

На правах рукописи



САФОНОВ ДМИТРИЙ ГЕННАДЬЕВИЧ

**УПРАВЛЕНИЕ КОМПЕНСАЦИЕЙ ЕМКОСТНЫХ ТОКОВ В
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ СРЕДНЕГО КЛАССА НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ
ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЯХ НА ЗЕМЛЮ**

Специальность 05.14.02 –

Электрические станции и электроэнергетические системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Омск – 2019

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Омский государственный технический университет».

Научный руководитель: **Горюнов Владимир Николаевич**
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Шуин Владимир Александрович**
доктор технических наук, профессор,
федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Ивановский государственный
энергетический университет имени В.И.
Ленина», кафедра «Автоматического
управления электроэнергетическими
системами», профессор

Третьяков Евгений Александрович
кандидат технических наук, доцент,
федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Омский государственный
университет путей сообщения», кафедра
«Подвижной состав электрических железных
дорог», доцент

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Новосибирский
государственный технический университет»

Защита диссертации состоится «23» января 2020 г. в 15⁰⁰ часов в зале заседаний диссертационного совета на заседании совета Д 212.178.12, созданного на базе Омского государственного технического университета, по адресу: 644050, г. Омск, проспект Мира, 11.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Омского государственного технического университета <https://omgtu.ru>

Автореферат разослан «__» _____ 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.178.12



Д. С. Осипов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Опыт эксплуатации электрических сетей напряжением 6-35 кВ показывает, что наиболее распространенным видом повреждений в этих сетях являются однофазные замыкания на землю (ОЗЗ), на долю которых приходится 60-80% от их общего числа. Кроме того, ОЗЗ могут переходить в многофазные короткие замыкания. В условиях труднодоступной местности, при значительной протяженности воздушных и кабельных линий электропередачи определение места повреждения является довольно сложной и затратной по времени задачей, при этом длительный перерыв в электроснабжении потребителей отрицательно сказывается на показателях надежности работы сети.

При ОЗЗ нарушается симметрия трехфазной системы, на неповрежденных фазах возникают значительные перенапряжения. На трансформаторе напряжения перенапряжения могут достигать $1,73U_{\phi}$, что при частом и длительном воздействии существенно сокращает срок их службы. Полученные значения перенапряжений, говорят о том, что длительное присутствие ОЗЗ в сети недопустимо, так как может привести к повреждению электрооборудования и дальнейшему развитию аварии. Таким образом, распределительные сети напряжением 6–35 кВ имеют низкую эксплуатационную надежность, приводящую к выходу из строя электрооборудования и электротравматизму.

В связи с расширением электрических сетей 6-35 кВ необходимо тщательней подходить к вопросу заземления нейтрали. Одним из способов повышения эффективности работы распределительных сетей напряжением 6-35 кВ является заземление нейтрали через дугогасящий реактор (ДГР), главным преимуществом которого в эксплуатации является продолжительная (на время устранения) работа с ОЗЗ без отключения потребителей.

При этом нехватка качественного оборудования и недостаточно точная настройка компенсации, являются причинами негативных последствий, возникающих в электрических сетях среднего напряжения. Следовательно, необходим более подробный анализ работы данных сетей, а также математический расчёт их режимов работы. Посредством анализа и математического расчёта будет доступна полная картина процессов, происходящих в электрической сети, после чего можно делать выводы о параметрах настройки компенсации и работы ДГР в целом.

Вопросы повышения эффективности функционирования электрических сетей среднего напряжения актуальны для всех стран и регулярно обсуждаются на международных конференциях, посвящённых исследованиям в области электроэнергетики: CIGRE (Международная конференция по большим электрическим системам), CIREN (Международная конференция по системам распределения электроэнергии) и др.

Степень разработанности темы. Значительный вклад в развитие теории, разработку методов и алгоритмов управления ДГР, исследования режимов работы сетей с компенсированной нейтралью внесли: Петерсен В., Сирота И.М., Петров О.А., Ершов А.М., Гиря В.И., Черников А.А., Михайлов А.М.,

Миронов И.А., Петров М.И., Druml G. и др. Их работы содержат исследования, направленные на разработку новых и совершенствование текущих конструкций ДГР, методов и способов их регулирования, создание новых систем управления ДГР, основанных на различных принципах.

