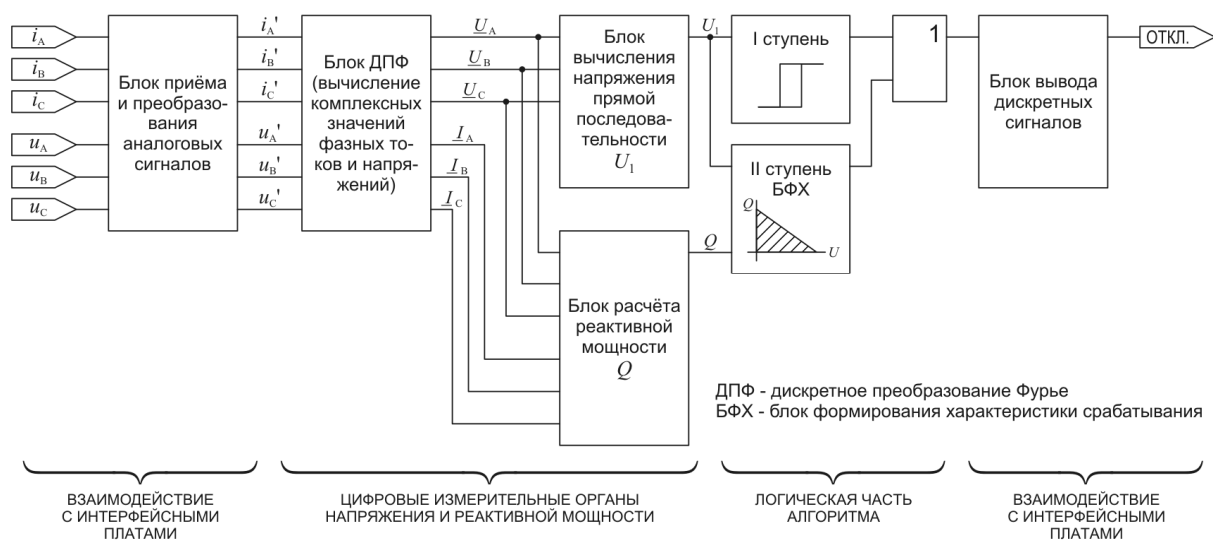


Рисунок 14 – Структурная схема программной части опытного образца ДАН

В главе определена область применения разработанной ДАН, предложен практический подход к выбору параметров её срабатывания.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Выполнен комплекс системных исследований по совершенствованию системы релейной защиты, направленному на обеспечение эффективности её функционирования в условиях подключения к сети малых распределённых электростанций.

2. Дана характеристика проблемы построения РЗ распределительной сети с малыми распределёнными электростанциями. Показано, что при внедрении ЭСММ электрические режимы распределительной сети усложняются: сетевые элементы начинают работать в условиях многостороннего питания, появляется возможность возникновения качаний и асинхронных режимов, несинхронных включений, режимов аварийного отделения фрагментов сети с ЭСММ от энергосистемы. В связи с этим усложняются условия функционирования РЗ. На основе анализа существующего отечественного и зарубежного опыта построения РЗ при подключении ЭСММ обоснована необходимость комплексного подхода, включающего решение двух основных групп задач: обеспечение требуемого технического совершенства РЗ электрических сетей, прилегающих к точке присоединения ЭСММ, и создание РЗА в узле присоединения ЭСММ к сети.

3. Разработаны и реализованы на базе специализированных программных и программно-аппаратных комплексов модели электрических сетей с малыми распределёнными электростанциями; установлены возможные диапазоны изменения их параметров. Модели применены при исследованиях электрических режимов, а также при апробации предложенных в диссертационной работе решений.

4. Проведены исследования эффективности функционирования существующей РЗ электрической сети, прилегающей к точке присоединения ЭСММ. Получены аналитические выражения, отра-

жающие влияние подключаемых к сети электростанций на чувствительность и селективность токовых и дистанционных защит, и выполнена количественная оценка изменения этих свойств защит для характерных параметров распределительных сетей с ЭСММ. Предложен подход к сопоставлению по критерию чувствительности защит с относительной селективностью, заключающийся в определении максимальной мощности подключаемых к электрической сети ЭСММ, при которой защита внешней сети удовлетворяет требованиям чувствительности; на основе этого подхода выполнен сопоставительный анализ максимальных токовых и дистанционных защит. Показана целесообразность использования информации о параметрах доаварийного режима для повышения эффективности дистанционных защит распределительных сетей с ЭСММ.

