

*На правах рукописи*

**Шагурина Елена Сергеевна**

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ  
В ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМАХ УСТРОЙСТВ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ  
НА ОСНОВЕ ВЫСШИХ ГАРМОНИК**

Специальность 05.14.02 – Электрические станции  
и электроэнергетические системы

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

Иваново - 2012

Работа выполнена на кафедре «Автоматическое управление электроэнергетическими системами» ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина».

Научный руководитель:

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

Официальные оппоненты:

**Митькин Юрий Алексеевич**, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», профессор кафедры "Высоковольтных электроэнергетики, электротехники и электрофизики".

**Кандалов Юрий Владимирович**, кандидат технических наук, филиал ОАО «СО ЕЭС» - Ивановское РДУ, начальник отдела сопровождения рынка.

Ведущая организация: Проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт по проектированию энергетических систем и электрических сетей ОАО «Институт «Энергосетьпроект», г. Москва.

Защита состоится \_\_\_\_\_ 2012 г. в \_\_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета Д 212.064.01 при Ивановском государственном энергетическом университете по адресу: 150003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, корпус Б, ауд. 237.

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

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

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Ивановского государственного энергетического университета.

Автореферат разослан \_\_\_\_\_ 2012 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.064.01  
доктор технических наук, профессор



**Мошкарин А.В.**

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Однофазные замыкания на землю (ОЗЗ) являются преобладающим видом повреждений в электроустановках среднего напряжения: кабельных и воздушных сетях 6 – 35 кВ, обмотках статоров генераторов и часто являются первопричиной аварий, сопровождающихся значительным экономическим ущербом. Значительный вклад в исследование указанных повреждений внесли Шалыт Г.М., Лихачев Ф.А., Шуцкий В.И., Дударев Л.Е., установив, что большая часть ОЗЗ в кабелях и электрических машинах (до 80% и более), прежде всего, в начальной стадии развития повреждения изоляции, имеет дуговой прерывистый характер.

Возникновение дуговых прерывистых ОЗЗ наиболее вероятно в электрических сетях 6 – 35 кВ, работающих в соответствии с требованиями ПУЭ с изолированной нейтралью или с высокоомным заземлением нейтрали сети через резистор. Дуговые прерывистые ОЗЗ возможны также в компенсированных электрических сетях, особенно при больших расстройках компенсации.

ОЗЗ являются также наиболее частым видом электрических повреждений в обмотке статора генераторов, работающих на сборные шины генераторного напряжения или в блоке с трансформаторами, и часто предшествуют многофазным и витковым коротким замыканиям (КЗ).

Время поиска и ликвидации ОЗЗ в поврежденном элементе зависит от эффективности функционирования защит от данного вида повреждений. Поэтому надежность функционирования электроустановок среднего напряжения в значительной мере зависит не только от режима заземления их нейтрали, но и от технического совершенства применяемых защит от ОЗЗ.

Большинство устройств защиты от ОЗЗ электроустановок напряжением 6 – 35 кВ основано на использовании различных составляющих нулевой последовательности установившегося режима ОЗЗ. К таким устройствам защиты от ОЗЗ относятся, в частности, устройства на основе высших гармоник (ВГ), получившие широкое применение в компенсированных электрических сетях 6 – 10 кВ, а также в генераторах энергоблоков.

Опыт эксплуатации защит указанных объектов от ОЗЗ, основанных на использовании ВГ, показал не всегда достаточную эффективность их функционирования, прежде всего, при дуговых перемежающихся замыканиях. Поэтому исследование причин недостаточной эффективности функционирования и разработка методов и средств повышения технического совершенства защит от ОЗЗ на основе ВГ представляются актуальными.

**Целью** настоящей работы являются исследование и разработка способов и средств повышения эффективности функционирования защит от ОЗЗ, основанных на использовании ВГ, компенсированных сетей 6-10 кВ и генераторов, работающих в блоке с трансформатором, при дуговых перемежающихся ОЗЗ.

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

1. Аналитический обзор известных принципов и исполнений устройств защиты от ОЗЗ, основанных на использовании ВГ, в компенсированных сетях 6-10 кВ и обмотках статора генераторов энергоблоков.

2. Оценка области применения защит от ОЗЗ, основанных на использовании ВГ в компенсированных сетях 6-10 кВ.

3. Аналитическое решение уравнений переходных процессов при ОЗЗ в обмотках статора генераторов энергоблоков.

4. Разработка математических моделей генератора энергоблока и компенсированных сетей 6-10 кВ, учитывающих распределенный характер параметров линий и обмотки статора, для исследования особенностей и оценки параметров переходных процессов при ОЗЗ, влияющих на функционирование защит от данного вида повреждений.

5. Разработка математических моделей устройств защиты от ОЗЗ, основанных на использовании ВГ, генераторов энергоблоков и компенсированных сетей 6-10 кВ, а также комплексных моделей «защищаемый объект – устройство защиты на основе ВГ» для исследования динамических режимов их функционирования при дуговых перемежающихся ОЗЗ.

6. Исследования динамических режимов функционирования защит от ОЗЗ на основе ВГ генераторов энергоблоков и компенсированных сетей 6-10 кВ с использованием методов математического и физико-математического моделирования.

7. Разработка и реализация методов и средств повышения динамической устойчивости функционирования при дуговых прерывистых ОЗЗ устройств защиты, основанных на использовании ВГ.

**Основные методы научных исследований.** Для решения задач в работе использовались методы теории электрических цепей, электромагнитных переходных процессов в электроэнергетических системах (ЭЭС), математического моделирования электрических цепей применительно к цифровым устройствам РЗА, а также физико-математического моделирования системы «защищаемый объект – устройство релейной защиты».

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

1. Аналитическое решение уравнений переходного процесса при ОЗЗ вблизи нейтрали обмотки статора блочного генератора в  $\alpha$ -,  $\beta$ -, 0-составляющих, обеспечивающее достаточную для инженерных расчетов точность вычислений переходных напряжений 3-й гармоники и эффективного значения тока в месте повреждения.

2. Математические модели генератора энергоблока, учитывающие распределенный характер параметров обмотки статора, для исследования электромагнитных переходных процессов при всех разновидностях ОЗЗ (устойчивых, однократных самоустраняющихся, дуговых прерывистых) в обмотке статора.

3. Результаты исследований параметров и характеристик переходных процессов при ОЗЗ в компенсированных сетях 6-10 кВ и в обмотках статора генераторов энергоблоков, влияющих на функционирование защит на ВГ.

4. Математические модели микроэлектронных устройств защиты от ОЗЗ генераторов энергоблоков, основанных на использовании способов относительного и абсолютного замеров напряжений 3-й гармоники и комплексные математические модели систем «объект – устройство защиты».

5. Результаты исследований динамических режимов функционирования защит от ОЗЗ генераторов энергоблоков и компенсированных сетей 6-10 кВ, основанных на использовании ВГ, выполненных с использованием методов математического и физико-математического моделирования.

6. Результаты исследований способов выполнения комбинированной направленной защиты от ОЗЗ, основанной на использовании высших гармоник и электрических величин переходного процесса, для компенсированных электрических сетей 6-10 кВ.

7. Способ выполнения токовой защиты абсолютного замера ВГ с торможением, обеспечивающий повышение чувствительности и расширение области её применения в компенсированных сетях 6-10 кВ.

**Достоверность результатов**, полученных аналитическими методами, методами математического и физико-математического моделирования, подтверждается их совпадением с данными других исследований, опубликованными в литературных источниках, а также с данными экспериментальных исследований существующих исполнений и экспериментального образца разрабатываемого устройства защиты от ОЗЗ.

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

*Соответствие диссертации формуле специальности:* в соответствии с формулой специальности 05.14.02 – «Электрические станции и электроэнергетические системы»: в диссертационной работе объектом исследований являются компенсированные электрические сети напряжением 6-10 кВ и генераторы, работающие в блоке с трансформатором, предметом исследований - особенности и параметры переходных процессов при ОЗЗ в компенсированных сетях 6-10 кВ и генераторах энергоблоков, влияющие на эффективность функционирования защит от данного вида повреждений, методы и средства повышения их технического совершенства.

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

- п. 6 «Разработка методов математического и физического моделирования в электроэнергетике» паспорта специальности 05.14.02 – «Электрические станции и электроэнергетические системы» соответствуют полученное автором аналитическое решение уравнений переходных процессов при ОЗЗ в обмотках статора генераторов энергоблоков; разработанные автором с использованием современных программных средств модели синхронных генераторов энергоблоков и компенсированных электрических сетей 6-10 кВ для исследования динамических режимов функционирования устройств релейной защиты этих объектов от ОЗЗ; математические модели устройств релейной защиты от ОЗЗ, основанных на использовании ВГ; методика физико-математического моделирования динамических режимов функционирования комплексной системы «защищаемый объект – устройство защиты от ОЗЗ», а также результаты исследований переходных процессов при дуговых ОЗЗ, выполненных с применением разработанных моделей;

- п. 9 «Разработка методов анализа и синтеза систем автоматического регулирования, противоаварийной автоматики и релейной защиты в электроэнергетике» соответствуют результаты исследований динамических режимов функционирования защит от ОЗЗ генераторов энергоблоков и компенсированных электрических сетей 6-10 кВ на основе ВГ, выполненных с использованием методов математического и физико-математического моделирования; предложения по совершенствованию принципов действия защит генераторов энергоблоков от ОЗЗ при дуговых повреждениях, основанных на использовании способа относительного замера 3-й гармоники напряжения; предложенные способы повышения динамической устойчивости функционирования токовых защит компенсированных сетей 6-10 кВ, выполненных на способе абсолютного замера ВГ; обоснования эффективности способа выполнения комбинированной направленной защиты компенсиро-

ванных сетей 6-10 кВ от ОЗЗ, основанный на вычислении взаимной корреляционной функции для высших гармонических составляющих в токе и производной напряжения нулевой последовательности; технические требования, функционально-логические схемы и алгоритмы функционирования разрабатываемых цифровых защит от ОЗЗ компенсированных сетей 6-10 кВ.

**Практическую ценность** представляют следующие результаты работы:

1. Результаты статистического анализа данных по системам промышленного и городского электроснабжения, позволяющие уточнить области возможного применения защит абсолютного замера на основе ВГ на различных объектах компенсированных сетей 6-10 кВ.

2. Банк тестовых сигналов в формате COMTRADE-осциллограмм для экспериментальных исследования динамических режимов функционирования реальных образцов устройств защиты от ОЗЗ, основанных на использовании ВГ и электрических величин переходного процесса.