Тип ДГР и системы управления определяют быстродействие и точность настройки, которые в свою очередь необходимы для повышения надежности работы электрических сетей. Ключевым моментом зачастую является точная оценка параметра, по которому осуществляется настройка ДГР. При этом применение математического аппарата вейвлет преобразования для оценки параметра регулирования при разработке систем управления ранее практически не применялось, что характеризует актуальность и новизну данной работы.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования являются электрические сети 6-35 кВ с компенсированной через ДГР нейтралью. Предметом исследования является система автоматического регулирования ДГР для настройки компенсации емкостного тока в распределительных сетях среднего класса напряжения.

Целью работы является разработка системы управления ДГР для настройки компенсации емкостного тока в электрических сетях среднего класса напряжения за счет применения математического аппарата вейвлет преобразования.

Для достижения поставленной цели в работе решены следующие **задачи**:

1. Исследовать состояние вопроса по компенсации емкостных токов в распределительных сетях, выбрать оптимальную конструкцию ДГР, исследовать и проанализировать существующие методы и способы работы системы управления ДГР.

2. Разработать математическую модель распределительной электрической сети с ДГР при ОЗЗ.

3. Разработать алгоритм работы системы управления ДГР.

4. Провести имитационное (компьютерное) моделирование распределительной сети с ДГР и его системы управления.

5. Разработать макет ДГР и его системы управления для проведения стендовых исследований.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Разработана математическая модель распределительной сети с компенсированной нейтралью в режиме ОЗЗ, отличием которой является учет взаимных индуктивностей и емкостей (фазных и междуфазных) линий с учетом несимметрии сети.

2. Разработан алгоритм расчета установившегося режима с ДГР на основе полной схемы замещения распределительной сети, позволяющий производить расчет токов и напряжений в различных точках электрической сети, в том числе точнее определять напряжение смещения нейтрали.

3. Разработан алгоритм работы системы управления ДГР, реализующий два способа настройки. В отличие от существующих алгоритмов выделение свободной составляющей напряжения в контуре нулевой последовательности осуществляется с помощью вейвлет преобразования.

4. Разработана имитационная модель распределительной сети с ДГР, отличительной особенностью которой является созданная модель блока управления ДГР, а также возможность изменения емкости сети и характера динамически изменяющейся во времени нагрузки.

Теоретическая значимость работы заключается в развитии теории математического моделирования электрических сетей в режиме однофазных замыканий, использовании современного математического аппарата вейвлет преобразования для совершенствования систем управления ДГР.

Практическая значимость работы заключается в следующем:

1. Создана программа по расчету установившегося режима распределительной сети с ДГР, позволяющая более точно оценить начальные условия для настройки ДГР.

2. Разработана система управления для ДГР с регулируемым воздушным зазором магнитопровода (плунжерных).

3. Разработаны программа и методика проведения стендовых исследований макета ДГР и его системы управления.

4. Создан физический макет ДГР плунжерного типа с электрогидроприводом.

Методология и методы исследования. Для решения поставленных задач в работе применялись основные положения теории электрических цепей, математического анализа, численного моделирования, программирования и натурального эксперимента.

В диссертационной работе приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований, полученные с использованием методов теоретических основ электротехники, теории вейвлетов, теории электромагнитного поля, а также прикладных пакетов программ Microsoft Excel, Mathcad, Matlab, Simulink, Borland Delphi, Elcut.

Основные положения диссертации, представляемые на защиту:

1. Математическая модель распределительной сети с ДГР при отсутствии повреждения (установившийся режим) и в режиме ОЗЗ.

2. Алгоритм и программа расчета установившегося режима с ДГР, позволяющие повысить точность определения параметров режима сети, в том числе напряжения смещения нейтрали.

3. Алгоритм настройки ДГР по экстремальному способу и по частоте свободных колебаний в контуре нулевой последовательности (КНП) с применением вейвлет преобразования.

4. Имитационная модель распределительной сети с ДГР и системой управления, позволяющая моделировать режимы работы сети при возникновении ОЗЗ.

Связь темы диссертации с общенаучными (государственными) программами и планом работы университета. Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках выполнения государственного контракта № 14.B37.21.0332 от 27.07.12 г. «Разработка математических моделей, алгоритмов, программных и технических средств повышения энергетической эффективности функционирования устройств и систем электроэнергетики», а также в соответствии с федеральной целевой

программой, утвержденной постановлением Правительства России от 28 ноября 2013 г. № 1096 «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы» в рамках прикладных научных исследований по теме «Разработка научно-технических решений по селективному определению поврежденных фидеров в сетях с компенсированной нейтралью» (соглашение № 14.577.21.0097 от 22.08.2014 г.).