5. Установлены требования к быстродействию РЗ распределительной сети по условиям устойчивости генераторов ЭСММ. Предложено применять ступенчатую зависимость допустимого времени устранения КЗ от остаточного напряжения на шинах ЭСММ. Отключение близких к шинам ЭСММ КЗ в ряде случаев необходимо осуществлять за время менее 0,12 с; таким образом, требования к быстродействию защит распределительных сетей становятся более жесткими, чем в сетях более высокого класса напряжения.

6. Предложены способы повышения технического совершенства РЗ электрической сети, прилежащей к точке присоединения ЭСММ. Систематизированы расчётные условия для выбора параметров срабатывания максимальных токовых защит (в том числе токовых защит с зависимой от тока выдержкой времени срабатывания) с учётом особенностей режимов распределительных сетей с ЭСММ. Даны рекомендации по выполнению органа направления мощности в составе направленной максимальной токовой защиты распределительной сети с ЭСММ. Предложен принцип выполнения дистанционной защиты линии электропередачи, предусматривающий адаптивное изменение параметров срабатывания на основе удалённых измерений параметров доаварийного режима в узлах присоединения ЭСММ. Предложен способ продольной дифференциальной токовой защиты линии электропередачи, ориентированный на распределительные сети с ЭСММ, основанный на использовании одного комплекта, устанавливаемого с одного конца линии; способ защищен патентом РФ на изобретение.

7. С целью оптимизации требований к РЗ распределительной сети с ЭСММ введены в рассмотрение три подхода к управлению ЭСММ в аварийных режимах: отключение малых электростанций, выделение малых электростанций на местную нагрузку, сохранение параллельной работы малых электростанций с источниками внешней сети. В соответствии с этими подходами разработаны требования к релейной защите распределительной сети при подключении к ней ЭСММ; определены принципы построения, состав функций и диапазоны параметров срабатывания комплекса РЗА в точке присоединения электростанций; даны рекомендации по составу и размещению функций защит прилежащей к точке присоединения распределительной сети.

8. Усовершенствованы принципы построения делительной автоматики, устанавливаемой в точке присоединения ЭСММ: предложен принцип и разработан алгоритм делительной автоматики по напряжению, основанный на контроле взаимных соотношений напряжения, значения и направления реактивной мощности в точке деления. Определена область применения разработанной делительной автоматики по напряжению и предложен практический подход к выбору параметров её срабатывания. Исследование функционирования разработанного алгоритма осуществлено с применением технологии цифрового моделирования в режиме реального времени путём создания и испытаний опытного образца устройства (цифрового модельного прототипа). Результаты испытаний подтвердили высокую эффективность предложенного принципа.

9. Результаты исследований использованы в деятельности подкомитета С6 Российского национального комитета (РНК) СИГРЭ «Системы распределения энергии и распределённая генерация» при разработке концептуальных вопросов создания систем РЗА объектов малой генерации; при выполнении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в ОАО «ВНИИР». Научные результаты и положения диссертационной работы используются в учебном процессе в Чувашском государственном университете им. И.Н. Ульянова при подготовке магистров и бакалавров в

лекционных курсах, на лабораторных занятиях, а также при научном руководстве работой студентов.

## СПИСОК НАУЧНЫХ ТРУДОВ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### В изданиях перечня ВАК:

1. Онисова, О.А. Делительная защита в электроэнергетических системах, содержащих электростанции малой мощности / О.А. Онисова // Электрические станции. – 2014. – №6. – С.33-41.
2. Онисова, О.А. Особенности функционирования направленных максимальных токовых защит в электрических сетях с распределённой генерацией / О.А. Онисова // Энергетик. – 2015. – №1. – С.17-21.
3. Онисова, О.А. Максимальная токовая защита в системах электроснабжения с распределённой генерацией / А.В. Булычев, А.А. Наволочный, Г.С. Нудельман, О.А. Онисова // Известия вузов. Электромеханика. – 2013. – №1 – С.75-78.
4. Онисова, О.А. Современные методы моделирования режимов энергосистем с применением программно-аппаратного комплекса RTDS / М.Г. Линт, Г.С. Нудельман, О.А. Онисова // Энергетик. – 2010. – № 8 – С.23-26.
5. Онисова, О.А. Подготовка методической базы цифровых моделей реального времени для целей релейной защиты / А.А. Наволочный, Г.С. Нудельман, О.А. Онисова // Электротехника. – 2011. – № 7. – С.40-44.

### В изданиях, индексируемых в SCOPUS:

6. Onisova, O.A. Preparation of methodical basis for real-time digital models for relay-protection purposes / G.S. Nudel'man, A.A. Navolochnyi, O.A. Onisova // Russian Electrical Engineering. – 2011. – Vol. 82 – №7. – PP.377-380.
7. Onisova, O.A. Subdivision Protection in Electric Power Systems Containing Low-Power Electric Power Plants / O.A. Onisova // Power Technology and Engineering. – 2014. – Vol. 48 – №4. – PP.322-330.