3. Результаты исследований переходных процессов при ОЗЗ в обмотке статора и динамических режимов функционирования защит от ОЗЗ генераторов энергоблоков, которые могут быть использованы для совершенствования как микроэлектронных, так и микропроцессорных защит на принципе относительно замера напряжений 3-й гармоники.

4. Алгоритмы функционирования токовых и токовых направленных защит на основе ВГ для микропроцессорных индивидуального и централизованного устройств защиты от ОЗЗ компенсированных сетей 6-10 кВ.

**Реализация результатов работы.** Предложенные принципы выполнения, технические требования и алгоритмы функционирования токовых защит абсолютного и относительного замера реализуются в разрабатываемых ООО НПП «АЛИМП» (Нижний Новгород) совместно с ИГЭУ микропроцессорных индивидуальном и многофункциональном централизованном устройствах защиты от ОЗЗ электрических сетей 6-10 кВ.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Аналитическое решение уравнений переходного процесса при ОЗЗ вблизи нейтрали обмотки статора генератора энергоблока в  $\alpha$ -,  $\beta$ -, 0-составляющих.

2. Математические модели генератора, учитывающие распределенный характер параметров обмотки статора для исследования электромагнитных переходных процессов при всех разновидностях ОЗЗ в обмотке статора.

3. Результаты исследований параметров переходных процессов при ОЗЗ в компенсированных сетях 6-10 кВ и в обмотках статора генераторов, влияющие на функционирование защит на ВГ, полученных с применением аналитического решения и моделирования на ЭВМ.

4. Математические модели основных функциональных узлов и полные математические модели микроэлектронных защит генераторов от ОЗЗ в обмотке статора, основанных на использовании способов относительного и абсолютного замера напряжений 3-й гармоники.

6. Результаты исследований динамических режимов функционирования защит от ОЗЗ генераторов энергоблоков и компенсированных сетей 6-10 кВ, основанных на использовании ВГ, выполненных с использованием методов математического и физико-математического моделирования.

7. Результаты исследований способов выполнения комбинированной направленной защиты от ОЗЗ, основанной на использовании ВГ и электрических величин переходного процесса, для компенсированных электрических сетей 6-10 кВ.

8. Способ выполнения токовой защиты абсолютного замера ВГ с торможением, обеспечивающий повышение чувствительности и расширение области её применения.

9. Принципы выполнения и алгоритмы функционирования разрабатываемых ООО НПП «АЛИМП» (г. Нижний Новгород) совместно с ИГЭУ микропроцессорных устройств защит от ОЗЗ для сетей 6-10 кВ.

**Личный вклад автора заключается** в постановке цели и конкретных задач исследования, анализе параметров компенсированных сетей 6-10 кВ, сравнительном анализе существующих устройств защиты от ОЗЗ на основе ВГ сетей 6-10 кВ и генераторов энергоблоков; получении аналитического решения уравнений переходного процесса при ОЗЗ в обмотке статора генераторов энергоблоков; разработке математических моделей для исследования на ЭВМ переходных процессов при ОЗЗ в обмотке статора генераторов энергоблоков; разработке математических моделей микроэлектронных защит обмотки статора генераторов энергоблоков; исследовании и оценке параметров переходных процессов при ОЗЗ в компенсированных сетях 6-10 кВ и обмотках статора генераторов энергоблоков; исследовании динамических режимов функционирования защит на основе ВГ; разработке и исследовании способов и алгоритмов токовых и токовых направленных защит на основе ВГ для компенсированных сетей 6-10 кВ; экспериментальных исследованиях макетного образца централизованной микропроцессорной защиты от ОЗЗ для сетей 6-10 кВ.

**Апробация работы.** Основные положения диссертации докладывались:

- на XIV, XVI и XVII международных научно-технических конференциях студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» в Московском энергетическом институте, Москва, 2008, 2010, 2011 гг.;

- на Региональных научно-технических конференциях студентов и аспирантов «Энергия-2008», «Энергия-2009», «Энергия-2010», «Энергия-2011», Иваново, ИГЭУ, 2008, 2009, 2010, 2011 гг.;

- на XV и XVI Международных конференциях «Бенардосовские чтения», Иваново, ИГЭУ, 2009, 2011;

- на Международной научно-технической конференции СИГРЭ «Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем», Москва, 2009 г.;

- на конференциях лауреатов конкурсов научных работ студентов «Знания молодых ядерщиков – атомным станциям», Обнинск, 2009, 2010;

- на Международном научно-техническом семинаре «Электрические сети России 2009», Москва, 2009 г.;

- на XX конференции «Релейная защита и автоматика энергосистем 2010», Москва, 2010 г.;

- на Международной научно-технической конференции СИГРЭ «Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем», Санкт-Петербург, 2011 г.;

- на Международном научном семинаре им. Ю.Н. Руденко «Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики», Решма (Ивановская обл.), 2011 г.

**Публикации.** Результаты исследований опубликованы в 33 работах: 1 монографии, 23 статья, из них 4 научных статьи в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень рекомендуемых изданий ВАК РФ, а также в тезисах докладов конференций.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 158 наименований и 4 приложений. Основной текст включает 164 стр., 60 илл.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы ее цели и задачи, отражена научная новизна и практическая ценность полученных результатов, дается общая характеристика работы.

**В первой главе** рассматриваются особенности ОЗЗ в компенсированных сетях и обмотках статоров генераторов энергоблоков, сформулированы дополнительные требования к защитам от ОЗЗ указанных объектов, дан аналитический обзор известных принципов выполнения и исполнений защит от ОЗЗ, основанных на использовании ВГ.

Наиболее эффективным средством борьбы с негативными последствиями дуговых прерывистых ОЗЗ в сетях 6-10 кВ, по мнению большинства специалистов, является резонансное заземление нейтрали через ДГР. Многие специалисты в России предлагают расширить область применения данного режима заземления нейтрали, включив в неё сети 6-10 кВ с  $I_{C\Sigma} \geq 5 \dots 10$  А. Анализ данных литературных источников показал, что доля неустойчивых ОЗЗ в компенсированных сетях выше, чем в сетях с изолированной нейтралью, а их фиксацией и использованием информации о них в целях диагностики состояния изоляции можно предотвратить значительную часть аварийных отключений линий и других элементов.

На основе анализа литературных источников показано также, что ОЗЗ в обмотке статора генераторов энергоблоков, как правило, проходит через дугу, которая на первом этапе своего существования носит дуговой перемежающийся характер. Большая часть ОЗЗ возникает в лобовых частях обмотки статора, однако дуговые прерывистые ОЗЗ и кратковременные самоустраняющиеся пробоя изоляции возможны также в пазах обмотки статора, включая зону вблизи нейтрали.

С учетом этого, на наш взгляд, к защитам от ОЗЗ как компенсированных сетей 6-10 кВ, так и генераторов энергоблоков, должны предъявляться требования фиксации не только устойчивых, но и дуговых прерывистых замыканий и кратковременных самоустраняющихся пробоев изоляции.

Дан анализ известных способов выполнения и исполнений защит от ОЗЗ компенсированных сетей 6-10 кВ. На основе анализа литературных источников и технических описаний устройств релейной защиты показано, что в компенсированных электрических сетях напряжением 6-10 кВ России наиболее широкое применение получили токовые защиты от ОЗЗ, основанные на использовании способов абсолютного и относительного замера ВГ в токах нулевой последовательности защищаемых присоединений, выполненных на электронной и микроэлектронной базе.

Условия применимости токовых защит абсолютного замера ВГ могут быть представлены в виде

$$I_{C \text{ собс}^*} = \frac{I_{C \text{ собс}}}{I_{C\Sigma}} \leq \frac{1}{1 + \frac{\alpha_{\text{макс}}}{\alpha_{\text{мин}}} K_{\text{отс}} \cdot K_{\text{ч.мин.доп}}} = \frac{1}{1 + z \cdot K_{\text{отс}} \cdot K_{\text{ч.мин.доп}}}, \quad (1)$$

где  $\alpha_{\text{макс}}$  и  $\alpha_{\text{мин}}$  – соответственно максимальный и минимальный уровни ВГ в емкостных токах сети и присоединений,  $z$  – их отношение.



При  $K_{отс} = 1,2$ ;  $K_{ч.мин.доп} = 1,5$ ;  $z = 4$  (Кискачи В.М.), из (1) получим  $I_{Cсобс*} \leq 0,12$ . В связи с этим разработчиками токовых защит абсолютного замера уровня ВГ рекомендуется применять их на присоединениях с собственными емкостными токами  $I_{Cсобс} \leq 0,1I_{C\Sigma}$ . На основе статистического анализа параметров компенсированных сетей 6-10 кВ промышленного и городского электроснабжения, включающего более 1500 секций 6-10 кВ различных объектов, показано, что для ГРУ 6-10 кВ ТЭЦ условие  $I_{Cсобс} \leq 0,1I_{C\Sigma}$  выполняется примерно для 88% присоединений, ГПП - ~69% присоединений, РП (РТП) сетей промышленного и городского электроснабжения - ~97% присоединений, ТП систем промышленного электроснабжения - ~100% присоединений, подключенных к шинам (рис. 1).

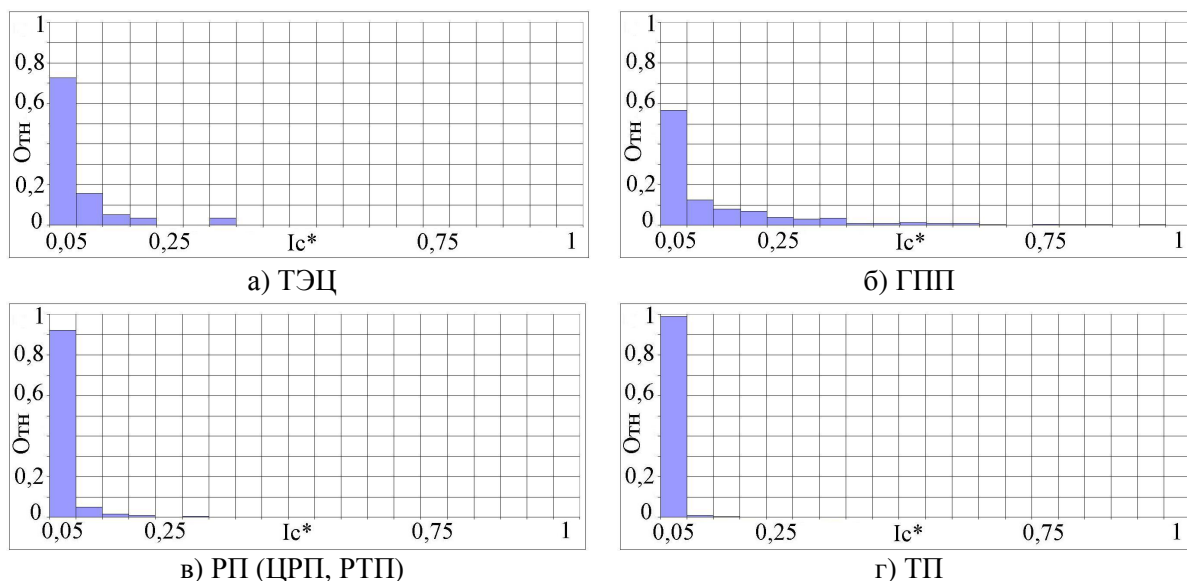


Рис. 1. Частота значений  $I_{Cсобс*}$  для ЦП компенсированных кабельных сетей 6-10 кВ промышленного и городского электроснабжения

Таким образом, проблемы с применением токовых защит абсолютного замера ВГ возникают на центрах питания компенсированных сетей 6-10 кВ, прежде всего, ГПП. Кроме указанных ограничений области применения, к недостаткам токовых защит абсолютного замера на основе ВГ следует отнести невозможность обеспечения устойчивости их функционирования при дуговых прерывистых ОЗЗ.