Таким образом, данная работа содержит решение задач, позволяющих развить теорию расчета электрических сетей в режиме ОЗЗ, а также обработки данных в системах управления электротехнических устройств для компенсации емкостных токов в электрических сетях среднего класса напряжения.

Степень достоверности полученных результатов подтверждается корректным применением для полученных выводов математического аппарата; качественным совпадением результатов имитационного и численного моделирования с результатами физических экспериментальных данных, полученных при стендовых испытаниях.

Реализация и внедрение результатов работы. Созданная программа по расчету установившегося режима сети внедрена в сетях ООО «Объединенная сетевая компания», что позволяет получить уточненные исходные данные для расчета нормативных потерь электроэнергии.

Имитационная модель распределительной сети С ДГР позволяет оценить результаты планируемых мероприятий по повышению надежности функционирования электрических сетей ООО «Объединенная сетевая компания», связанных с настройкой ДГР при ОЗЗ.

Результаты работы также применяются в научно-исследовательской работе и учебном процессе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Омский государственный технический университет» (ОмГТУ) при подготовке специалистов, бакалавров и магистров Энергетического института ОмГТУ.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности 05.14.02 «Электрические станции и электроэнергетические системы». Полученные соискателем основные результаты исследований соответствуют пункту 6 «Разработка методов математического и физического моделирования в электроэнергетике», пункту 7 «Разработка методов расчета установившихся режимов, переходных процессов и устойчивости электроэнергетических систем», пункту 9 «Разработка методов анализа и синтеза систем автоматического регулирования, противоаварийной автоматики и релейной защиты в электроэнергетике» и пункту 13 «Разработка методов использования ЭВМ для решения задач в электроэнергетике».

Апробация работы. Результаты, полученные в ходе научных исследований, и основные тезисы диссертационной работы представлялись на обсуждение и получили одобрение на: 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering (Florence, 2016), the 3rd International Conference on Manufacturing and Industrial Technologies (Istanbul, 2016), XXVII Международная научно-практическая конференция «Экспериментальные и теоретические исследования в современной науке» (Новосибирск, 2018), VII

Всероссийская научно-техническая конференция «Россия молодая: передовые технологии – в промышленность» (ОмГТУ) (Омск, 2017), а также обсуждались на научно-технических конференциях кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» ОмГТУ в 2015-2018 гг.

Личный вклад. Автору работы принадлежит постановка научно-исследовательских задач и их решение, выполнение экспериментальных исследований, разработка алгоритма расчета и реализация его при помощи программ Mathcad и Delphi, разработка блоков структурных моделей в среде пакета Matlab, представляемые на защиту результаты моделирования, выводы и научные тезисы.

Вклад автора в каждую из опубликованных в соавторстве с кем-либо научных работ составляет не менее 70%.

Публикации. По рассматриваемой в диссертации тематике издано 9 научных работ, из которых 5 в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 2 в изданиях, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus, 4 доклада на конференциях, 1 статья без участия соавторов, также получено 1 свидетельство о регистрации электронного ресурса.

Структура и объем работы.

Диссертация включает в себя введение, четыре главы, заключение, библиографический список и пять приложений.

Общий объем диссертации составляет 160 страниц, содержащих 55 рисунков и 6 таблиц. Библиографический список состоит из 112 источников.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, охарактеризована научная новизна и практическая ценность результатов исследования, представлены основные положения, выносимые на защиту диссертации.

В первой главе рассматривается вопрос компенсации емкостных токов в распределительных сетях среднего напряжения при однофазных замыканиях на землю.

По результатам сравнительной оценки различных типов управляемых реакторов, в основе которой лежали требования по надежности, быстродействию, точности и плавности настройки тока компенсации, экономичности и др. факторы, для дальнейшего расчета и работы совместно с разрабатываемой системой управления выбран ДГР с регулируемым зазором магнитопровода (плунжерный).

Установлено, что с учетом перспективного развития сетей идет планомерное внедрение плунжерных ДГР необходимой мощности. И для подстанций, на которых были установлены ступенчатые ДГР, внедряется способ параллельной установки ступенчатого и плунжерного ДГР с автоматическим регулированием.

