

На правах рукописи

СОЛОВЬЁВ ИГОРЬ ВАЛЕРЬЕВИЧ

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ УПРАВЛЕНИЯ КОМПЕНСАЦИЕЙ
ЕМКОСТНЫХ ТОКОВ ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ В
РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ**

Специальность 05.14.02 – Электрические станции и
электроэнергетические системы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Чебоксары – 2018

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

Научный руководитель: Булычев Александр Витальевич, доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: Долгополов Андрей Геннадьевич, доктор технических наук, старший научный сотрудник, профессор кафедры релейной защиты и автоматизации федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Успенский Михаил Игоревич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник лаборатории энергетических систем федерального государственного бюджетного учреждения науки институт социально-экономических и энергетических проблем Севера Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук

Ведущая организация: федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Защита диссертации состоится «28» сентября 2018 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета Д 212.301.02 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова» по адресу г. Чебоксары, ул. Университетская, д. 38, учебный корпус 3, зал заседаний Ученого совета, к. 301.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке Чувашского государственного университета имени И. Н. Ульянова по адресу: 428034, Чувашская Республика, г. Чебоксары, ул. Университетская, д. 38 и на сайте www.chuvsu.ru.

Автореферат разослан «21» мая 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.301.02
к.т.н., доцент

Серебрянников А.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Стремление повысить надежность и электробезопасность, обеспечить бесперебойность электроснабжения и долговечность изоляции электрооборудования, в условиях постоянно изменяющейся конфигурации распределительной сети, вызывает необходимость в компенсации емкостных токов однофазных замыканий на землю (ОЗЗ). Для этих целей в сетях среднего напряжения применяют дугогасящие реакторы (ДГР), позволяющие компенсировать основную гармонику емкостной составляющей тока ОЗЗ.

В связи с этим возникает необходимость автоматической настройки плавно регулируемых ДГР, обусловленная изменением конфигурации (емкости) сети в процессе эксплуатации. При этом способы автоматической настройки компенсации, основанные на амплитудно-фазовых характеристиках контура нулевой последовательности сети, во многих случаях некорректны, требуют искусственного смещения нейтрали, и как следствие, неприменимы. Все это приводит к необходимости пересмотра алгоритмов автоматической настройки ДГР в части новых способов оценки параметров сети и алгоритмов автоматической настройки на резонансный режим компенсации.

В таких условиях совершенствование способов оценки параметров сети и алгоритмов автоматической настройки на резонансный режим компенсации в распределительных электрических сетях с нейтралью, заземленной через ДГР, играет важную роль в повышении надежности и электробезопасности, обеспечении бесперебойности электроснабжения и долговечности изоляции электрооборудования и представляет собой значимую и актуальную научно-техническую задачу, решение которой и составляет содержание настоящей диссертационной работы.

Цель работы

Совершенствование управления компенсацией емкостных токов ОЗЗ в распределительных электрических сетях на основе разработанного и исследованного автором способа оценки параметров контура нулевой последовательности (КНП) сети и алгоритмов для автоматической настройки ДГР.

Основные задачи исследования:

- анализ существующих способов управления компенсацией емкостных токов замыкания на землю в электрических сетях;
- обоснование направления совершенствования способов оценки параметров КНП сети и автоматического управления компенсацией емкостных токов замыкания на землю в электрических сетях;
- разработка и исследование способа оценки параметров КНП сети с компенсацией емкостного тока;
- разработка и исследование способа автоматической настройки ДГР на заданный режим компенсации емкостного тока.

Объект исследования – распределительные сети с компенсацией емкостного тока однофазного замыкания на землю.

Предмет исследования – свойства сетей с компенсацией емкостного тока и устройства автоматической настройки ДГР.

Методы научных исследований базируются на фундаментальных положениях общей теории электрических цепей, теоретических основ электротехники, теории автоматического управления, теории релейной защиты, методах статистических испытаний, методах математического, физического и программного моделирования.

Достоверность и обоснованность результатов обеспечивается за счет корректного применения общей теории электрических цепей, теоретических основ электротехники, теории автоматического управления, теории релейной защиты и подтверждается совпадением результатов исследований автора, проведенных на макете КНП сети, с результатами натурных испытаний на ряде подстанций, а также косвенными показателями правильного режима компенсации.

Основные научные положения, выносимые на защиту:

1. Способ оценки параметров сети с компенсацией емкостного тока, позволяющий проводить расчет текущего значения расстройки и добротности КНП сети.

2. Способ автоматической настройки ДГР по отклонению текущего значения расстройки компенсации от её целевого значения, позволяющий повысить точность автоматической настройки плавнорегулируемых ДГР.

3. Новые алгоритмы оценки параметров сети и управления режимами компенсации емкостной составляющей тока ОЗЗ и программы реализации этих алгоритмов.

Научная новизна работы:

1. Предложенный и исследованный способ оценки параметров сети с компенсацией емкостного тока, позволяющий проводить расчёт текущего значения расстройки и добротности КНП сети отличается от известных тем, что основан на оценке частоты и коэффициента затухания сигнала свободной составляющей, выделенной из переходного процесса, протекающего в результате импульсного воздействия на контур.

2. Отличие предложенного и исследованного способа автоматической настройки ДГР в том, что он реализуется по отклонению текущего значения расстройки компенсации от её целевого значения. Это позволяет повысить точность настройки плавнорегулируемых ДГР в сетях с большими потерями и учитывать режим параллельной работы секций.

3. В разработанных алгоритмах оценки параметров сети и управления режимами компенсации емкостной составляющей тока ОЗЗ, в отличие от имеющихся, учтены все существенные ограничения реализуемости новых способов настройки ДГР, возникающие в действующих электрических сетях.

Практическая значимость и реализация результатов работы:

1. Предложенные способы оценки параметров сети, автоматической настройки ДГР и реализующие их алгоритмы позволяют повысить надежность и бесперебойность электроснабжения, электробезопасность и долговечность изоляции электрооборудования.

2. Разработанный способ оценки параметров сети с компенсацией емкостного тока использован ООО «НПП Бреслер» при создании типовых устройств и шкафов автоматики ДГР для распределительных сетей среднего напряжения. Применение способа оценки параметров сети позволяет повысить точность настройки на резонанс, расширить круг сетей, в которых обеспечивается стабильная работа устройства автоматики без применения дополнительных мер по созданию искусственной несимметрии.

3. Теоретические и практические результаты работы использованы в учебном процессе в Чувашском государственном университете и в Институте повышения квалификации специалистов релейной защиты и автоматики.

Апробация диссертационной работы

Результаты исследований обсуждались на следующих научных семинарах и конференциях: III и V Республиканских конференциях молодых специалистов «Электротехника, электромеханика, электроэнергетика» (Чебоксары, 2005, 2007), VI Всероссийской научно-технической конференции «Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике» (Чебоксары, 2006), XXVIII, XXIX и XXX Всероссийских семинарах «Кибернетика энергетических систем» (Новочеркасск, 2006, 2007, 2008), VII Всероссийской научно-технической конференции «Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем» (Чебоксары, 2007), XX, XXI и XXII Международных научных конференциях «Математические методы в технике и технологиях» (Ярославль, 2007; Саратов, 2008; Псков, 2009), IV Международной научно-практической конференции «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем России» (Чебоксары, 2017).

Публикации

Основные положения и результаты диссертации отражены в 39 печатных работах, в том числе: 7 статей опубликованы в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки Российской Федерации, получено 4 патента на изобретение, 2 патента на полезную модель и 1 свидетельство о регистрации программ для ЭВМ.

Личный вклад соискателя

В работах, опубликованных в соавторстве, автору принадлежит разработка способов оценки частоты собственных колебаний в КНП сети, их практическая реализация для настройки ДГР, анализ и интерпретация экспериментальных данных, обработка сигналов и математическое моделирование, постановка и участие в экспериментальных исследованиях, разработка и реализация алгоритмов, синтез и анализ систем управления.