На тех присоединениях, где нельзя применить токовые защиты абсолютного замера, должны применяться направленные защиты. Следует отметить, что возможность фиксации дуговых неустойчивых ОЗЗ, включая кратковременные самоустраниющиеся пробой изоляции, а также непрерывность действия при устойчивых ОЗЗ могут обеспечить только комбинированные направленные устройства, основанные на использовании ВГ и электрических величин переходного процесса, однако в России и других странах такие защиты в настоящее время не выпускаются.

Показано, что условия применимости токовых защит относительного замера ВГ определяется двумя наибольшими значениями собственных емкостных токов  $I_{C1собс}$  и  $I_{C2собс}$  присоединений, подключенных к шинам защищаемого объекта для устройств с параллельным сравнением входных величин выполняется, если  $I_{C1,2собс} \leq 0,4$ . На основе указанного выше статистического анализа параметров сетей 6-10 кВ установлено, что  $I_{Cсобс} < 0,4$  на ТЭЦ имеют ~ 100% присоединений, а на ГПП ~ 96%. На РП (ЦРП, РТП) ~ 100% присоединений имеют  $I_{Cсобс} < 0,3$ , на ТП – 99% имеют  $I_{Cсобс} < 0,1$ . Таким образом, токовые защиты относительного замера

практически без ограничений могут применяться на любых объектах компенсированных сетей 6-10 кВ. К достоинствам токовых защит относительного замера относится также возможность обеспечения динамической устойчивости их функционирования в переходных режимах ОЗЗ.

Произведен анализ известных способов и исполнений защиты генераторов средней и большой мощности, работающих в блоке с трансформаторами, на которых вырабатывается большая часть электроэнергии в России. В качестве стопроцентной защиты генераторов энергоблоков от ОЗЗ в обмотке статора наиболее широкое применение в России и других странах получили комбинированные устройства, включающие максимальную защиту напряжения  $U_0$  с зоной действия 80-85% обмотки статора и защиту на принципе относительного замера напряжения третьей гармоники для фиксации повреждений на землю вблизи нейтрали.

Опыт эксплуатации защит от ОЗЗ генераторов энергоблоков, основанных на использовании способов относительного или абсолютного замера напряжения 3-й гармоники выявил возможность отказов их функционирования, одной из причин которых может являться недостаточная устойчивость функционирования при дуговых прерывистых ОЗЗ.

Учитывая изложенное, актуальными являются задачи исследования и разработки способов и средств повышения эффективности функционирования защит от ОЗЗ электрических компенсированных сетей и генераторов энергоблоков, на основе ВГ, прежде всего, при дуговых перемежающихся ОЗЗ. Для решения указанных задач необходимы исследования параметров и характеристик электрических величин переходного процесса, влияющих на функционирование защит на основе ВГ.

**Вторая глава** посвящена исследованию особенностей и оценке параметров переходных процессов при ОЗЗ в компенсированных сетях 6-10 кВ и обмотках статора генераторов энергоблоков.

Наилучшим методом исследования электромагнитных переходных процессов является сочетание аналитических методов решения рассматриваемой задачи на основе упрощенных моделей исследуемых электроэнергетических объектов и имитационного моделирования на ЭВМ.

Для приближенных оценок параметров токов и напряжений переходного процесса при ОЗЗ в компенсированных сетях 6-10 кВ можно использовать известное аналитическое решение (Шуин В.А.), полученное в симметричных составляющих нулевой последовательности. Сравнение результатов расчетов переходных процессов с использованием указанного аналитического решения с результатами расчетов, выполненных в системе Matlab на моделях сетей 6-10 кВ, учитывающих распределенный характер параметров линий, показало, что погрешности аналитического решения в оценке значений переходных токов и напряжений в основном не превышают 10-20%, за исключением случаев ОЗЗ на шинах защищаемого объекта.

При анализе переходных процессов при ОЗЗ в обмотке статора генераторов представляют интерес не только составляющие тока и напряжения нулевой последовательности, но и фазные напряжения, поэтому аналитическое решение уравнений переходного процесса целесообразно получить не в симметричных составляющих, а с использованием  $\alpha$ -,  $\beta$ -, 0-составляющих.

Обоснована возможность применения для приближенного анализа переходных процессов при ОЗЗ вблизи нейтрали (15-20% обмотки статора от нейтрали – зона нечувствительности максимальной защиты напряжения  $3U_0$ ) упрощенной схемы замещения по рис. 2. С учетом граничных условий комплексная схема замещения в  $\alpha$ -,  $\beta$ -, 0-составляющих для расчета переходного процесса

при ОЗЗ в точке обмотки статора генератора, соответствующей заданному значению  $x$ , имеет вид, приведенный на рис. 3, а. Для вычисления свободных составляющих нулевой последовательности схема замещения может быть приведена к виду, показанному на рис. 3, б.

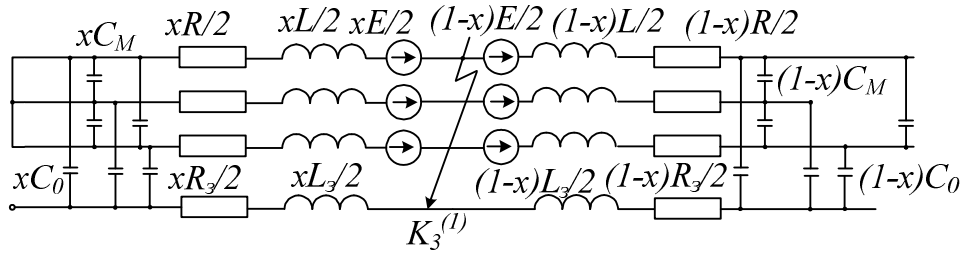


Рис. 2. Расчетная схема замещения обмотки статора блочного генератора для исследования переходных процессов при ОЗЗ вблизи нейтрали ( $x \leq 0,2$ )

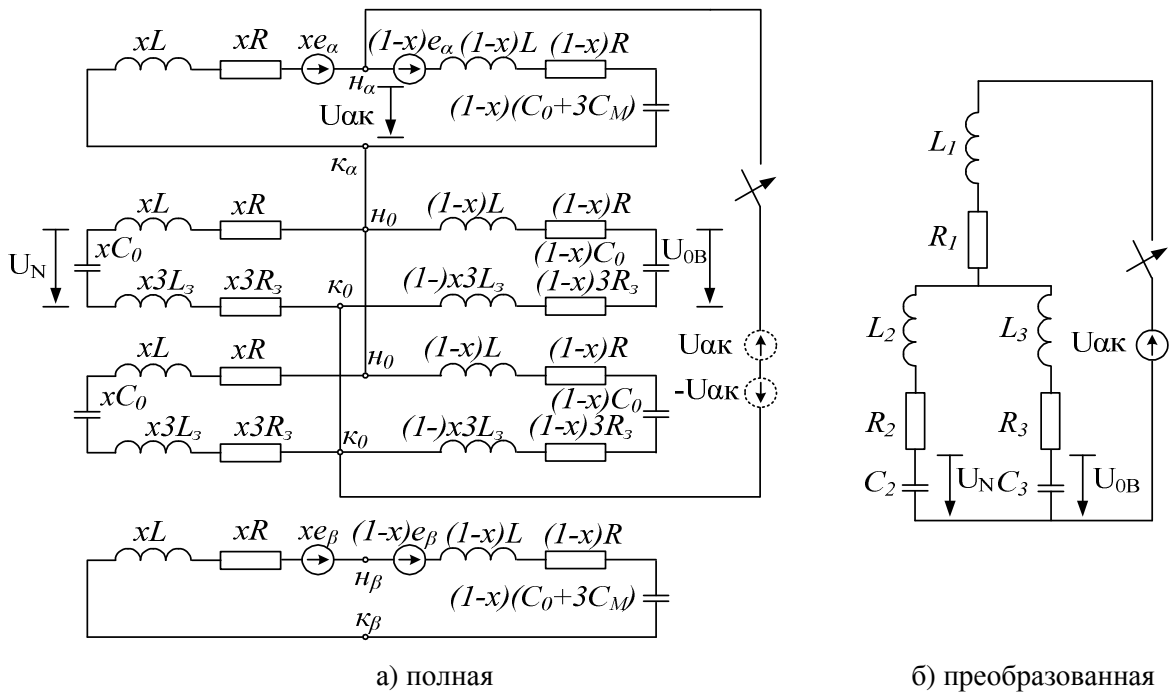


Рис. 3. Комплексные схемы замещения в  $\alpha$ -,  $\beta$ -, 0-составляющих для расчета переходных процессов при ОЗЗ вблизи нейтрали обмотки статора генератора энергоблока ( $x \leq 0,2$ )

На основе схемы замещения (рис. 3) получены аналитическое решение в  $\alpha$ -,  $\beta$ -, 0-составляющих для напряжения в нейтрали  $u_N$ , напряжения  $u_{0B}$  и тока  $3i_0$  в месте повреждения.

Из схемы замещения по рис. 3, б для напряжения  $u_N$  в нейтрали генератора в операторной форме можно получить:

$$U_N(p) = E_m \omega_0^2 \frac{(\omega \cos \varphi + p \sin \varphi)(p^2 + a_1 p + a_0)}{(p^2 + \omega^2)(p^4 + b_3 p^3 + b_2 p^2 + b_1 p + b_0)} = E_m \omega_0^2 \frac{F_1(p)}{F_2(p)}, \quad (2)$$

где коэффициенты  $a_i$  и  $b_i$  определяются по параметрам схемы замещения.