### В других изданиях:

8. Онисова, О.А. Влияние распределенной генерации на РЗА систем электроснабжения / О.А. Онисова // Релейщик. – 2012. – №1 (апрель). – С.58-62.
9. Онисова, О.А. Релейная защита и автоматика в условиях развития малой распределённой энергетики / Г.С. Нудельман, О.А. Онисова // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2014. – №4 (25). – С.106-114.
10. Онисова, О.А. Устойчивость электроэнергетических систем с распределённой генерацией / А.А. Наволочный, Г.С. Нудельман, О.А. Онисова // РЕЛАВЭКСПО-2013: релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем России. II Международная научно-практическая конференция и выставка (Чебоксары, 23-26 апреля 2013 г.). Сборник тезисов докладов. – Чебоксары: РИЦ «СРЗАУ», 2013. – С.15-16.
11. Онисова, О.А. Направления развития релейной защиты электроэнергетических систем с малыми распределёнными электростанциями / О.А. Онисова // Релейщик. – 2014. – №4. – С.20-25.
12. Онисова, О.А. Использование коммуникационных технологий для реализации защиты от потери питающей сети / О.А. Онисова, О. Ринтамаки, И.С. Солонина // Релейщик. – 2010. – №2. – С.44-47.
13. Онисова, О.А. О подходе к решению задач релейной защиты при внедрении в электроэнергетическую систему малых распределённых электростанций / Г.С. Нудельман, О.А. Онисова // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем: материалы 11-й Всерос. научн.-техн. конф. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2015. – С. 402-404.
14. Онисова, О.А. Технологии цифрового моделирования электроэнергетических систем в режиме реального времени / Е.Н. Колобродов, А.А. Наволочный, О.А. Онисова, Д.С. Рыбин, V. Ravinder, V. Lapointe // Релейщик. – 2013. – №1. – С.32-37.
15. Онисова, О.А. Совместное использование двух моделирующих комплексов реального времени при разработке устройств релейной защиты, автоматике и управления / Е.Н. Колобродов, Д.Б.

- Крупнов, А.А. Наволочный, О.А. Онисова // РЕЛАВЭКСПО-2015: релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем России. III Международная научно-практическая конференция и выставка. Сборник тезисов докладов. – Чебоксары: НН ПРЕСС, 2015. – С.50-51.
16. Онисова, О.А. Анализ режимов коротких замыканий в распределительной сети с электростанцией малой мощности для выбора параметров срабатывания максимальных токовых защит / А.А. Николаев, О.А. Онисова // Труды Академии электротехнических наук Чувашской республики: материалы XII Республиканской научно-технической конференции молодых специалистов. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2015. – С. 15-17.
17. Онисова, О.А. Формирование основных требований к релейной защите электроэнергетических систем с малыми распределёнными электростанциями / Г.С. Нудельман, О.А. Онисова // Энергоэксперт. – 2015. – №4 (51). – С.60-64.
18. Онисова, О.А. Исследование режимов коротких замыканий в распределительной сети с электростанциями малой мощности для решения задач релейной защиты / А.А. Николаев, О.А. Онисова // Электроэнергетика глазами молодежи: труды VI международной научно-технической конференции, 9-13 ноября 2015, Иваново. – В 2 т. Т 2. – Иваново: ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», 2015. – С.141-144.
19. Онисова, О.А. Использование комбинированных методов моделирования применительно к большим электроэнергетическим системам / Г.С. Нудельман, А.А. Наволочный, О.А. Онисова // Релейщик. – 2015. – №2 (22). – С.12-16.

**Патенты:**

20. Устройство для продольной дифференциальной токовой защит линии электропередачи [Текст]: пат. 2518051 Российская Федерация: МПК Н 02 Н 3/28 / Г.С. Нудельман, О.А. Онисова, А.В. Булычев; заявитель и патентообладатель Открытое акционерное общество «Всероссийский научно-исследовательский проектно-конструкторский и технологический институт релестроения с опытным производством» – № 2012123296/07; заявл. 05.06.2012; опубл. 10.06.2014, Бюл. №16.

---

ОНИСОВА Ольга Александровна

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ С МАЛЫМИ РАСПРЕДЕЛЁННЫМИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ СТАНЦИЯМИ

Автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук

Подписано в печать 12.04.2016 г. Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1,0.

Печать цветная. Тираж 100 экз. Заказ № 35/4

Отпечатано в типографии «Центр-print» ИП Иванова А.И.

428000, Россия, Чувашская Республика, г. Чебоксары, Московский проспект, 34/2, оф. 94