Выявлено, что тип реактора определяет эффективность применения тех или иных методов автоматической настройки компенсации емкостных токов, сложность технической реализации, погрешность настройки компенсации, уровень напряжения смещения нейтрали и режим работы сети. Согласно

данным критериям в распределительных сетях 6-35 кВ при наличии кабельных и воздушных линий целесообразно применение двух методов: экстремального (амплитудного) и частотного. С учетом особенностей их реализации в сетях с повышенным и пониженным уровнем напряжения нейтрали при различных режимах работы (нормальный, режим ОЗЗ), они являются дополняющими друг друга.

Опыт эксплуатации ДГР, использующих рассмотренные выше способы регулирования, позволяет сделать вывод, что для повышения точности настройки ДГР и расширения области применения разработанной системы управления целесообразно совместное использование двух способов, например, для предварительной настройки компенсации – частотный, поскольку он более сложный по вычислениям и обладает временной задержкой, связанной с измерением значений до и после возмущения, а для подстройки в процессе эксплуатации сети – экстремальный.

Во второй главе представлена математическая модель распределительной сети 35 кВ в режимах металлического однофазного замыкания на землю и замыкания на землю через переходное сопротивление.

Исследована схема распределительной сети 35 кВ с компенсированной нейтралью (с ДГР), схема замещения которой представлена на рисунке 1, в нормальном режиме и режиме ОЗЗ.