При работе над диссертацией и практической реализации теоретических решений и рекомендаций автор пользовался консультациями главного конструктора ООО «НПП Бреслер», кандидата технических наук, доцента В.Н. Козлова.

Объем работы и ее структура. Работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 87 наименований, 4 приложений, 57 рисунков. Общий объем работы – 120 страниц: текст диссертации – 91 страниц, список литературы – 10 страниц, приложения – 19 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во *введении* обоснована актуальность работы, сформулированы цель и задачи исследования, отмечается научная новизна и практическая значимость, определен круг вопросов, рассматриваемых в диссертации.

В *первой главе* рассмотрена задача компенсации емкостного тока при ОЗЗ. Одним из допустимых режимов нейтрали распределительной сети является режим компенсированной нейтрали, при котором емкостная составляющая тока в месте ОЗЗ компенсируется индуктивной составляющей тока ДГР. Действующие в настоящее время нормативные документы [ПУЭ, ПТЭ ЭСиС] не допускают эксплуатацию распределительной сети в случаях превышения значения емкостных токов замыкания на землю, установленных нормативами для соответствующего класса напряжения. Так возникает задача поддержания полной компенсации емкостной составляющей тока ОЗЗ. Условием полной компенсации является резонанс токов ($I_L=I_C$) в контуре нулевой последовательности сети. Отклонение от резонансной настройки, называемое расстройкой, возникает при изменениях конфигурации сети и должно быть ликвидировано путем изменения настройки ДГР.

В условиях изменяющейся конфигурации распределительной сети задача может быть эффективно решена лишь с использованием устройств автоматической настройки ДГР.

Проведен сравнительный анализ способов управления компенсацией емкостных токов замыкания на землю в распределительных электрических сетях. Наиболее распространенными способами контроля расстройки сети являются амплитудный и фазовый принципы настройки ДГР.

Амплитудный принцип настройки предполагает слежение за напряжением смещения нейтрали. Резонанс контура определяется как точка экстремума амплитудной характеристики контура.

Фазовый принцип настройки заключается в слежении за фазой вектора напряжения смещения нейтрали относительно вектора опорного напряжения. В зависимости от принятого опорного напряжения резонансная настройка будет наблюдаться при некотором заранее определенном значении угла вектора напряжения несимметрии.

Стабильная работа этих способов возможна только в случае создания искусственной несимметрии сети. Способы подвержены влиянию различного рода помех и могут работать неправильно в областях расстроек, далеких от резонанса.

Известны способы измерения параметров сети путем наложения сигнала промышленной частоты. Реализация этих способов приводит к появлению в сети

дополнительных несвойственных ей гармонических составляющих, требует вмешательства в схему сети, применения дополнительного оборудования, а увеличенное время измерения параметров сети приводит к снижению точности настройки и увеличению времени реакции системы на изменение параметров сети.

Предложена концепция совершенствования автоматического управления компенсацией емкостных токов замыкания на землю. Контур нулевой последовательности сети в первом приближении является колебательным звеном второго порядка. Переходный процесс в данном контуре, описываемый дифференциальным уравнением, складывается из принужденной и свободной составляющих. Свободная составляющая переходного процесса не зависит от действующих в сети источников и определяется исключительно индуктивностью ДГР и емкостью сети. Частота свободных колебаний определяет расстройку компенсации и не зависит от различного рода помех и наводок. Измерение частоты свободных (собственных) колебаний контура нулевой последовательности сети позволит разработать устройство автоматической настройки дугогасящих реакторов, работа которого не зависит от искусственной несимметрии сети и не подвержена влиянию различного рода помех.

Определены основные требования к устройству автоматического управления компенсацией емкостного тока:

1. Работоспособность как в кабельных, так и в воздушных и смешанных сетях без искусственного смещения нейтрали.
2. Принципиальная совместимость системы с любым типом дугогасящего реактора.
3. Точность автоматической настройки (погрешность не более 1%).
4. Возможность работы автоматики в параллельных режимах работы секций.
5. Работоспособность в максимально возможном диапазоне изменения индуктивного тока реактора, емкостного тока сети и величины активных потерь.
6. Совместимость с цифровыми системами автоматики и управления электроэнергетических систем и удобство эксплуатации: возможность связи с системой АСУ, регистрация и осциллографирование событий.

Обосновано заключение об актуальности компенсации емкостных токов замыкания на землю и необходимости поддержания контура сети в резонансном режиме заземления нейтрали с целью заблаговременной подготовки сети к однофазному замыканию и его скорейшего подавления. Сформулирована задача: разработать эффективный способ оценки параметров КНП сети и алгоритм автоматического управления компенсацией, с учетом недостатков, присущих известным методам.

Во *второй главе* показано аналитическое решение задачи измерения параметров КНП сети на основе измерения частоты свободных колебаний.

Разработана математическая модель электрической сети применительно к новому методу управления компенсацией емкостных токов при ОЗЗ. В первом приближении трехфазная распределительная сеть с компенсацией емкостного тока может быть представлена упрощенной эквивалентной схемой (рисунок 1).

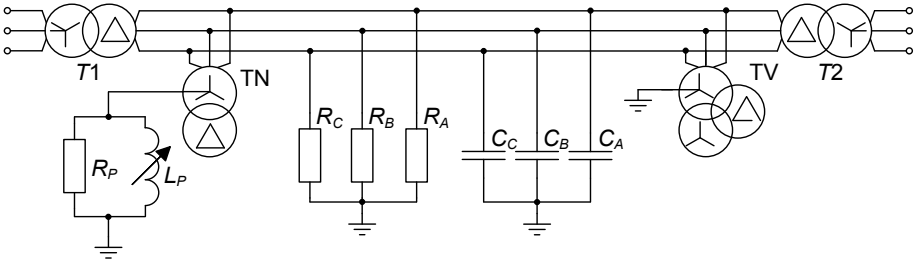


Рисунок 1 – Упрощенная эквивалентная схема электрической сети; T_1, T_2 – силовые трансформаторы; R_A, R_B, R_C – сопротивления изоляции фаз сети на землю; C_A, C_B, C_C – емкости фаз сети на землю; TV – измерительный трансформатор напряжения; TN – нейтралеобразующий трансформатор; R_p – активные потери ДГП; L_p – индуктивность ДГП

Для описания процессов в КНП сети упрощенная эквивалентная схема представлена в виде однолинейной эквивалентной схемы замещения (рисунок 2).

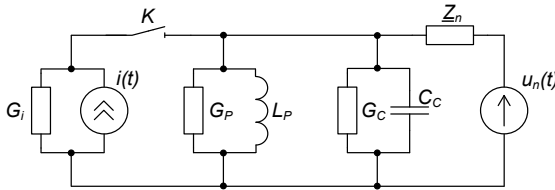


Рисунок 2 – Однолинейная эквивалентная схема замещения контура нулевой последовательности сети: $i(t)$ – источник тока; G_1 – активная проводимость источника тока; K – ключ; $u_n(t)$ – напряжение смещения нейтрали; Z_n – полная проводимость источника смещения нейтрали; G_p – эквивалентная активная проводимость ДГП; L_p – индуктивность ДГП; G_c – эквивалентная активная проводимость сети; C_c – эквивалентная емкость сети

Схема представляет собой колебательный контур второго порядка. Полная проводимость контура в операторном виде представлена суммой трех составляющих

$$Y(p) = G + pC + \frac{1}{pL}, \quad (1)$$

где $G = G_p + G_c$ – суммарная активная проводимость контура, определяющая потери в нем; $p = j\omega$ – оператор; ω – угловая частота; $C = C_c = C_A + C_B + C_C$ – эквивалентная суммарная емкость трехфазной сети; L – эквивалентная индуктивность ДГП и нейтралеобразующего трансформатора.