По аналогии с переходными процессами при ОЗЗ в сетях 6-10 кВ, при ОЗЗ в обмотке статора генератора можно выделить две стадии, связанные соответственно с разрядом емкостей поврежденной фазы и дополнительным зарядом емкостей неповрежденных фаз.

Частоты  $\omega_p$ ,  $\omega_3$  разрядных и зарядных колебаний определяются из приближенного решения уравнения  $\Delta(p) = p^4 + b_3p^3 + b_2p^2 + b_1p + b_0 = 0$  при  $b_1 = b_3 = 0$  (случай «малых потерь»):

$$\omega_p = b_2 + \sqrt{b_2^2 - 4b_0}; \quad (3)$$

$$\omega_3 = b_2 - \sqrt{b_2^2 - 4b_0}. \quad (4)$$

Постоянные затухания  $\delta_p$  и  $\delta_3$  приближенно определяются первыми членами разложения функции  $\Delta(p)$  в ряд Тейлора в окрестности точек  $p_{1,2} = \pm j\omega_p$  и  $p_{3,4} = \pm j\omega_3$ .

Оригинал функции  $U_N(p)$ , т.е. функции  $u_N(t)$  определяется по теореме разложения Хевисайда:

$$u_N(t) = E_m \omega_0^2 \sum_{k=1}^n \frac{F_1(p_k)}{F_2'(p_k)} e^{p_k t}. \quad (5)$$

С учетом (5) для напряжения в нейтрали получено:

$$u_N(t) = u_{Nnp} + u_{Np} + u_{N3} \approx -\alpha E_m \sin(\omega t + \varphi) + U_{Nm p} e^{-\delta_p t} \cos \omega_p t + U_{Nm 3} e^{-\delta_3 t} \cos \omega_3 t, \quad (6)$$

где

$$U_{Nm p,3} = E \omega_0^2 \frac{F_1(p_{p,3})}{F_2'(p_{p,3})} \approx E \omega_0^2 \frac{-\omega_{p,3}^2 + a_0}{2(\omega_{p,3}^4 + b_2 \omega_{p,3}^2 + b_0) + (-\omega_{p,3}^2 + \omega^2)(-4\omega_{p,3}^3 + 2b_2)}. \quad (7)$$

Для задач, решаемых в данной работе, представляют интерес погрешности полученного аналитического решения в части оценки 3-й гармоники напряжений и среднеквадратичного значения тока в месте ОЗЗ.

На рис. 4 приведены расчетные зависимости напряжений 3-й гармоники в нейтрали  $U_{3N}$ , на выводах  $U_{03B}$  и среднеквадратичного значения тока в месте ОЗЗ, полученные с применением аналитического метода (кривые 2, 4) и моделирования в системе Matlab с использованием цепной схемы замещения обмотки статора (кривые 3, 4).

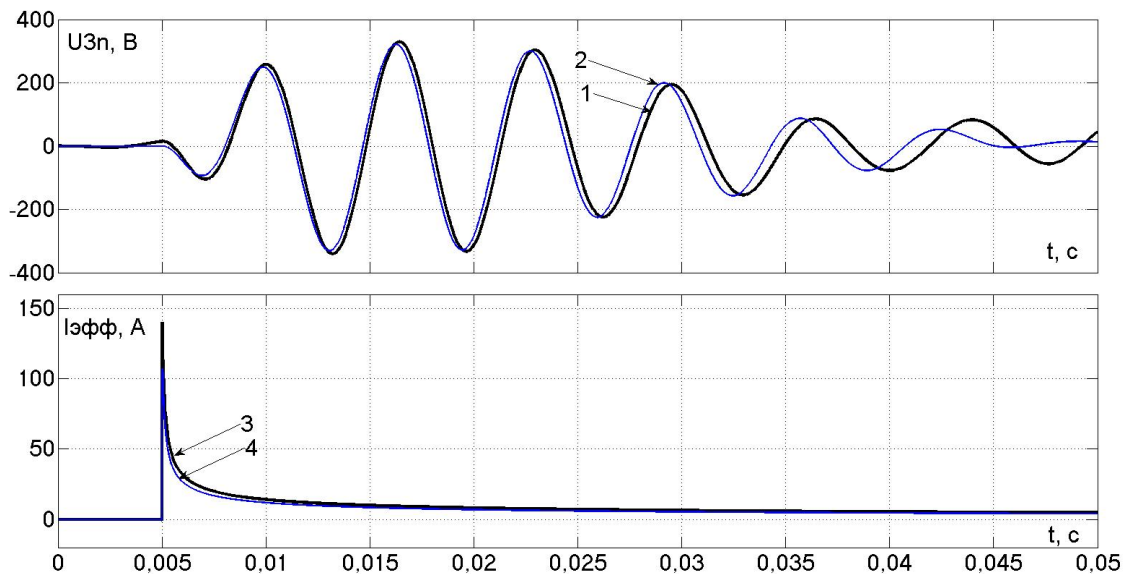


Рис. 4. Сравнение результатов аналитического решения и моделирования в системе Matlab для цепной схемы замещения обмотки статора генератора энергоблока типа ТВВ-320-2 при  $x \leq 0,2$

Из рис. 4 можно видеть, что полученное аналитическое решение позволяет с достаточной точностью оценивать указанные параметры.

Для более точной, чем с использованием упрощенных аналитических решений уравнений переходных процессов при ОЗЗ в компенсированных сетях и генераторах энергоблоков, оценки параметров переходных токов и напряжений разработаны математические модели для ЭВМ, учитывающие распределенный характер параметров линий и обмотки статора генераторов.

При исследовании переходных процессов в обмотке статора генераторов с учетом распределенного характера её параметров последняя, как правило, представляется цепной схемой замещения, состоящей не менее чем из 8-10 элементарных звеньев. На рис. 5 приведена общая схема трехфазного элементарного звена цепной схемы замещения обмотки статора. По данным экспериментальных исследований З.Г. Каганова влиянием на волновые переходные процессы продольной емкости  $K$  и взаимной индукции  $M$  в обмотках статора генераторов можно пренебречь. С учетом этого схему замещения элементарного звена можно упростить.

Параметры схемы замещения по рис. 5 могут быть определены на основе экспериментальных данных по замерам волновых параметров генераторов и технических данных, приводимых в справочниках:

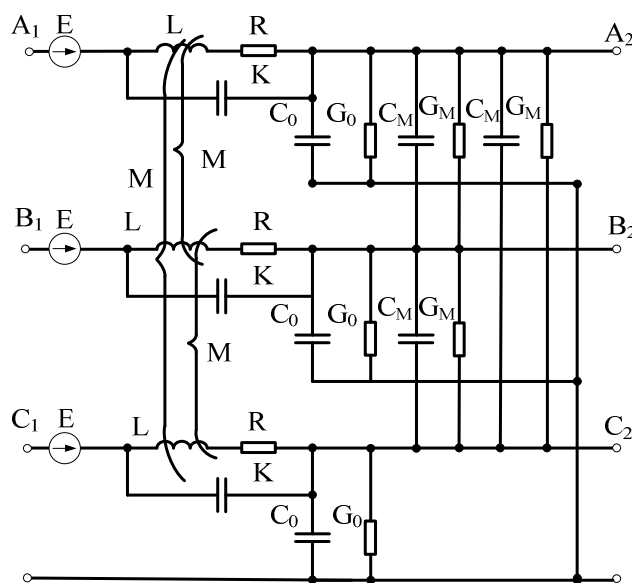


Рис. 5. Схема замещения элементарного звена обмотки статора генератора

$$C_0 = \frac{3C_{0G}}{3n}; \quad (8)$$

$$C_M = \frac{C_{MG}}{n} = \frac{(0,03-0,05)C_{0G}}{n} = (0,03-0,05)C_0, \quad (9)$$

$$G_0 = (0,03-0,05)\omega C_0; \quad (10)$$

$$G_M = (0,03-0,05)\omega C_M. \quad (11)$$

$$Z_{\phi-\phi} \approx \sqrt{\frac{L_{\phi-\phi}}{C_{\phi-\phi}}} = \sqrt{\frac{(L-M)}{(C_0+3C_M)}}, \quad (12)$$

$$L \approx Z_{\phi-\phi}^2 (C_0 + 3C_M) + M \approx Z_{\phi-\phi}^2 (C_0 + 3C_M), \quad (13)$$

$$L - M \approx L \approx \frac{x_d''}{n\omega} = \frac{1}{n\omega} \cdot \frac{(x_d'')^* U_{ном}}{\sqrt{3} I_{ном}}, \quad (14)$$

где  $n$  – число звеньев цепной схемы замещения.

С использованием разработанной методики определены параметры цепных схем замещения турбогенераторов большой и средней мощности.

При анализе нестационарных режимов функционирования сложных электрических цепей наиболее широкое применение получили методы и программы моделирования, в которых описание математической модели исследуемого объекта формируется в виде системы дифференциальных уравнений состояния, приведенных к нормальной форме Коши.

Для исследования переходных процессов при дуговых прерывистых ОЗЗ разработаны математические модели с использованием цепных схем замещения для компенсированных сетей 6-10 кВ и генераторов энергоблоков, в которых учитывается текущее состояние коммутационных элементов – выключателей, ключей, моделирующих ОЗЗ и другие виды продольной и поперечной несимметрии (т.н. непрерывно-дискретные модели), в которых параметры матриц  $L_Q$ ,  $R_Q$ ,  $Q_E$ ,  $Q_U$  зависят от текущего состояния указанных выше элементов.

$$\frac{d}{dt}[I_L] = [L_Q]^{-1} \{ [Q_E][E] - [Q_U][U_c] - [R_Q][I_L] \}; \quad (15)$$

$$\frac{d}{dt}[U_c] = [C]^{-1} \{ [H] \cdot [I_L] - [G] \cdot [U_c] \}. \quad (16)$$

Непрерывно-дискретные модели генератора и компенсированных сетей 6-10 кВ удобно использовать для расчетов переходных процессов при ОЗЗ в обмотке статора и оценки их параметров с использованием системы моделирования Mathcad.

Реализация моделей компенсированных электрических сетей 6-10 кВ и генераторов энергоблоков с использованием средств системы моделирования Matlab создает дополнительные возможности для исследования параметров переходных токов при ОЗЗ за счет виртуальных измерительных приборов, средств визуального наблюдения за процессами и обработки результатов измерений и упрощения моделирования комплексной системы «объект – устройство защиты от ОЗЗ».