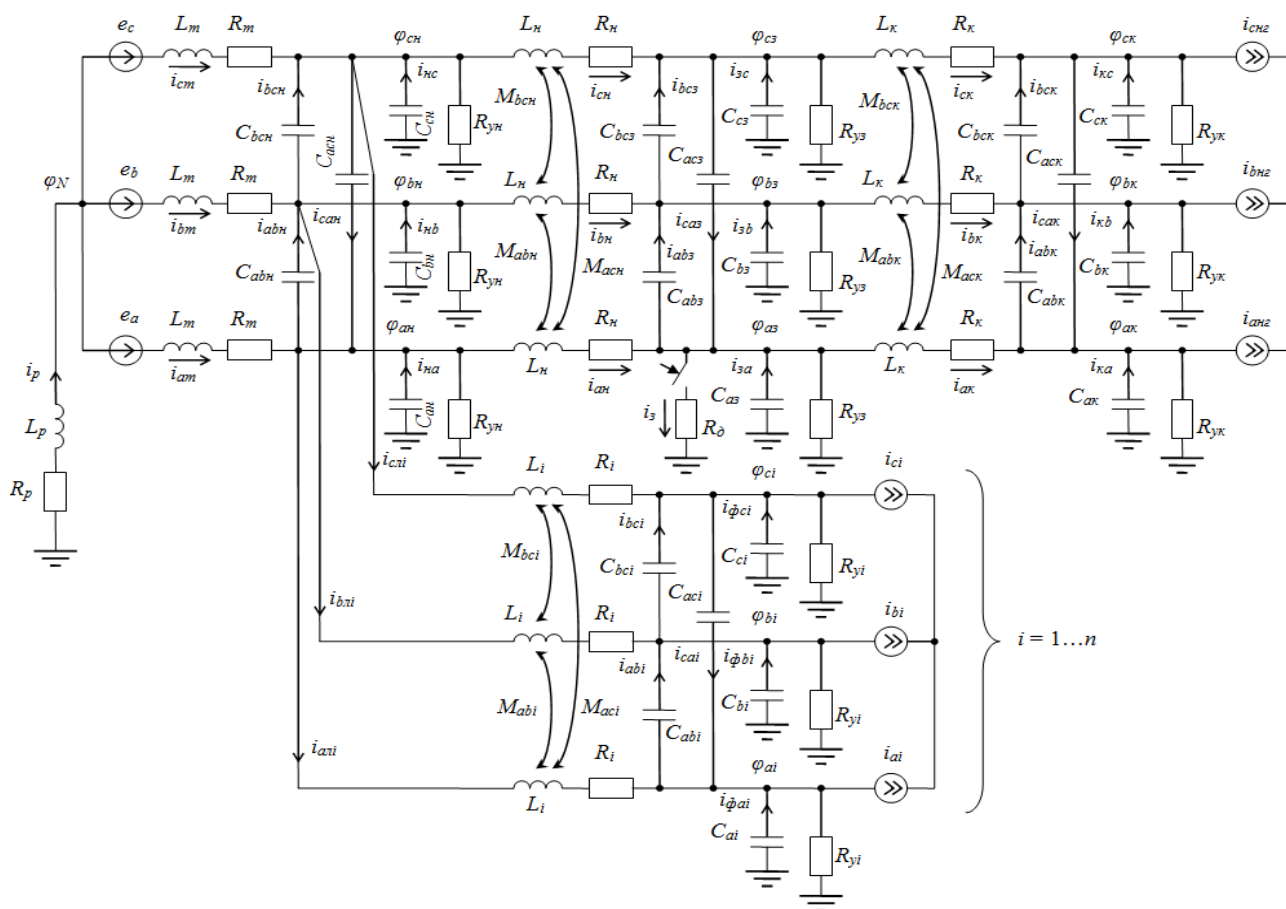


Рисунок 1 – Схема замещения электрической сети

Математическая модель источника представляет собой систему трех синусоидальных ЭДС.

Уравнения режима записаны в виде дифференциальных уравнений, после преобразования которых получено уравнение потенциала нейтрали в следующем виде:

$$\varphi_N = (i_{am} + i_{bm} + i_{cm}) \frac{L_p R_m - L_m R_p}{3L_p + L_m} + \frac{\varphi_{an} + \varphi_{bn} + \varphi_{cn} - e_a - e_b - e_c}{3 + L_m/L_p}, \quad (1)$$

где i_{am}, i_{bm}, i_{cm} – фазные токи в обмотке среднего или низшего напряжения питающего трансформатора; R_p, L_p – активное сопротивление и индуктивность реактора; R_m, L_m – активное сопротивление и индуктивность рассеяния обмотки среднего или низшего напряжения питающего трансформатора; $\varphi_{an}, \varphi_{bn}, \varphi_{cn}$ – потенциалы на выводах трансформатора; e_a, e_b, e_c – ЭДС в обмотках среднего или низшего напряжения питающего трансформатора.

Фазные падения напряжения в поврежденной линии от ее начала до точки замыкания представлены уравнениями:

$$R_n i_{an} + L_n \frac{di_{an}}{dt} + M_{abn} \frac{di_{bn}}{dt} + M_{acn} \frac{di_{cn}}{dt} = \varphi_{an} - \varphi_{a3}, \quad (2)$$

$$R_n i_{bn} + L_n \frac{di_{bn}}{dt} + M_{abn} \frac{di_{an}}{dt} + M_{bcn} \frac{di_{cn}}{dt} = \varphi_{bn} - \varphi_{b3}, \quad (3)$$

$$R_n i_{cn} + L_n \frac{di_{cn}}{dt} + M_{bcn} \frac{di_{bn}}{dt} + M_{acn} \frac{di_{an}}{dt} = \varphi_{cn} - \varphi_{c3}, \quad (4)$$

где R_n и L_n – активное сопротивление и собственная индуктивность фазного провода на участке от начала линии до точки замыкания; $M_{abn}, M_{bcn}, M_{acn}$ – взаимные междуфазные индуктивности линии на том же участке; $\varphi_{a3}, \varphi_{b3}, \varphi_{c3}$ – потенциалы в точке замыкания поврежденной линии, i_{an}, i_{bn}, i_{cn} – фазные токи в начале линии.

Уравнения для поперечных ветвей:

$$(C_{abn} + C_{acn} + C_{an}) \frac{d\varphi_{an}}{dt} - C_{abn} \frac{d\varphi_{bn}}{dt} - C_{acn} \frac{d\varphi_{cn}}{dt} = i_{am} - i_{an} - \sum_{i=1}^n i_{ali} - \frac{\varphi_{an}}{R_{yn}}, \quad (5)$$

$$-C_{abn} \frac{d\varphi_{an}}{dt} + (C_{bcn} + C_{abn} + C_{bn}) \frac{d\varphi_{bn}}{dt} - C_{bcn} \frac{d\varphi_{cn}}{dt} = i_{bm} - i_{bn} - \sum_{i=1}^n i_{bli} - \frac{\varphi_{bn}}{R_{yn}}, \quad (6)$$

$$-C_{acn} \frac{d\varphi_{an}}{dt} - C_{bcn} \frac{d\varphi_{bn}}{dt} + (C_{acn} + C_{bcn} + C_{cn}) \frac{d\varphi_{cn}}{dt} = i_{cm} - i_{cn} - \sum_{i=1}^n i_{cli} - \frac{\varphi_{cn}}{R_{yn}}, \quad (7)$$

где $C_{an}, C_{bn}, C_{cn}, C_{abn}, C_{bcn}, C_{acn}$ – суммарные фазные и междуфазные емкости в начале линий; R_{yn} – сопротивление утечки по изоляторам в начале линий; $i_{ali}, i_{bli}, i_{cli}$ – фазные токи в начале неповрежденных линий.