Приравняв операторное выражение нулю и умножив обе части уравнения на p/C , можно получить следующее характеристическое уравнение

$$p^2 + p\frac{G}{C} + \frac{1}{LC} = 0. \quad (2)$$

Переходный процесс в контуре описывается дифференциальным уравнением второго порядка, решение которого в общем случае представляет собой выражение вида

$$i(t) = i_\infty + A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t}, \quad (3)$$

где $i(t)$ – искомая переменная; i_∞ – принужденная составляющая решения; p_1 и p_2 – корни характеристического уравнения (2); A_1, A_2 – постоянные интегрирования,

определяемые из граничных условий; $A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t}$ – свободная составляющая решения.

Корни характеристического уравнения (2) имеют вид

$$p_{1,2} = -\frac{G}{2C} \pm \sqrt{\left(\frac{G}{2C}\right)^2 - \frac{1}{LC}} = -\delta \pm \sqrt{\delta^2 - \frac{1}{LC}}. \quad (4)$$

Контур нулевой последовательности сети с компенсацией емкостного тока, как правило, обладает высокой добротностью. Переходный процесс в нем имеет колебательный затухающий характер. Для данного контура справедливо:

$$\left(\frac{G}{2C}\right)^2 < \left(\frac{1}{LC}\right), \text{ т.е. } R > \frac{1}{2} \sqrt{\frac{L}{C}}, \text{ или } 2R > \rho,$$

где $\rho = \sqrt{\frac{L}{C}}$ – волновое, или характеристическое, сопротивление контура.

Решением характеристического уравнения в данном случае является комплексно-сопряженная пара корней

$$p_{1,2} = -\delta \pm \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2} = -\delta \pm j\omega_{\text{св}}, \quad (5)$$

где $\omega_{\text{св}} = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}$ – угловая частота свободных колебаний; $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ – угловая резонансная частота колебательного контура; $\delta = \frac{1}{2RC}$ – коэффициент затухания свободных колебаний.

Свободная составляющая напряжения $U_{\text{св}}(t)$ на элементах контура может быть получена путем подстановки корней (5) характеристического уравнения в решение (3) и последующих математических преобразований:

$$U_{\text{св}}(t) = U_0 e^{-\delta t} \sin(\omega_{\text{св}} t + \varphi), \quad (6)$$

Разработан способ измерения частоты свободных колебаний и коэффициента затухания свободных колебаний.

Предлагаемый способ основан на анализе переходного процесса, протекающего в контуре, во временной области. Переходный процесс в контуре может быть вызван как естественными событиями (переключениями, отключениями), так и создан искусственным возмущением. В последнем случае данный процесс является более детерминированным.

Осциллограмма переходного процесса, протекающего в контуре нулевой последовательности сети, и выделенная из него кривая свободной составляющей, соответствующая выражению (6) представлены на рисунке 3.

Для выделения сигнала свободной составляющей из сигнала переходного процесса, состоящего из суммы сигналов принужденной и свободной составляющих, вычитается сигнал принужденной составляющей.

Анализ сигнала свободной составляющей (рисунок 4) позволяет определить частоту свободных колебаний КНП сети по формулам

$$f_{\text{св}} = \frac{1}{X_3 - X_1}; \quad \omega_{\text{св}} = 2\pi f_{\text{св}}. \quad (7)$$

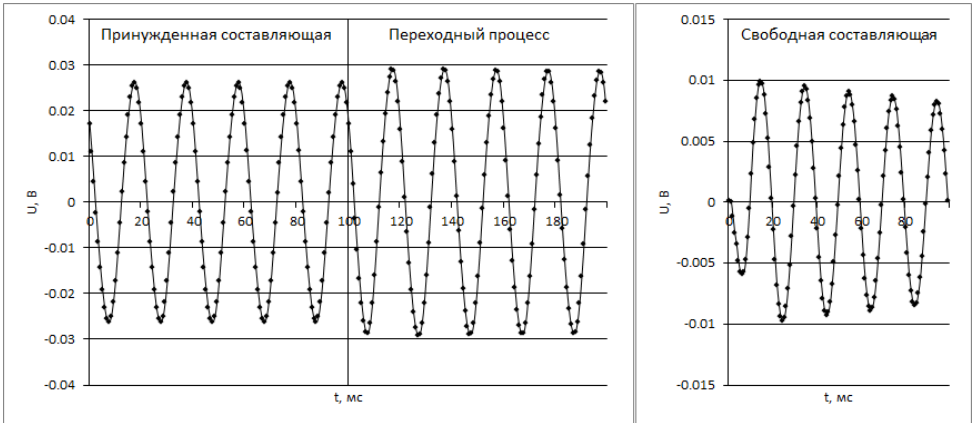


Рисунок 3 – Осциллограмма напряжения $3U_0$, содержащая участки принужденной составляющей, переходного процесса и выделенная из переходного процесса свободная составляющая

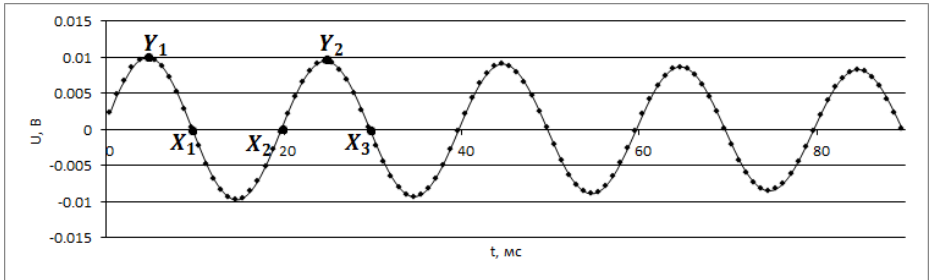


Рисунок 4 – Сигнал свободной составляющей переходного процесса

Коэффициент затухания свободных колебаний определяется по формуле

$$\delta = \frac{\ln\left(\frac{Y_1}{Y_2}\right)}{t_{Y_2} - t_{Y_1}} = \frac{\lambda}{T_{св}}, \quad (8)$$

где λ – логарифмический декремент затухания.

Используя выражения (7) и (8), можно вычислить расстройку ϑ и добротность Q КНП сети:

$$\vartheta = 1 - \frac{\omega_0^2}{\omega_{сети}^2} = 1 - \frac{\omega_{св}^2 + \delta^2}{\omega_{сети}^2}, \quad (9)$$

$$Q = \frac{1}{2} \frac{\omega_0}{\delta}. \quad (10)$$

Формулы (9) и (10), позволяющие определить параметры КНП сети, являются основополагающими для построения устройств автоматики ДГР.

Проанализированы граничные условия способа измерения параметров КНП.

Методическим ограничением применения приведенного способа является состояние контура, для которого справедливо:

$$\left(\frac{G}{2C}\right)^2 \geq \left(\frac{1}{LC}\right), \text{ т.е. } R \leq \frac{1}{2} \sqrt{\frac{L}{C}} \text{ или } 2R \leq \rho.$$

В этом случае контур является низкодобротным, а переходный процесс в нем – аperiodическим.

Приведена оценка методической погрешности измерения частоты свободных колебаний.

Для снижения погрешности измерения частоты сигнала свободной составляющей использована кусочно-линейная интерполяция сигнала в области переходов через нуль. В этом случае период сигнала свободной составляющей определяется выражением

$$T_{\text{св, изм}} = \frac{U_{\text{св}}(t_3)t_4 - U_{\text{св}}(t_4)t_3}{U_{\text{св}}(t_3) - U_{\text{св}}(t_4)} - \frac{U_{\text{св}}(t_1)t_2 - U_{\text{св}}(t_2)t_1}{U_{\text{св}}(t_1) - U_{\text{св}}(t_2)}, \quad (11)$$

где t_1 и t_3 – ближайшее время до перехода сигнала с одинаковой полярностью через нуль; t_2 и t_4 – ближайшее время после перехода сигнала с одинаковой полярностью через нуль, при этом $t_1 < t_2 < t_3 < t_4$.