На рис. 6 приведена модель генератора в системе Matlab, представленная цепной схемой замещения из 11 Т-образных элементарных звеньев по рис. 5, обеспечивающая имитацию ОЗЗ при различных значениях доли замкнувшихся витков обмотки статора  $x$  ( $x = 5\%, 10\%, 20\% \dots 100\%$ ).

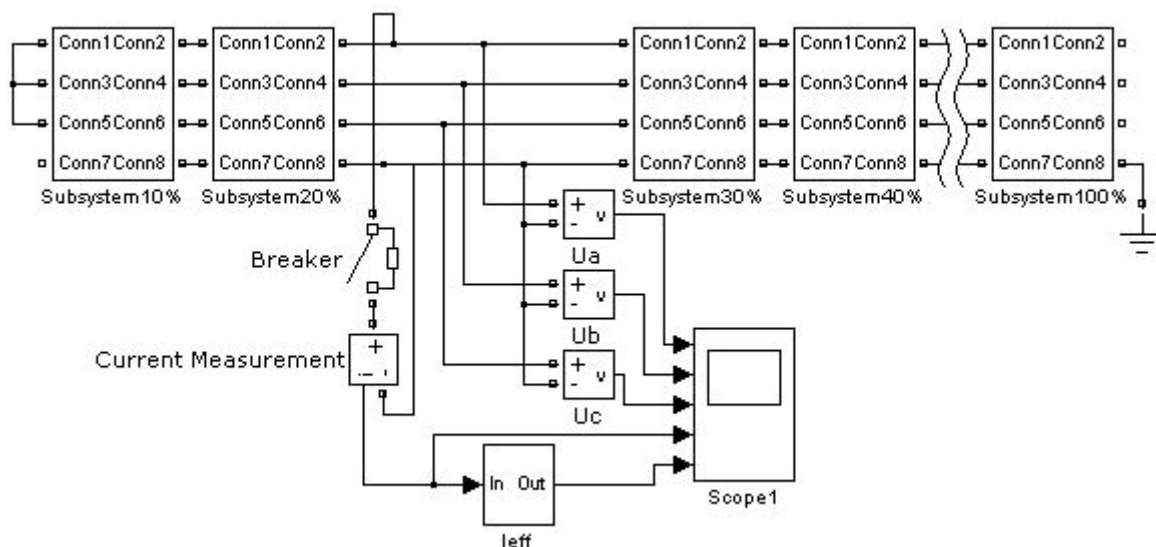


Рис. 6. Модель генератора в системе Matlab в виде цепной схемы с виртуальными измерительными приборами для имитации ОЗЗ при различных значениях  $x$

С использованием аналитических решений уравнений переходных процессов в компенсированных сетях 6-10 кВ и обмотках статора генераторов энергоблоков, а также моделирования на ЭВМ, определены основные параметры переходных токов и напряжений, влияющие на функционирование защит от ОЗЗ на основе ВГ. В компенсированных сетях 6-10 кВ к ним относятся:

- значения токов и напряжений переходного процесса (амплитуды и интегральные значения) и их соотношения;
- частотные характеристики переходных токов и напряжений (спектр частот, амплитудно-частотные характеристики, энергетические характеристики).

Основными факторами, влияющими на значения и частоты переходных токов при ОЗЗ, являются: суммарный емкостный ток сети  $I_{C\Sigma}$ , индуктивность источника питания  $L_{и}$ , удаленность  $l_3$  места ОЗЗ от шин источника питания, режим заземления нейтрали сети.

На основе расчетов установлено, что в зависимости от значений указанных выше влияющих факторов амплитуды разрядной составляющей переходного процесса могут достигать значений до  $\sim 3000$  А, зарядной до  $\sim 1000$  А; частоты разрядной составляющей находятся в диапазоне 3...30 кГц, зарядной в диапазоне 0,1...3 кГц (например, рис. 7).

Расчеты показали, что основная часть энергии (более 90%) свободных составляющих тока переходного процесса при ОЗЗ в кабельных сетях напряжением 6-10 кВ сосредоточена в спектральном диапазоне с верхней частотой  $f = 3-4$  кГц (рис. 8, 9).

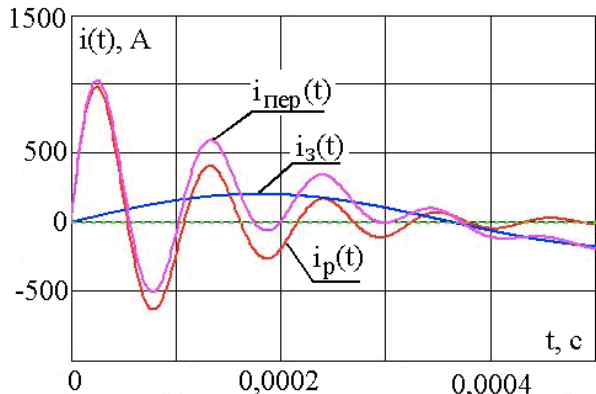


Рис. 7. Токи переходного процесса при ОЗЗ в сети 6 кВ с  $I_{C\Sigma} = 30$  А при удаленности места ОЗЗ от шин  $l_3 = 1$  км и  $\varphi = 90^\circ$

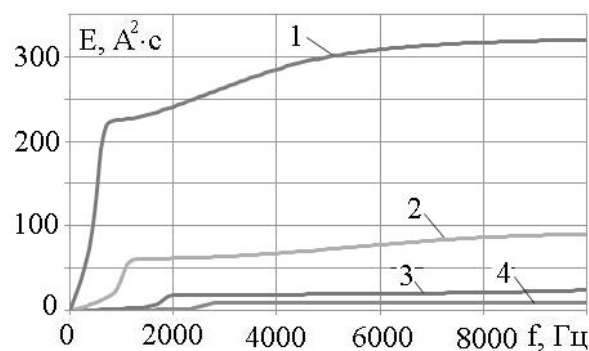


Рис. 8. Зависимость энергии свободных составляющих тока переходного процесса при ОЗЗ в сети с  $U_{ном} = 6$  кВ,  $I_k^{(3)} = 10$  кА при  $l_3 = 1$  км от частоты для различных значений суммарного емкостного тока сети  $I_{C\Sigma}$ : 1 -  $I_{C\Sigma} = 100$  А; 2 -  $I_{C\Sigma} = 30$  А; 3 -  $I_{C\Sigma} = 10$  А; 4 -  $I_{C\Sigma} = 5$  А

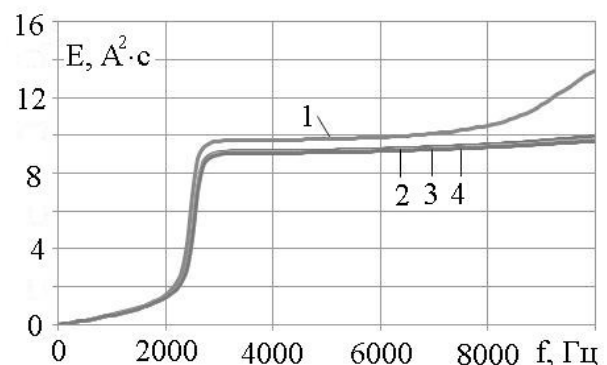


Рис. 9. Зависимость энергии свободных составляющих тока переходного процесса при ОЗЗ в сети с  $U_{ном} = 6$  кВ,  $I_k^{(3)} = 10$  кА и  $I_{C\Sigma} = 5$  А от частоты при различных значениях удаленности места ОЗЗ от шин  $l_3$ : 1 -  $l_3 = 0,1$  км; 2 -  $l_3 = 0,5$  км; 3 -  $l_3 = 1$  км; 4 -  $l_3 = 2$  км

Наиболее существенное влияние на верхнюю частоту указанного диапазона оказывают суммарный емкостный ток сети и индуктивность источника питания (величина тока трехфазного КЗ на шинах источника). Полученные результаты показывают, что без ущерба для эффективности функционирования при внутренних повреждениях защит от ОЗЗ, основанных на использовании электрических величин переходного процесса, рабочий диапазон частот можно ограничить верхней частотой  $f \leq 3-4$  кГц.

В отличие от переходных процессов в электрических сетях среднего напряжения амплитуды и частоты разрядной и зарядной составляющих при ОЗЗ в обмотке статора генераторов энергоблоков отличаются незначительно (например, рис. 10). Установлено, что при дуговых перемежающихся ОЗЗ вблизи нейтрали ( $x \leq 0,2$ ) среднееквадратичное значение тока в месте повреждения  $I_{эфф}$  может достигать значений до  $\sim 60$  А (рис. 10) при считающихся опасными по ПУЭ значениях  $I_{эфф} \cong 3-5$  А.

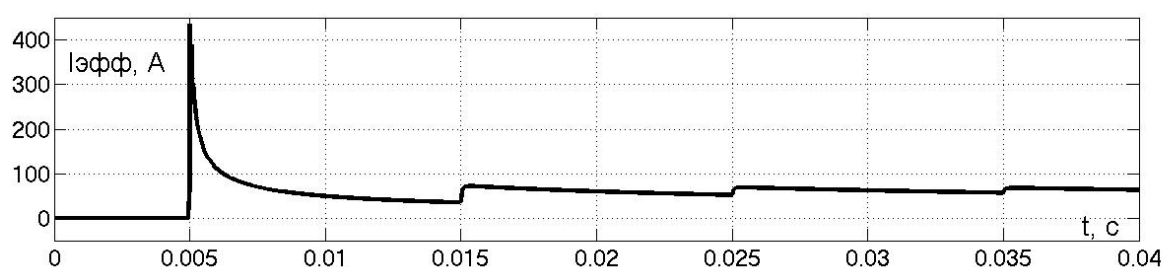


Рис. 10. Среднееквадратичное значение тока в месте повреждения при дуговом перемежающемся ОЗЗ по теории Белякова Н.Н. на выводах обмотки статора генератора (в функции времени)

Показано также, что в переходном режиме ОЗЗ нарушаются амплитудные и фазные соотношения напряжений 3-й гармоники в нейтрали и на выводах по сравнению с их соотношениями в установившемся режиме ОЗЗ, на использовании которых основан принцип действия защиты относительного замера (рис. 11).