Взаимные индуктивности и емкости (фазные и междуфазные) определены с учетом несимметрии линии.

Емкости линий определены на основе обращения матрицы потенциальных коэффициентов.

Уравнение настройки индуктивности реактора получено исходя из того, что

ДГР должен настраиваться на фазную емкость с некоторым рассогласованием (до 0,1). Таким образом, уравнение настройки при выделении поврежденной линии имеет вид:

$$L_p = \frac{0,9...1,1}{\omega^2 \left[(C_{0,a,n} + C_{0,b,n} + C_{0,c,n})l_n + \sum_{i=1}^n (C_{0,a,i} + C_{0,b,i} + C_{0,c,i})l_i \right]}, \quad (8)$$

где $C_{0,a,n}, C_{0,b,n}, C_{0,c,n}$ – погонные емкости поврежденной линии; $C_{0,a,i}, C_{0,b,i}, C_{0,c,i}$ – погонные емкости неповрежденных линий.

Начальные условия определяются на основе расчета предшествующего установившегося режима. Расчет производится согласно схеме замещения (рисунок 1) при отсутствии замыкания на землю.

При вычислении токов нагрузки исключается сначала составляющая напряжений нулевой последовательности, а затем составляющая токов нулевой последовательности. Модель нагрузки имеет вид:

$$\dot{U}_{ak12} = \frac{1}{3}(2\dot{U}_{ak} - \dot{U}_{bk} - \dot{U}_{ck}), \quad (9)$$

$$\dot{U}_{bk12} = \frac{1}{3}(2\dot{U}_{bk} - \dot{U}_{ak} - \dot{U}_{ck}), \quad (10)$$

$$\dot{U}_{ck12} = \frac{1}{3}(2\dot{U}_{ck} - \dot{U}_{ak} - \dot{U}_{bk}), \quad (11)$$

где $\dot{U}_{ak}, \dot{U}_{bk}, \dot{U}_{ck}$ – фазные напряжения в конце линий; $\dot{U}_{ak12}, \dot{U}_{bk12}, \dot{U}_{ck12}$ – те же напряжения, но после исключения нулевой последовательности.

$$\dot{I}_{0нз} = \frac{1}{3} \left(\frac{S_{анз}^*}{U_{ak12}^*} + \frac{S_{бнз}^*}{U_{bk12}^*} + \frac{S_{снз}^*}{U_{ck12}^*} \right), \quad (12)$$

где $S_{анз}^*, S_{бнз}^*, S_{снз}^*$ – сопряженные комплексы фазных мощностей нагрузки; $\dot{I}_{0нз}$ – ток нагрузки нулевой последовательности.

$$\dot{I}_{анз} = \frac{S_{анз}^*}{U_{ak12}^*} - \dot{I}_{0нз}, \quad (13)$$

$$\dot{I}_{бнз} = \frac{S_{бнз}^*}{U_{bk12}^*} - \dot{I}_{0нз}, \quad (14)$$

$$\dot{I}_{снз} = \frac{S_{снз}^*}{U_{ck12}^*} - \dot{I}_{0нз}, \quad (15)$$

где $\dot{I}_{анз}, \dot{I}_{бнз}, \dot{I}_{снз}$ – расчетные токи нагрузки в поврежденной линии.

Уравнения первого закона Кирхгофа имеют вид (на примере тока фазы А в начале i-той линии):

$$\dot{I}_{ai} = \dot{I}_{ai} + \dot{U}_{ai} \left[\frac{1}{R_{yi}} + j(B_{ai} + B_{abi} + B_{aci}) \right] - j\dot{U}_{bi}B_{abi} - j\dot{U}_{ci}B_{aci}, \quad i = 1...n, \quad (16)$$

где \dot{I}_{ai} – ток нагрузки фазы «А»; $\dot{U}_{ai}, \dot{U}_{bi}, \dot{U}_{ci}$ – фазные напряжения в конце поврежденной линии; B_{ai} – собственная емкостная проводимость фазы «А»; B_{abi}, B_{aci} – взаимные емкостные проводимости.