Оценка относительной методической погрешности измерения периода сигнала свободной составляющей при вариации частоты измеряемого сигнала в диапазоне 20-80 Гц, вариации частоты дискретизации сигнала в диапазоне 1-6 кГц с учетом выражения (11) выполнена численным способом по формуле

$$\delta_T = \frac{|T_{\text{св, изм}} - T_{\text{св, действ}}|}{T_{\text{св, действ}}} \cdot 100\%. \quad (12)$$

В результате показано, что относительная методическая погрешность измерения периода сигнала свободной составляющей не превышает 1%.

Выполнена оценка методической погрешности измерения коэффициента затухания свободных колебаний.

Для снижения погрешности измерения коэффициента затухания свободных колебаний отбираются максимальные выборки, расположенные в окрестностях точек экстремума Y_1, Y_2, \dots, Y_n . Значения выборок, представляющих функцию, близкую к экспоненциальной, линеаризуются логарифмированием. К полученным значениям линеаризованных выборок применяется метод наименьших квадратов, а от полученных значений коэффициентов линейной зависимости берется антилогарифм. Коэффициент затухания свободных колебаний для n выборок определяется по формуле

$$\delta_{\text{изм}} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (t_i \ln(U_{\text{св}}(t_i))) - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln(U_{\text{св}}(t_i))}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i^2 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i} \quad (13)$$

где $U_{\text{св}}$ – максимальная выборка сигнала свободной составляющей в окрестности Y_i и в момент t_i ; n – число выборок выбранных для расчета.

Оценка относительной методической погрешности измерения коэффициента затухания свободной составляющей при вариации коэффициента затухания в диапазоне 0-80, вариации частоты дискретизации сигнала в диапазоне 1-6 кГц с учетом соотношения (13) выполнена численным способом по формуле

$$\delta_{\delta} = \frac{|\delta_{\text{изм}} - \delta_{\text{действ}}|}{\delta_{\text{действ}}} \cdot 100\%. \quad (14)$$

В результате показано, что относительная методическая погрешность измерения коэффициента затухания свободной составляющей не превышает 1%.

Проведено исследование способа измерения параметров контура нулевой последовательности сети на модели контура. Для этого собран параллельный колебательный контур с известными параметрами индуктивности и емкости (рисунок 5).

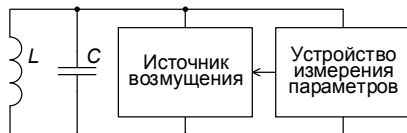


Рисунок 5 – Схема исследования способа измерения параметров колебательного контура

В качестве индуктивности используется первичная обмотка трансформатора ОСМ1-1,0 УЗ. Индуктивность данной обмотки, измеренная методом амперметра-вольтметра в режиме холостого хода, равна 1,4 Гн. В качестве емкости использован конденсатор емкостью $15 \pm 6\%$ мкФ. Расчетная резонансная частота контура, вычисленная по формуле $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = 34,73$ Гц. Частота контура, измеренная устройством, реализующим исследуемый метод, – 34,7 Гц, что с учетом разброса емкости конденсатора свидетельствует о реализуемости предлагаемого способа измерения параметров и его высоких метрологических характеристиках.

В *третьей главе* приведены результаты разработки алгоритмов и программ автоматического управления компенсацией емкостного тока.

Значение расстройки КНП сети использовано в качестве критерия настройки сети на резонансный режим компенсации. Схема алгоритма настройки для плунжерного ДГР, индуктивность которого изменяется при помощи асинхронного двигателя, представлена на рисунке 6.

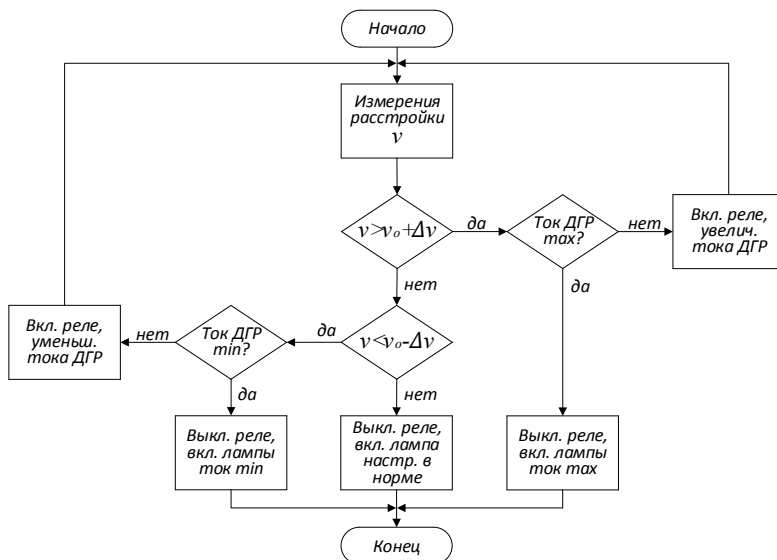


Рисунок 6 – Схема алгоритма настройки плунжерного ДГР

Настройка КНП сети на заданный режим компенсации начинается с измерения значения расстройки, в зависимости от которого выполняется одно из следующих действий:

- если расстройка КНП за пределами зоны нечувствительности и неконцевое положение реактора, то включить реле на изменения тока ДГР, соответствующее необходимому направлению перемещения плунжера;

- если расстройка КНП за пределами зоны нечувствительности и ДГР находится в концевом положении, то выключить реле изменения тока ДГР, включить сигнал «Концевое положение»;

- если расстройка в пределах зоны нечувствительности, то выключить реле изменения тока ДГР, включить сигнал «Настройка в норме».

Приведен алгоритм измерения емкостного тока. При известном значении расстройки компенсации ϑ емкостный ток сети может быть вычислен по формуле

$$\vartheta = \left(1 - \frac{I_L}{I_C}\right) \cdot 100\%. \quad (15)$$

Для реализации алгоритма на основе данной формулы необходимо измерить величину расстройки сети при известном значении индуктивного тока ДГР. Для плунжерного ДГР индуктивный ток известен только в крайних конечных положениях ДГР. В связи с этим устройство автоматики для измерения емкостного тока перед измерением параметров сети должно перестроить ДГР в крайнее положение.

Проведены исследования способа автоматического управления компенсацией емкостного тока на макете сети.

Для проверки работоспособности разработанных алгоритмов автоматического управления был разработан стенд, схема которого представлена на рисунке 7.

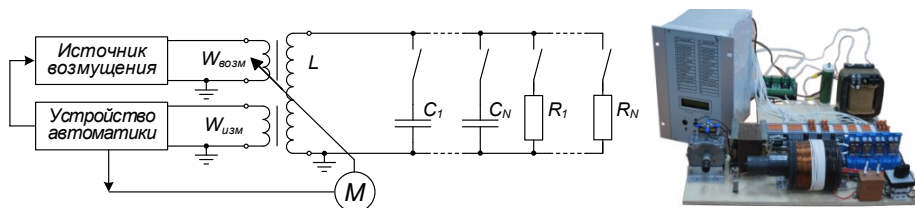


Рисунок 7 – Схема и внешний вид стенда для проверки алгоритмов автоматической настройки

Стенд состоит из конденсатора МГБО емкостью 20 мкФ, имитирующего емкость сети, катушки индуктивности с изменяемой индуктивностью в диапазоне 1,0-2,7 Гн. Изменение индуктивности реализовано за счет передвигаемого электродвигателем стального сердечника. Конструкция изменения индуктивности снабжена концевыми выключателями. Катушка индуктивности состоит из трех гальванически развязанных обмоток: основная обмотка подключена к конденсатору, дополнительные обмотки используются для наложения возмущающего сигнала и измерения сигнала переходного процесса. Устройство автоматики осуществляет измерение параметров контура через дополнительные обмотки и в зависимости от измеренного значения расстройки включает соответствующее реле питания

двигателя в необходимом направлении вращения вала. Стенд позволяет подключать конденсаторы необходимой емкости и резисторы.