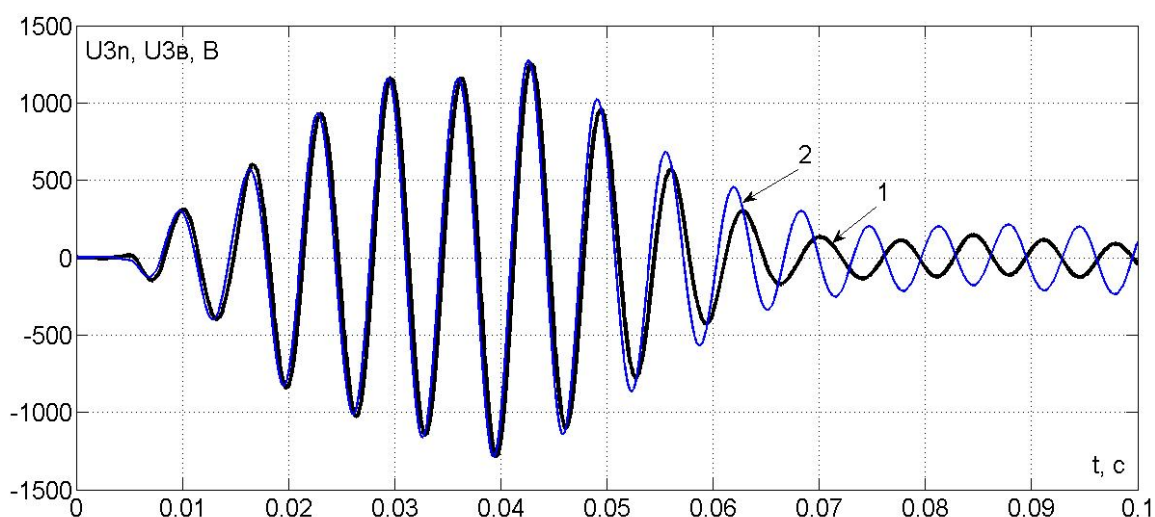


Рис. 11. Напряжения третьей гармоники в переходном и установившемся режиме при дуговом прерывистом ОЗЗ вблизи нейтрали обмотки статора генератора ( $x = 0,2$ ):  
1-напряжение  $u_{3N}$  в нейтрали; 2 – напряжение  $u_{30B}$  на выводах

**В третьей главе** приведены результаты исследований динамических режимов функционирования защит от замыканий на землю на основе ВГ.



Исследования выполнялись на математических моделях «объект - защита от ОЗЗ» и на реальных исполнениях устройств защиты компенсированных сетей 6-10 кВ и генераторов энергоблоков с использованием метода физико-математического моделирования.

Исследования на ЭВМ динамических режимов работы защит от ОЗЗ генераторов, основанных на способах относительного и абсолютного замера напряжения 3-й гармоники, выполнялись на математических моделях блоков 3-й гармоники (БТГ) наиболее широко применяемых микроэлектронных стопроцентных устройств защиты генераторов энергоблоков от ОЗЗ типа БРЭ 1301.01 (защита относительного замера) и БРЭ 1301.02 (защита абсолютного замера). Для этих целей по структурным схемам и полным принципиальным схемам в системе Matlab были разработаны математические модели всех функциональных узлов (рис. 12) и полные математические модели указанных устройств.

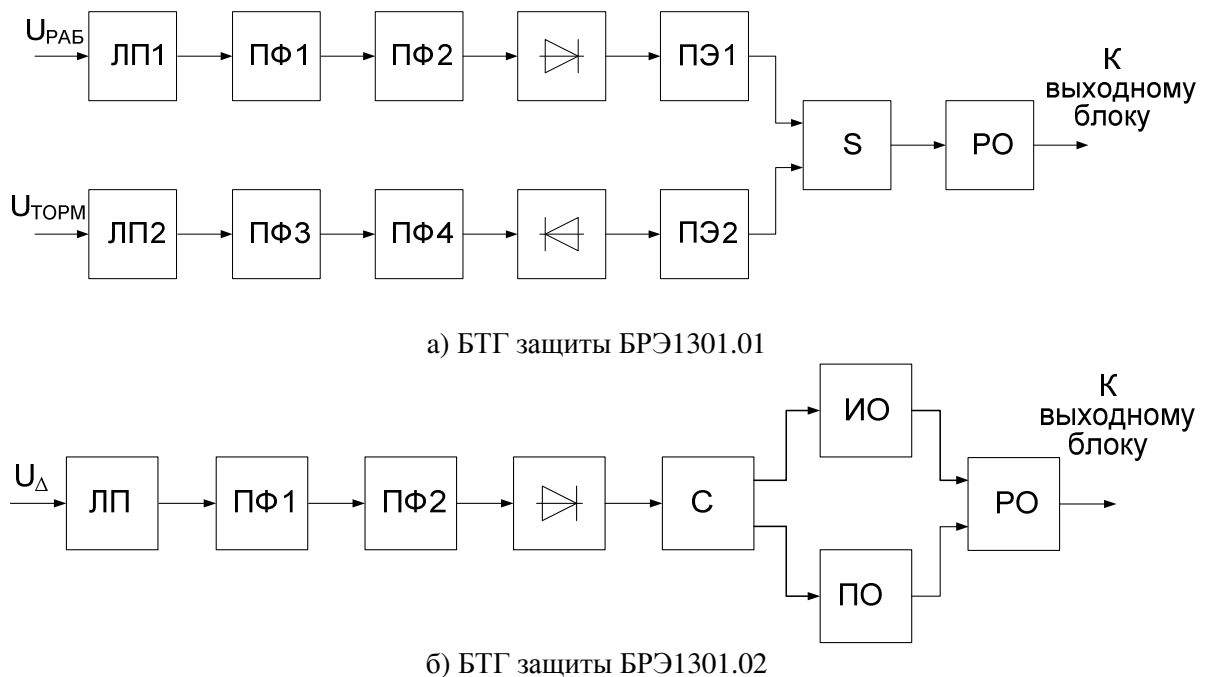


Рис. 12. Функционально-структурные схемы БТГ защит типа БРЭ 1301: ЛП – входной линейный преобразователь; ПФ – полосовой фильтр; ПЭ – пороговый элемент; S – сглаживающий сумматор; РО – реагирующий орган; С – сглаживатель; ИО – измерительный орган; ПО – пусковой орган; ЛЧ - логическая часть

Математические модели функциональных узлов БТГ защит серии БРЭ 1301 разработаны с представлением их в форме передаточных характеристик  $H(p) = U_{вых}(p)/U_{вх}(p)$  и в форме систем алгебро-дифференциальных уравнений, реализуемых в Matlab функционально-структурными схемами из интеграторов, линейных и нелинейных преобразователей.

Исследования проводились на модели генератора типа ТВВ-320-2 для различных режимов его работы (холостой ход, номинальная нагрузка) и разновидностей ОЗЗ (устойчивое, дуговое перемежающееся по теории Петерсена или Петерса и Слепяна при повреждениях на выводах и вблизи нейтрали –  $x = 0...0,4$ ). Установлено, что БТГ защиты БРЭ 1301.01 обеспечивает устойчивость срабатываний только при минимальных интервалах между повторными пробоями, равными  $0,5T_{50}$  (рис. 13). Показано, что заземление нейтрали блочного генератора через высокоом-

ный резистор или ДГР повышает динамическую устойчивость функционирования защиты БРЭ 1301.01 при дуговых прерывистых замыканиях вблизи нейтрали.

Причинами недостаточной динамической устойчивости функционирования защиты относительного замера напряжения 3-й гармоники являются отмеченные выше нарушения фазных и амплитудных соотношений между напряжениями  $U_{3N}$ , напряжения  $U_{03B}$  в переходных режимах, а также недостаточная степень подавления составляющей промышленной частоты фильтрами ПФ (рис. 12), приводящая к искажениям соотношений сравниваемых величин.

В отличие от защиты БРЭ 1301.01 БТГ защиты БРЭ 1301.02 может фиксировать однократные самоустраняющиеся пробой изоляции и дуговые прерывистые замыкания на землю в нейтрали обмотки статора и вблизи нее, в основном за счет инерционности фильтров ПФ (рис. 13) и схем выпрямления и сглаживания напряжения третьей гармоники.

Результаты исследований, полученные методом математического моделирования на ЭВМ, для защиты относительного замера были проверены экспериментально на реальном образце устройства типа БРЭ 1301.01 методом физико-математического моделирования с использованием полученных в системе Matlab тестовых сигналов, преобразованных в формат COMTRADE-осциллограмм (рис. 13) и программно-аппаратного комплекса РЕТОМ. Результаты экспериментальных исследований подтвердили результаты, полученные моделированием на ЭВМ.

С использованием метода физико-математического моделирования были проведены также экспериментальные исследования динамической устойчивости функционирования при дуговых перемежающихся ОЗЗ наиболее широко применяемых в компенсированных сетях 6-10 кВ устройств токовой защиты абсолютного замера ВГ типа УСЗ-2/2. Исследования показали, что УСЗ-2/2 может излишне срабатывать при интервалах между повторными пробоями, равными  $T_{50}/2 = 10$  мс. Для отстройки от таких дуговых ОЗЗ требуется увеличение тока срабатывания на разных уставках в  $8 \div 27$  раз, что приводит к недопустимому заглублению защиты и значительно ограничивает область её возможного применения.

На основе исследований, проведенных с использованием разработанных в системе Matlab моделей, показано, что наиболее высокой динамической устойчивостью функционирования при дуговых прерывистых ОЗЗ обладают комбинированные направленные устройства защиты, реагирующие как на высшие гармоники установившегося режима

замыкания на землю, так и на электрические величины переходного процесса. Такое устройство («Спектр» на микроэлектронной базе) разработано в ИГЭУ, однако в настоящее время не выпускается.

**В четвертой главе** приведены результаты разработки и исследований способов и средств повышения эффективности функционирования защит от ОЗЗ на основе ВГ компенсированных сетей 6-10 кВ и разработки алгоритмов их функционирования для использования в микропроцессорных защитах. С учетом приведенных выше результатов исследований принято, что наиболее актуальными являются за-

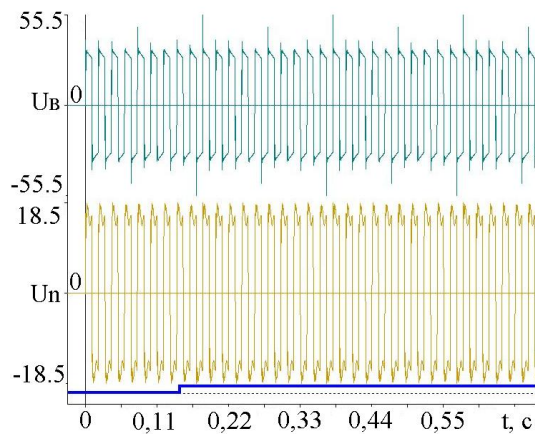


Рис. 13. Осциллограмма работы БТГ БРЭ 1301.01

дачи совершенствования токовых защит абсолютного замера и направленных защит от ОЗЗ, основанных на использовании ВГ.