Были исследованы ситуации настройки контура в резонанс из разных начальных положений и попытки настройки контура при нахождении точки резонанса за пределом диапазона регулирования. Исследования выполнялись при различных скоростях изменения индуктивности.

В результате исследования установлена возможность применения предлагаемого алгоритма автоматической настройки на практике. Выявлено, что при большой скорости изменения индуктивности возникает эффект перерегулирования. Скорость изменения индуктивности, при которой возникает эффект перерегулирования, связана со скоростью измерения параметров контура.

Дана оценка статической и динамической устойчивости алгоритма автоматической настройки.

Экспериментальная оценка устойчивости алгоритма автоматической настройки осуществлялась в соответствии со схемой, представленной на рисунке 8.

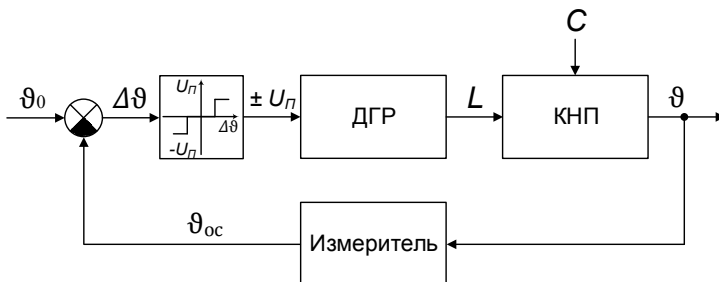


Рисунок 8 – Функциональная схема системы автоматической настройки КНП сети

Здесь контур нулевой последовательности представлен в виде функционального блока, на выходе которого формируется расстройка ϑ в зависимости от параметров L и C . Измеритель состоит из дискретизатора, отражающего длительность процесса измерения. На выходе измерителя формируется сигнал ϑ_{oc} , пропорциональный расстройке КНП сети, который поступает на узел суммирования вместе с целевым значением расстройки. Сигнал ошибки регулирования $\Delta\vartheta$ воздействует на трехпозиционное реле, управляющее двигателем ДГР. Передаточная функция ДГР представлена апериодическим звеном первого порядка, параметры которого учитывают механические процессы в ДГР и функционального блока, преобразующего текущее положение сердечника в индуктивность реактора L .

Для исследования устойчивости алгоритма автоматической настройки функциональная схема была представлена в виде структурной схемы алгоритма в пакете Simulink среды MatLab (рисунок 9).

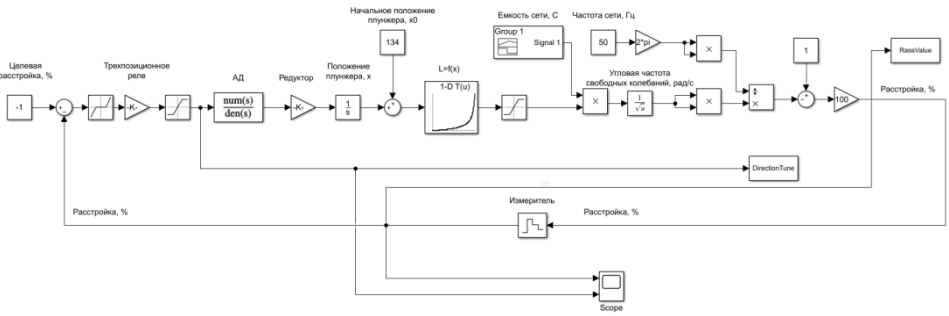


Рисунок 9 – Структурная схема системы автоматической настройки в среде MatLab

Анализ функциональной схемы позволил выявить следующее:

- устойчивость системы определяется соотношением трех параметров: частоты измерений расстройки, ширины зоны нечувствительности трехпозиционного реле и скорости изменения индуктивности ДГР. Поскольку ширина зоны нечувствительности (точность настройки) определяется требованием нормативных документов, скорость изменения индуктивности зависит от конструктивных особенностей самого ДГР, единственным доступным для изменения параметром является частота измерений расстройки компенсации, которая для повышения точности настройки должна стремиться к максимуму. Переходные процессы для устойчивой и неустойчивой систем приведены на рисунке 10. В случае необходимости для уменьшения скорости изменения индуктивности возможно применение в схеме управления двигателем ДГР частотного привода;
- в системе присутствует статическая ошибка, обусловленная зоной нечувствительности нелинейного блока «трехпозиционное реле»;
- время регулирования в основном определяется скоростью изменения индуктивности, т.е. динамическими свойствами самого ДГР, и прямо пропорционально изменению емкости сети.

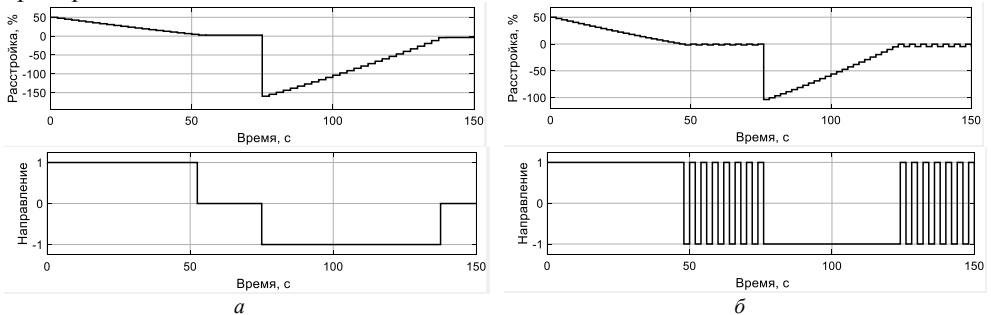


Рисунок 10 – Переходный процесс при изменении емкости сети для устойчивой (а) и неустойчивой (б) системы управления ДГР

В *четвертой главе* рассматривается практическое приложение предложенных в работе алгоритмов измерения параметров сети и автоматической настройки ДГР. Основные научные положения работы реализованы в устройстве автоматического управления дугогасящим реактором Бреслер-0107.060 (рисунок 11). Устройство автоматического управления ДГР предназначено для измерения параметров КНП сети и настройки ДГР на необходимый режим компенсации. Устройство работает с ДГР ступенчатого типа, реакторами плунжерного типа различных производителей, реакторами с конденсаторным управлением. Устройство работоспособно в сетях с комбинированным заземлением нейтрали и при объединении секций шин.



Рисунок 11 — Устройство автоматического управления ДГР Бреслер-0107.060

Устройство имеет 16 аналоговых входов, 8 выходных электромеханических реле, 2 выходных твердотельных полупроводниковых реле, 10 дискретных входов, блок человеко-машинного взаимодействия, состоящий из 34 светодиодов, символьного дисплея и 4 клавиш управления меню. Для связи с верхним уровнем автоматизированной системы управления устройство снабжено цифровыми портами ввода-вывода. Аппаратной особенностью устройства является наличие двух твердотельных реле с временем срабатывания не более 1 мс. Твердотельные реле предназначены для управления тиристорным ключом, коммутирующим источник возмущения с сетью для создания переходного процесса. Другой особенностью устройства является использование двух аналоговых входов для отдельного измерения сигнала $3U_0$. Один вход с максимальным измеряемым значением 15 В используется в нормальном режиме работы сети, при котором значение сигнала не превышает 1-5 В, второй вход с максимальным измеряемым значением 150 В предназначен для регистрации сигнала $3U_0$ в аварийном режиме.