Фазные соотношения между высшими гармоническими составляющими токов и напряжений нулевой последовательности в спектре частот до нескольких килогерц в установившихся и переходных режимах ОЗЗ, как показали исследования на математических моделях компенсированных сетей 6-10 кВ, с достаточной точностью определяются соотношениями:

$$i_{0\text{ повр}}^{(BГ)} \approx -(C_{0\Sigma} - C_{0\text{собс.повр}}) \frac{du_0^{(BГ)}}{dt}; \quad (17)$$

$$i_{0\text{ неп}}^{(BГ)} \approx C_{0\text{собс.неп}} \frac{du_0^{(BГ)}}{dt}. \quad (18)$$

Используя соотношения (17) и (18), можно контролировать направление мощности высших гармонических составляющих как в установившихся, так и в переходных режимах ОЗЗ.

В устройстве типа «Спектр» контроль направления мощности в переходных режимах осуществляется на основе соотношения

$$J_1 = \int_0^{t_n} \text{sign}(i_0^{(BГ)}(t)) \cdot \text{sign}\left(\frac{du_0^{(BГ)}(t)}{dt}\right) dt, \quad (19)$$

в котором, с учетом специфики микроэлектронных устройств, предусматривается ограничение уровней входных сигналов, что приводит к частичной потере информации.

Контроль направления мощности ВГ нулевой последовательности может быть осуществлен также на основе соотношений:

$$J_2 = \int_0^{t_n} i_0^{(BГ)}(t) \cdot \frac{du_0^{(BГ)}(t)}{dt} dt; \quad (20)$$

$$J_3 = \max_{0 < \tau < t_n} \int_0^{t_n} i_0^{(BГ)}(t + \tau) \cdot \frac{du_0^{(BГ)}(t)}{dt} dt, \quad (21)$$

На устойчивость функционирования направленных защит от ОЗЗ, основанных на использовании электрических величин переходного процесса, существенное влияние могут оказывать прежде всего угловые погрешности ТТНП элементов схемы формирования сравниваемых величин, возрастающие в переходных режимах. На основе исследований на математических моделях показано, что наиболее высокую устойчивость к влиянию угловых погрешностей ТТНП и других элементов входных цепей защиты обеспечивает способ, основанный на вычислении взаимной корреляционной функции для высших гармонических составляющих в токе и производной напряжения нулевой последовательности.

Для повышения динамической устойчивости несрабатываний при внешних дуговых ОЗЗ и чувствительности при внутренних ОЗЗ токовых защит абсолютного замера на основе ВГ предложено использовать принцип торможения. Исследованы два способа торможения: от токов переходного процесса и от составляющей промышленной частоты. Недостатком первого способа является возможность отказов срабатывания при внутренних дуговых прерывистых ОЗЗ. Использование

торможения от составляющей промышленной частоты позволяет расширить область применения токовых защит абсолютного замера ВГ по величине  $I_{C\text{собс}^*} = I_{C\text{собс}} / L_{C\Sigma}$ .

Разработаны требования к выполнению и функционально-логические схемы индивидуальной направленной комбинированной защиты от ОЗЗ для компенсированных сетей 6-10 кВ и многофункционального централизованного устройства селективной сигнализации замыканий на землю для сетей с различными режимами заземления нейтрали, основанных на применении рассмотренных способов.



Рис. 14. Макетный образец централизованного микропроцессорного устройства защиты от ОЗЗ

На основе указанных требований, функционально-логических схем и разработанных алгоритмов ООО НПП «АЛИМП» (Нижний Новгород) совместно с ИГЭУ ведется разработка индивидуальной и централизованной микропроцессорных защит от ОЗЗ для сетей 6-10 кВ. Испытания макетного образца централизованного варианта защиты от ОЗЗ (рис. 14), проведенные с использованием метода физико-математического моделирования с применением устройства РЕТОМ и на трехфазной физической модели электрической сети 6-10 кВ подтвердили работоспособность и эффективность принятых принципов их выполнения.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. В компенсированных электрических сетях 6-10 кВ и на генераторах энергоблоков получили широкое применение защиты от ОЗЗ на основе ВГ. На устойчивость функционирования указанных защит существенное влияние оказывают электромагнитные переходные процессы при дуговых ОЗЗ. Опыт эксплуатации показывает, что указанные защиты не всегда обеспечивают требуемую устойчивость функционирования при дуговых ОЗЗ.

2. В целях диагностики состояния изоляции компенсированных сетей 6-10 кВ и обмоток статора генератора энергоблоков защиты от ОЗЗ должны реагировать не только на устойчивые, но и на дуговые прерывистые ОЗЗ и однократные самоустраниющиеся пробой изоляции. С учетом этого разработка и исследование способов и средств, обеспечивающих повышение динамической устойчивости функционирования защит от ОЗЗ на основе ВГ, и исследование параметров переходных процессов, влияющих на работу указанных защит от ОЗЗ, актуальны.

3. На основе анализа известных принципов выполнения и исполнений защит от ОЗЗ показано, что в компенсированных электрических сетях России наиболее широкое применение получили токовые защиты от ОЗЗ, основанные на использовании способов абсолютного и относительного замера ВГ в токах нулевой последовательности, а для выполнения стопроцентных защит от ОЗЗ в обмотках статора генераторов энергоблоков – защиты относительного замера напряжения 3-й гармоники.

4. Получено аналитическое решение уравнений переходного процесса при ОЗЗ вблизи нейтрали обмотки статора генератора энергоблока, обеспечивающее достаточную точность определения напряжений 3-й гармоники в нейтрали и на выводах и эффективного значения тока в месте повреждения в переходных режимах ОЗЗ.

5. С использованием аналитического решения и моделирования на ЭВМ определены основные параметры и диапазоны изменения электрических величин переходного процесса при ОЗЗ, влияющие на эффективность функционирования защит от ОЗЗ в компенсированных сетях 6-10 кВ и обмотках статора генераторов энергоблоков.

6. Разработаны комплексные математические модели «защищаемый объект – устройство защиты» в системе Matlab для исследования на ЭВМ динамических режимов функционирования защит от замыканий на землю, основанных на использовании ВГ, для электрических сетей 6-10 кВ и генераторов, работающих в блоке с трансформаторами.

7. С использованием математических моделей компенсированных сетей 6-10 кВ и генераторов энергоблоков создан банк тестовых сигналов токов и напряжений переходных процессов при ОЗЗ, преобразованных в формат COMTRADE-осциллограмм, для экспериментальных исследований реальных образцов защит от ОЗЗ на основе ВГ с применением программно-аппаратного комплекса РЕТОМ.

8. Разработаны полные математические модели в системе Matlab микроэлектронных защит генераторов энергоблоков от ОЗЗ в обмотке статора, основанных на способах относительного и абсолютного замера напряжений 3-й гармоники.

9. На основе исследований, выполненных на математических моделях «защищаемый объект – устройство защиты от ОЗЗ» и экспериментальных исследований, выполненных с использованием тестовых сигналов методом физико-математического моделирования, установлено, что микроэлектронные устройства защит генераторов на принципе относительного замера напряжений 3-й гармоники (типа БРЭ 1301.01) способны фиксировать дуговые ОЗЗ только при минимальных интервалах между пробоями  $T_{50}/2 = 10$  мс. Защиты абсолютного замера напряжения 3-й гармоники (типа БРЭ 1301.02) обеспечивает возможность фиксации однократных самоустраняющихся пробоев изоляции.

10. На основе исследований возможных способов выполнения комбинированной направленной защиты от ОЗЗ показано, что наибольшую статическую и динамическую устойчивость функционирования обеспечивает способ, основанный на вычислении взаимной корреляционной функции для высших гармонических составляющих в токе и производной напряжения нулевой последовательности.

11. Предложены способы повышения динамической устойчивости токовых защит абсолютного замера ВГ с использованием торможения от токов переходного процесса и составляющей промышленной частоты, обеспечивающие расширение области их применения.

12. Разработанные алгоритмы токовых и токовой направленной защит от ОЗЗ в компенсированных сетях 6-10 кВ реализуются в микропроцессорных устройствах защит, разрабатываемых ООО НПП «Алимп» (г. Нижний Новгород) совместно с ИГЭУ. Испытания макетного образца микропроцессорной защиты, проведенные с использованием метода физико-математического моделирования с применением устройства РЕТОМ и на трехфазной физической модели электрической сети 6-10 кВ, подтвердили работоспособность и эффективность принятых принципов их выполнения.

## ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Монография

1. **Шагурина Е.С.** Защиты от замыканий на землю. Повышение динамической устойчивости функционирования защит, основанных на использовании электрических величин промышленной частоты - LAP LAMBERT Academic Publishing, 2011. 152с.

### По перечню рецензируемых изданий ВАК

2. Шуин В.А., Фролова О.В., Сарбеева О.А., **Чугрова (Шагурина) Е.С.** Математические модели электрических сетей среднего напряжения для исследования дуговых прерывистых замыканий на землю // Вестник ИГЭУ, 2005. Вып. 6. – С. 81-89.

3. **Чугрова (Шагурина) Е.С.**, Шуин В.А. Математическое моделирование защиты от замыканий на землю в обмотке статора генератора, работающего в блоке с трансформатором // Вестник ИГЭУ, 2006. Вып. 5. – С. 164-172.

4. Шуин В.А., Сарбеева О.А., **Чугрова (Шагурина) Е.С.** Влияние электромагнитных переходных процессов на функционирование токовых защит от замыканий на землю в электрических сетях 6-10 кВ. // Вестник ИГЭУ, 2009. Вып. 4. – С. 84-91.

5. Шуин В.А., Сарбеева О.А., **Шагурина Е.С.**, Ганджаев Д.И. Особенности использования электрических величин переходного процесса в защитах от замыканий на землю электрических сетей 6-10 кВ // Вестник ИГЭУ, 2011. Вып. 1 – С. 32-41.

### Публикации в других изданиях

6. Шуин В.А., **Чугрова (Шагурина) Е.С.** Исследование работы защиты генератора от замыканий на землю в обмотке статора типа БРЭ-1301.01 на математической модели. ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА: Материалы региональной научно-технической конференции студентов и аспирантов / ГОУ ВПО Ивановский государственный энергетический университет. – Иваново, 2008. – Том 3, с. 31-36.