В программной части устройства реализованы алгоритмы измерения параметров сети по анализу сигнала свободной составляющей и автоматической настройки ДГР на резонансный режим. Особенность реализованных алгоритмов измерения параметров сети является то, что в отличие от большинства алгоритмов цифровых релейных защит, работающих в режиме реального времени и просчитывающих выходное состояние с каждой новой выборкой, алгоритмы измерения параметров сети по анализу сигнала свободной составляющей требуют накопления некоторого массива данных и работают в режиме отложенного времени. Поэтому функции измерения и автоматического управления ДГР реализованы на основе потоков встроенной операционной системы.

Основные функции устройства были дополнены. Для реализации режима согласованной работы устройств автоматики при объединении секций шин реализован протокол обмена информацией между устройствами. Используя цифровой обмен по портам связи, устройства согласовывают последовательность

работы в режиме «Ведущий-Ведомый», а также передают параметры дугогасящих устройств для вычисления емкостного тока.

Устройство снабжено встроенным регистратором аварийных процессов. При возникновении ОЗЗ осуществляется осциллографирование всех аналоговых величин, входных дискретных сигналов и внутренних логических сигналов. Полученные осциллограммы позволяют оценить индуктивные токи ДГР при ОЗЗ, величину перенапряжений на неповрежденных фазах сети, характер однофазного замыкания на землю (рисунок 12).



Рисунок 12 – Осциллограмма процесса измерения параметров в 1-й секции и режима ОЗЗ во 2-й секции

На рисунке 12 сигналы $3U_{01}$ содержат искусственно вызванные переходные процессы для измерения параметров сети, а сигналы $3U_{03}$ и $IL3$ – процесс перемежающегося ОЗЗ.

В 2007 г. устройство автоматики ДГР Бреслер-0107.060 впервые было установлено в опытную эксплуатацию на 1-ю и 2-ю секции 10 кВ ПС «Западная» филиала ПАО «МРСК Волги» – «Чувашэнерго». В рамках опытной эксплуатации была проанализирована работа разработанных алгоритмов, внесены необходимые корректировки в программную и аппаратную части устройства. Осциллограммы измерительных процессов в 1-й и 2-й секциях ПС «Западная» представлены на рисунках 13 и 14. На осциллограммах переходного процесса (рисунок 13, а и 14, а), созданного устройством в реальной сети, видна несущественность и кратковременность изменений в форме и амплитуде напряжения $3U_0$, как следствие – отсутствие какого-либо влияния на сеть в процессе измерения параметров. Выделенные свободные составляющие, по форме являющиеся затухающими синусоидальными сигналами (рисунок 13, б и 14, б), свидетельствуют о корректности выделения этого сигнала из сигнала переходного процесса. Зависимости расстройки ϑ и напряжения $3U_0$ от положения сердечника плунжерного ДГР, снятые в двух направлениях, от максимального тока к

минимальному и наоборот представлены на рисунке 15, *а* и 15, *б*. Зависимость расстройки относительно линейная, а ее пересечение с осью абсцисс практически совпадает с моментом достижения максимального значения напряжения $3U_0$ (рисунок 15, *б*). Это свидетельствует о совпадении амплитудных и предлагаемых признаков настройки КНП на резонанс и корректности проводимых измерений.

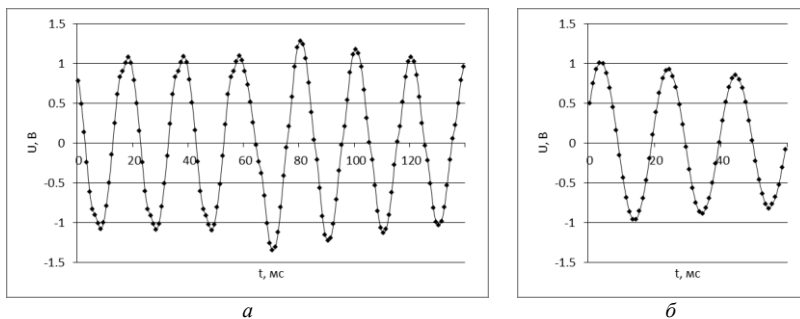


Рисунок 13 – Переходный процесс (*а*) и выделенная свободная составляющая (*б*) напряжения $3U_0$ 1-й секции ПС «Западная»

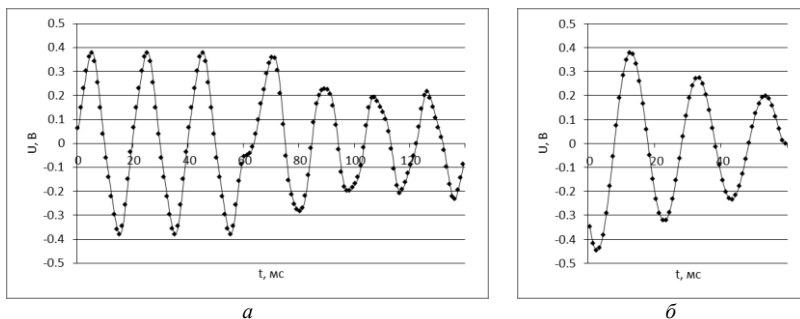


Рисунок 14 – Переходный процесс (*а*) и выделенная свободная составляющая (*б*) напряжения $3U_0$ 2-й секции ПС «Западная»

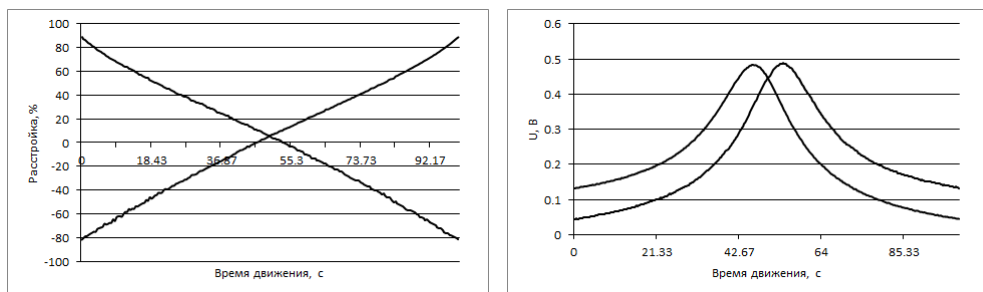


Рисунок 15 – Регулировочные характеристики по расстройке (*а*) и напряжению нейтрали (*б*) полученные при перемещении плунжера от максимального тока к минимальному и наоборот

В ходе опытной эксплуатации была подтверждена корректность разработанных алгоритмов и правомерность принятых допущений.

Выполнен анализ работы устройства и точности настройки компенсации в действующей распределительной сети на ПС 110/6/6 кВ «Сидоровка» Набережночелнинских электрических сетей. Она имеет 4 секции 6 кВ, питаемых двумя силовыми трансформаторами с расщепленными обмотками. Нейтраль каждой секции подключена к контуру заземления через ДГР типа РДМР-300/6 с током регулирования 15-80 А. Для анализа точности настройки компенсации устройством автоматики ДГР выполнялось два опыта искусственного металлического ОЗЗ. Первый опыт – при отключенном от сети ДГР, с целью замера действительной величины емкостного тока сети. Второй опыт ОЗЗ – с подключённым к сети ДГР и настроенным в автоматическом режиме устройством автоматики, при этом измерялся ток через ДГР и ток в месте ОЗЗ. Результаты натурных испытаний устройства показали высокую точность автоматической настройки ДГР.

Опыт эксплуатации сотен устройств автоматики ДГР на протяжении нескольких лет в электрических сетях России и стран СНГ позволил внести множество улучшений, расширить сервисные функции, доказал работоспособность алгоритмов и надежность разработанных устройств.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана микропроцессорная система автоматического управления режимом компенсации емкостной составляющей тока однофазного замыкания на землю, обладающая новыми свойствами, обеспечивающими повышение точности управления, расширение области применения и упрощение конструкции системы в реальных условиях эксплуатации распределительных электрических сетей.

2. В разработанной системе реализован способ формирования воздействий на сеть с целью оценки ее параметров, предусматривающий эффективную отстройку от влияния внешних факторов, что позволяет более точно компенсировать токи в месте повреждения при ОЗЗ, и, следовательно, предотвращать развитие аварийных ситуаций.

3. Предложены цифровые алгоритмы оценки параметров КНП сети и настройки компенсации емкостных токов замыкания на землю, основанные на контроле частоты собственных колебаний контура нулевой последовательности сети путем анализа реакции на воздействие тестового импульса произвольной формы. Преимущество методов в том, что они обеспечивают возможность определения необходимой для компенсации значения расстройки и формирования управляющего воздействия на ДГР в условиях не только индуктивного, но и смешанного активно-индуктивного заземления нейтрали сети при широком диапазоне изменения параметров сети, что расширяет область применения методов.

4. На основе созданной математической модели исследованы метрологические свойства разработанных методов измерения параметров контура нулевой последовательности сети, определены их предельные возможности и динамические свойства. Показано, что предельная относительная погрешность измерений параметров контура нулевой последовательности в реальных условиях составляет не

более 1%. Это позволяет осуществлять компенсацию емкостных токов замыкания на землю с повышенной точностью и таким образом снизить негативные последствия от тока в месте повреждения.

5. Разработаны, исследованы и реализованы в устройствах алгоритмы и программы управления режимами компенсации емкостной составляющей тока ОЗЗ. Решена задача согласования работы двух и более устройств управления в параллельных режимах работы секций, что обеспечило универсальность и возможность ее широкого применения при создании новых объектов компенсации емкостных токов и при модернизации с использованием имеющихся ДГР. Предусмотрена возможность подключения к средствам верхних уровней АСУ ТП, что позволяет повысить степень удобства использования вновь созданной системы автоматического управления.

6. Разработанные методы и технические средства управления компенсацией используются в устройствах автоматического управления «Бреслер-0107.060» и выпускаются серийно ООО «НПП Бреслер». Выпущено более 400 изделий, которые внедрены и эксплуатируются во многих филиалах ПАО «Россети», ОАО «Сетевая компания», ОАО «Иркутская электросетевая компания», ООО «Башкирэнерго» и в системах электроснабжения промышленных предприятий (ООО «ЗапСибНефтехим» (ГК Сибур). Результаты проведенных натурных испытаний во всех регламентированных режимах и опытной эксплуатации, а также положительный опыт промышленной эксплуатации, подтвердили основные теоретические положения диссертации, правомерность принятых допущений и ограничений, предложенных рекомендаций и выводов.

7. Материалы теоретических, методических и практических разработок нашли применение в учебно-методических материалах и используются в учебном процессе в Чувашском государственном университете и в Институте повышения квалификации специалистов релейной защиты и автоматики (г. Чебоксары).

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в научных изданиях из перечня ВАК Министерства образования и науки Российской Федерации:

1. Соловьёв, И.В. Совершенствование алгоритма управления плунжерными дугогасящими реакторами / М.И. Петров, И.В. Соловьёв // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2010. – № 6. – С. 44-46.

2. Соловьёв, И.В. Метод автоматического управления плунжерными дугогасящими реакторами / М.И. Петров, В.С. Петров, И.В. Соловьёв // Вестник Чувашского университета. – 2010. – № 3. – С. 251-259.

3. Соловьёв, И.В. Ошибки позиционирования в задаче настройки плунжерных дугогасящих реакторов / И.В. Соловьёв // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. Спец. вып. – 2008. – С. 84-85.

4. Соловьёв, И.В. Эксплуатация шкафов автоматики и управления типа «Бреслер» / М.И. Петров, В.П. Сальцев, И.В. Соловьёв, В.И. Чиндякин // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. Спец. вып. – 2008. – С. 69-82.

5. Соловьёв, И.В. Управление параллельно включенными плунжерными дугогасящими реакторами в сетях 6-35 кВ / И.В. Соловьёв // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. Спец. вып. – 2007. – С. 94-95.

6. Соловьёв, И.В. Импульсные источники наложенного сигнала для диагностирования приборов контроля расстройки компенсации / М.В. Александров, В.Ф. Ильин, Е.М. Петров, И.В. Соловьёв // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2006. – Прил. № 15. – С. 177-179.

7. Соловьёв, И.В. Управление плунжерными дугогасящими реакторами в сетях 6-10 кВ / В.Ф. Ильин, И.В. Соловьёв // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки – 2006. – Прил. № 15. – С. 171-172.

Патенты на изобретения и полезные модели:

8. Пат. на полезную модель 170352 РФ, МПК H02J 3/18. Устройство для настройки дугогасящего реактора / Булычев А.В., Ефимов Н.С., Козлов В.Н., **Соловьёв И.В.**; патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «НПП Бреслер» (ООО «НПП Бреслер»). – №2016152334; заявл. 28.12.2016; опубл. 24.04.2017, Бюл.№ 12. – 6 с.

9. Пат. на полезную модель 127536 РФ, МПК H02H 3/16. Устройство автоматической настройки компенсации емкостных токов замыкания на землю / Ильин В.Ф., Петров М.И., Петров Е.М., Петров В.С., **Соловьёв И.В.**; патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «НПП Бреслер» (ООО «НПП Бреслер»). – №2012149650/07; заявл. 21.11.2012; опубл. 27.04.2013, Бюл.№ 12. – 2 с.

10. Пат. на изобретение 2404501 РФ, МПК H02J 3/18. Устройство автоматической настройки дугогасящего реактора / Ильин В.Ф., Петров М.И., **Соловьёв И.В.**; патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «НПП Бреслер» (ООО «НПП Бреслер»). – №2009143308/07; заявл. 23.11.2009; опубл. 20.11.2010, Бюл.№ 32. – 9 с.

11. Пат. на изобретение 2402132 РФ, МПК H02H 3/16, МПК H02J 3/16. Способ настройки компенсации емкостных токов замыкания на землю (варианты) / Ильин В.Ф., Петров М.И., **Соловьёв И.В.**; патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «НПП Бреслер» (ООО «НПП Бреслер»). – №2009130560/07; заявл. 10.08.2009; опубл. 20.10.2010, Бюл.№ 29. – 9 с.

12. Пат. на изобретение 2377582 РФ, МПК G01R 27/18. Способ измерения параметров относительно земли в компенсированных электрических сетях /Ильин В.Ф., Козлов В.Н., Петров М.И., **Соловьёв И.В.**; патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «НПП Бреслер» (ООО «НПП Бреслер»), Общество с ограниченной ответственностью научно-производственное предприятие «ЭКРА» (ООО НПП «ЭКРА»). – №2008127655/28; заявл. 07.07.2008; опубл. 27.12.2009, Бюл.№ 36. – 12 с.

13. Пат. на изобретение 2475915 РФ, МПК H02J 3/18. Способ настройки компенсации емкостных токов замыкания на землю в электрических сетях / Ильин В.Ф., Петров М.И., **Соловьёв И.В.**; патентообладатель ООО «НПП Бреслер». – №2006145005/07; заявл. 18.12.2006; опубл. 20.02.2013, Бюл.№ 5. – 7 с.

Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ:

14. Свидетельство о гос. рег. программы для ЭВМ 2014619388 РФ. Программное обеспечение устройства автоматики дугогасящего реактора / **Соловьёв И.В.**; правообладатель Общество с ограниченной ответственностью «НПП Бреслер». – №2014616891; заявл. 16.07.2014; опубл. 20.10.2014. – 1 с.