7. Шуин В.А., Шаброва М.А., **Чугрова (Шагурина) Е.С.** Об особенностях функционирования стопроцентной защиты генераторов от замыканий на землю типа БРЭ 1301.01 при дуговых повреждениях. Электроэнергетика России: современное состояние, проблемы и перспективы: Сб. науч. тр. / Под ред. М. Ш. Мисриханова, Д. Р. Любарского, В. А. Шуина. – М.: Энергоатомиздат, 2008, с. 466-474.

8. **Чугрова (Шагурина) Е.С.**, Шуин В.А. Исследование работы 100%-й защиты от замыканий на землю в обмотке статора генератора, работающего в блоке с трансформатором, при дуговых прерывистых повреждениях // Материалы международной конференции CIGRE «Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем». Москва, 2009. – С. 470-474.

9. Шуин В.А., Сарбеева О.А., **Чугрова (Шагурина) Е.С.** Имитационное моделирование динамических режимов функционирования защит от замыканий на землю. ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА: Материалы региональной научно-технической конференции студентов и аспирантов / ГОУ ВПО Ивановский государственный энергетический университет. – Иваново, 2009. С. 32-41.

10. Шуин В.А., Сарбеева О.А., **Чугрова (Шагурина) Е.С.** Исследование условий устойчивости функционирования токовых защит нулевой последовательности при дуговых перемежающихся замыканиях на землю в сетях 6-10 кВ. ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА: Материалы региональной научно-технической конференции студентов и аспирантов / ГОУ ВПО Ивановский государственный энергетический университет. – Иваново, 2009.

11. Шуин В.А., Сарбеева О.А., **Чугрова (Шагурина) Е.С.** Спектральные характеристики тока переходного процесса при однофазных замыканиях на землю в кабельных сетях 6-10 кВ // Повышение эффективности работы энергосистем: Тр. ИГЭУ. Вып. IX / Под ред. В.А. Шуина, М.Ш. Мисриханова, А.В. Мошкарина. – М.: Энергоатомиздат, 2009. – 572 с. С. 313-324.

12. Шуин В.А., Сарбеева О.А., **Чугрова (Шагурина) Е.С.** Влияние режима заземления нейтрали электрической сети 6-19 кВ на функционирование токовых защит от однофазных замыканий на землю // Повышение эффективности работы энергосистем: Тр. ИГЭУ. Вып. IX / Под ред. В.А. Шуина, М.Ш. Мисриханова, А.В. Мошкарина. – М.: Энергоатомиздат, 2009. – 572 с. С. 490-505.

13. **Чугрова (Шагурина) Е.С.** Математическая модель защиты от замыканий на землю в обмотке статора генератора типа БРЭ 1301 (ЗЗГ-11) // Повышение эффективности работы энергосистем: Тр. ИГЭУ. Вып. IX / Под ред. В.А. Шуина, М.Ш. Мисриханова, А.В. Мошкарина. – М.: Энергоатомиздат, 2009. – 572 с. С. 506-521.

14. Шуин В.А., Сарбеева О.А., **Чугрова (Шагурина) Е.С.** Повышение эффективности функционирования токовых защит от замыканий на землю электрических сетей 6-10 кВ при дугowych прерывистых замыканиях на землю // Доклады Международной специализированной выставки "Электрические сети России 2009" Код доступа [<http://www.advis.ru/cgi-bin/new.pl?C54C25CE-C131-4A40-B44D-14C8A3B49129>].

15. Шуин В.А., **Чугрова (Шагурина) Е.С.** Влияние электромагнитных переходных процессов при дугowych прерывистых замыканиях на землю на функционирование защиты генераторов типа БРЭ 1301 // Доклады Международной специализированной выставки "Электрические сети России 2009" Код доступа [<http://www.advis.ru/cgi-bin/new.pl?C54C25CE-C131-4A40-B44D-14C8A3B49129>].

16. Шуин В.А., **Чугрова (Шагурина) Е.С.** Математическая модель защиты генератора типа ЗЗГ-12 от замыканий на землю в обмотке статора. ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА: Материалы региональной научно-технической конференции студентов и аспирантов / ГОУ ВПО Ивановский государственный энергетический университет. – Иваново, 2010. С. 48-66.

17. Шуин В.А., Сарбеева О.А., **Чугрова (Шагурина) Е.С.** Информационные характеристики переходных токов при замыканиях на землю в сетях 6-10 кВ. ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА: Материалы региональной научно-технической конференции студентов и аспирантов / ГОУ ВПО Ивановский государственный энергетический университет. – Иваново, 2010. С. 105-118.

18. Шуин В.А., Сарбеева О.А., **Чугрова (Шагурина) Е.С.** Динамическая устойчивость токовых защит от однофазных замыканий на землю. Релейная защита и автоматика энергосистем: Сборник докладов XX конференции (Москва, 1-4 июня 2010). – Москва: «Научно-инженерное информационное агентство», 2010. С. 317-324.

19. Шуин В.А., Сарбеева О.А., **Чугрова (Шагурина) Е.С.** Токовые защиты от замыканий на землю. Исследование динамических режимов функционирования // Новости ЭлектроТехники. Информационно-справочное издание. №2(62) 2010. С. 36-40.

20. Шуин В.А., **Шагурина Е.С.** Методика определения параметров математической модели для исследования волновых и переходных процессов при однофазных замыканиях на землю в обмотке статора генераторов // ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА: Материалы региональной научно-технической конференции студентов и аспирантов / ГОУ ВПО Ивановский государственный энергетический университет. – Иваново, 2011. – том 3, С. 47-53.

21. Шуин В.А., Сарбеева О.А., **Шагурина Е.С.** Информационные параметры электрических величин переходного процесса для использования в защитах от замыканий на землю сетей среднего напряжения // Сборник докладов Международной научно-технической конференции «Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем» – Санкт-Петербург, 2011.

22. Шуин В.А., Сарбеева О.А., **Шагурина Е.С.**, Куликов А.Л., Петрухин А.А. Централизованная система селективной сигнализации замыканий на землю и диагностики изоляции распределительных сетей среднего напряжения // Сборник докладов Международной научно-технической конференции «Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем» – Санкт-Петербург, 2011.

23. **Чугрова (Шагурина) Е.С.**, Шуин В.А. Исследование защиты от замыканий на землю в обмотке статора генераторов 300 МВт Костромской ГРЭС на математической модели // РАДИОЭЛЕКТРОНИКА, ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭНЕРГЕТИКА // Четырнадцатая Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов: Тез. докл. В 3-х т. – М.: Издательский дом МЭИ, 2008. Т. 3, с. 307-308.

24. Шуин В.А., Сарбеева О.А., **Чугрова (Шагурина) Е.С.** Физико-математическое моделирование динамических режимов функционирования токовых защит от замыканий на землю // РАДИОЭЛЕКТРОНИКА, ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭНЕРГЕТИКА // Шестнадцатая Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов: Тез. докл. В 3-х т. Т. 3. М.: Издательский дом МЭИ, 2010. С. 515-516.

25. Шуин В.А., **Шагурина Е.С.** Исследование способов выполнения цифровой направленной импульсной защиты от замыканий на землю в компенсированных сетях 6-10 кВ // РА-

ДИОЭЛЕКТРОНИКА, ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭНЕРГЕТИКА // Семнадцатая Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов: Тез. докл. В 3-х т. М.: Издательский дом МЭИ, 2011.

26. Шуин В.А., **Чугрова (Шагурина) Е.С.** О влиянии режима заземления нейтрали блочного генератора на эффективность функционирования защиты от замыканий на землю при дуговых неустойчивых повреждениях в обмотке статора // Тезисы докладов научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электротехнологии» (XV Бенардосовские чтения) / ГОУ ВПО Ивановский государственный энергетический университет. – Иваново, 2009.

27. Шуин В.А., Лифшиц А.С., Сарбеева О.А., **Чугрова (Шагурина) Е.С.** Тестовые сигналы для исследования динамических режимов функционирования защит от замыканий на землю в сетях 6-10 кВ // Тезисы докладов научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электротехнологии» (XV Бенардосовские чтения) / ГОУ ВПО Ивановский государственный энергетический университет. – Иваново, 2009.

28. Шуин В.А., Сарбеева О.А., **Чугрова (Шагурина) Е.С.** Оценка условий устойчивости токовых защит от замыканий на землю в сетях 6-10 кВ при дуговых повреждениях // Тезисы докладов научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электротехнологии» (XV Бенардосовские чтения) / ГОУ ВПО Ивановский государственный энергетический университет. – Иваново, 2009.

29. **Шагурина Е.С.** Исследование алгоритмов направленных защит от однофазных замыканий на землю, основанных на использовании переходных процессов // Тезисы докладов научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электротехнологии» (XVI Бенардосовские чтения) / ГОУ ВПО Ивановский государственный энергетический университет. – Иваново, 2011. – I том, с.143-146.

30. Шуин В.А., Сарбеева О.А., **Шагурина Е.С.**, Куликов А.Л., Петрухин А.А. Исследование способа выполнения централизованной микропроцессорной системы сигнализации однофазных замыканий на землю в сетях 6-10 кВ // Тезисы докладов научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электротехнологии» (XVI Бенардосовские чтения) / ГОУ ВПО Ивановский государственный энергетический университет. – Иваново, 2011. – I том, с.133-136.

31. **Чугрова (Шагурина) Е.С.** Исследование работы защиты генератора типа БРЭ 1301.01 при дуговых прерывистых замыканиях на землю // Тезисы докладов итоговой конференции конкурса научных работ студентов ОАО «Концерн Энергоатом» «Знания молодых ядерщиков – атомным станциям». Обнинск, 2009.

32. Шуин В.А., Сарбеева О.А., **Чугрова (Шагурина) Е.С.** Исследование динамических режимов функционирования токовых защит нулевой последовательности от замыканий на землю в электрических сетях 6-10 кВ // Тезисы докладов итоговой конференции конкурса научных работ студентов ОАО «Концерн Энергоатом» «Знания молодых ядерщиков – атомным станциям» - Обнинск, 2009. С. 73-75.

33. **Чугрова (Шагурина) Е.С.**, Сарбеева О.А. Исследование работы защиты генератора типа БРЭ 1301.02 при дуговых прерывистых замыканиях на землю // Итоговая конференция конкурса научных работ студентов ОАО «Концерн Росэнергоатом» «Знания молодых ядерщиков – атомным станциям»: Тезисы докладов. М.: НИЯУ МИФИ, 2010. С. 55-56.