Публикации в других научных изданиях:

15. Соловьёв, И.В. Дугогасящий агрегат: испытания, результаты исследования / И.В. Соловьёв, А.В. Булычев, В.Н. Козлов и др. // *Новости Электротехники*. – 2015. – № 4 (94). – С.1, 30-32.

16. Соловьёв, И.В. Идентификация и анализ сигналов с использованием численных методов оптимизации / И.В. Соловьёв, А.А. Поляков, Н.О. Салмин // *Информатика и вычислительная техника: сб. науч. тр.* – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2015. – С.95-99.

17. Соловьёв, И.В. Дугогасящие реакторы с конденсаторным регулированием индуктивности / А.В. Булычев, И.В. Соловьёв, В.Н. Козлов, Н.О. Салмин // *Релейная защита и автоматизация*, 2015. – № 04 (21). – С. 56-59.

18. Соловьёв, И.В. О способах выполнения автоматики управления ДГР / И.В. Соловьёв, В.Н. Козлов, М.И. Петров // *Релейная защита и автоматизация*. – 2012. – № 3 (08). – С. 14-19.

19. Соловьёв, И.В. Два в одном – совмещение функций ДГР и ОПФ / И.В. Соловьёв, В.Н. Козлов, М.И. Петров // *Релейная защита и автоматика энергосистем: сб. докл. XX конф.* – М.: Научно-инженерное информационное агентство, 2010. – С.153-155.

20. Соловьёв, И.В. Автоматика управления дугогасящими реакторами / И.В. Соловьёв, М.И. Петров // *Электрика*. – 2009. – № 5. – С. 24-28.

21. Соловьёв, И.В. Определение характеристических параметров контура нулевой последовательности электрической сети / И.В. Соловьёв, М.И. Петров // *Математические методы в технике и технологиях: сб. тр. XXII Междунар. науч. конф: в 10 т.* – Псков: Изд-во Псков. гос. политехн. ин-та, 2009. – Т. 8. – С. 93-95.

22. Соловьёв, И.В. Алгоритм работы группы устройств автоматической настройки дугогасящих реакторов параллельно включенных секций / И.В. Соловьёв // *Региональная энергетика и электротехника: проблемы и решения: сб. науч. тр.* – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2008. – С. 205-213.

23. Соловьёв, И.В. Моделирование процессов в нейтрали электрической сети в режиме замыкания через переходное сопротивление / И.В. Соловьёв, В.С. Петров // *Труды Академии электротехнических наук Чувашской Республики*. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2008. – № 1. – С. 118-122.

24. Соловьёв, И.В. Современные тенденции в развитии систем автоматической компенсации емкостных токов / И.В. Соловьёв, Е.М. Петров // *Труды Академии электротехнических наук Чувашской Республики*. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2008. – № 1. – С. 101-104.

25. Соловьёв, И.В. Управление плунжерными дугогасящими реакторами при объединении секций шин / И.В. Соловьёв, Е.М. Петров // *Электрика*. – 2008. – № 8. – С. 21-24.

26. Соловьёв, И.В. Автоматика управления дугогасящими реакторами / И.В. Соловьёв, М.И. Петров // Релейная защита и автоматика энергосистем – 2008: сб. докл. спец. тем. выставки. – М.: ВВЦ, 2008. – С. 117-120.

27. Соловьёв, И.В. К вопросам ограничения в применении фазового способа управления дугогасящими реакторами / И.В. Соловьёв, Д.Г. Иванов, Е.М. Петров // Математические методы в технике и технологиях: сб. тр. XXI Междунар. науч. конф.: в 10 т. – Саратов: Изд-во Сарат. гос. техн. ун-та, 2008. – Т. 7. – С. 153-155.

28. Соловьёв, И.В. Повышение эффективности эксплуатации дугогасящих реакторов плунжерного типа / И.В. Соловьёв, Е.М. Петров // Труды Академии электротехнических наук Чувашской Республики. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2007. – № 1. – С. 21-23.

29. Соловьёв, И.В. К применению методов частотного анализа для настройки дугогасящих реакторов в сетях 6-35 кВ / И.В. Соловьёв, В.С. Петров, Е.М. Петров // Труды Академии электротехнических наук Чувашской Республики. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2007. – № 1. – С. 18-19.

30. Соловьёв, И.В. Алгоритмы работы систем автоматической настройки дугогасящих реакторов / И.В. Соловьёв // Труды Академии электротехнических наук Чувашской Республики. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2007. – № 1. – С. 16-17.

31. Соловьёв, И.В. Алгоритм автоматической настройки реакторов плунжерного типа / И.В. Соловьёв, В.Ф. Ильин, М.И. Петров // Студент. Наука. Будущее: сб. тр. регион. 41-й науч. студ. конф. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2007. – С. 319-320.

32. Соловьёв, И.В. Особенности автоматической настройки реакторов плунжерного типа / И.В. Соловьёв, В.Ф. Ильин, М.И. Петров // Информатика и вычислительная техника: сб. тр. регион. 41-й науч. студ. конф. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2007. – С. 63-66.

33. Соловьёв, И.В. Моделирование процессов в контуре нулевой последовательности распределительной сети / И.В. Соловьёв, В.Ф. Ильин, Е.М. Петров // Математические методы в технике и технологиях: сб. тр. XX Междунар. науч. конф.: в 10 т. – Ярославль: Изд-во Яросл. гос. техн. ун-та, 2007. – Т. 4. – С. 237-239.

34. Соловьёв, И.В. Цифровые терминалы управления дугогасящим реактором серии БЭ 2502Б06ХХ / И.В. Соловьёв, В.Ф. Ильин, М.И. Петров // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем: материалы VII Всерос. науч.-техн. конф. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2007. – С. 211-213.

35. Соловьёв, И.В. Исследование режимов настройки контура нулевой последовательности распределительных сетей 6-10 кВ ПЭС «Северные электрические сети» / И.В. Соловьёв, Н.С. Авандеев, Н.В. Данилов, В.Ф. Ильин, Н.В. Матвеев, М.И. Петров, Е.М. Петров // Труды Академии электротехнических наук Чувашской Республики. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2006. – № 1. – С. 18-23.

36. Соловьёв, И.В. Автонастройка контура нулевой последовательности сети с плавнорегулируемыми дугогасящими реакторами / И.В. Соловьёв, М.И. Петров, Е.М. Петров // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике:

материалы VI Всерос. науч.-техн. конф. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2006. – С. 43-44.

37. Соловьёв, И.В. Определение параметров контура нулевой последовательности сети по его переходной характеристике / И.В. Соловьёв, В.Ф. Ильин, М.И. Петров, Е.М. Петров // Научные и производственно-технические проблемы энергетики и электротехники: сб. науч. тр. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2005. – С. 74-81.

38. Соловьёв, И.В. Метод определения расстройки по переходной характеристике контура нулевой последовательности распределительной сети / И.В. Соловьёв, Е.М. Петров // Труды Академии электротехнических наук Чувашской Республики. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2005. – № 2. – С. 14-15.

39. Соловьёв, И.В. Алгоритм работы контроллера настройки дугогасящего реактора с использованием переходной характеристики контура нулевой последовательности сети / И.В. Соловьёв, Е.М. Петров // Труды Академии электротехнических наук Чувашской Республики. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2005. – № 2. – С. 12-13.

СОЛОВЬЁВ Игорь Валерьевич

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ УПРАВЛЕНИЯ КОМПЕНСАЦИЕЙ
ЕМКОСТНЫХ ТОКОВ ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ В
РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ**

АВТОРЕФЕРАТ

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

Подписано в печать __. __ 2018. Формат 60×84 1/16. Печ. л. 1,5.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Тираж 100 экз. Заказ № __.

Отпечатано в типографии ФГБОУ ВО «ЧГУ им. И.Н. Ульянова»
428015 Чебоксары, Московский просп., д.15