Напряжение смещения нейтрали и напряжения в начале линии определяются уравнениями:

$$\dot{U}_N = -\dot{I}_p (R_p + jX_p), \quad (17)$$

$$\dot{U}_{an} = \dot{U}_N + \dot{E}_a - \dot{I}_{am} (R_m + jX_m), \quad (18)$$

$$\dot{U}_{bn} = \dot{U}_N + \dot{E}_b - \dot{I}_{bm} (R_m + jX_m), \quad (19)$$

$$\dot{U}_{cn} = \dot{U}_N + \dot{E}_c - \dot{I}_{cm} (R_m + jX_m), \quad (20)$$

где \dot{I}_p – ток ДГР; X_p – индуктивное сопротивление ДГР; $\dot{E}_a, \dot{E}_b, \dot{E}_c$ – ЭДС источника; $\dot{I}_{am}, \dot{I}_{bm}, \dot{I}_{cm}$ – токи трансформатора.

Уравнения для остальных ветвей записаны аналогично.

Расчет реализован методом простой итерации по напряжениям. Каждая итерация представляет собой вариант известного метода «По данным начала», эффективного для разомкнутых сетей. В данном случае этот метод обобщен на несимметричные режимы, а расчеты производятся в токах, а не в мощностях. В целом расчет несимметричного режима производится методом фазных координат. Метод симметричных составляющих при данных условиях не приводит к снижению размерности системы уравнений, так как междуфазные сопротивления неодинаковы.

В третьей главе представлена принципиальная схема системы управления (рисунок 2), реализованная на основе двух способов (частотного и экстремального).

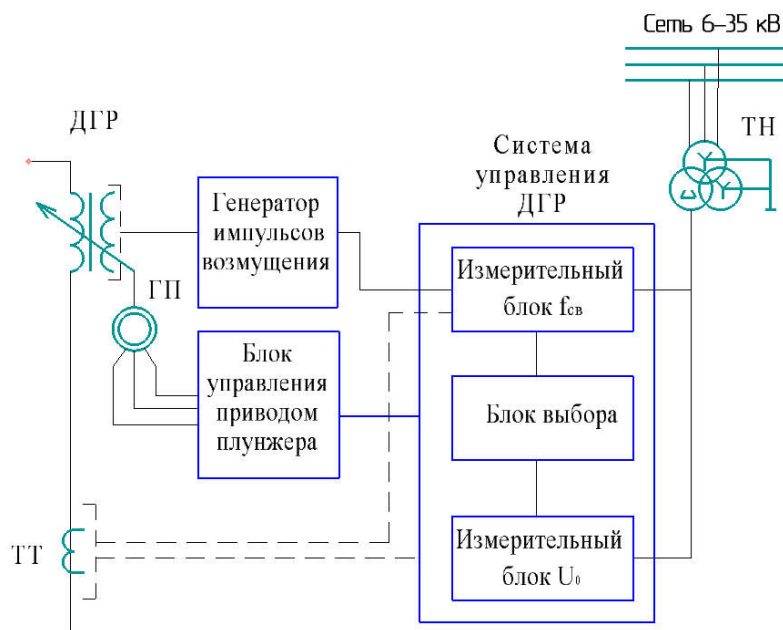


Рисунок 2 – Принципиальная схема системы управления

По частоте свободных колебаний в контуре нулевой последовательности производится предварительная настройка ДГР после изменения конфигурации электрической сети (подключение или отключение отходящих линий). Для реализации частотного метода в контур нулевой последовательности вводится дополнительное возмущение в виде импульса тока (в схеме предусмотрен генератор единичных импульсов).

Экстремальным способом осуществляется контроль настройки ДГР в резонансный режим. Периодичность контроля определяется диспетчером или устанавливается автоматически через заданный интервал времени.

На схеме (рисунок 2) представлен плунжерный ДГР с трансформатором тока ТТ в цепи силовой обмотки ДГР. Обратная связь по напряжению с измерительными блоками осуществляется от трансформатора тока ТТ или от трансформатора напряжения ТН, включенного по схеме разомкнутый треугольник. Блок выбора определяет алгоритм взаимодействия измерительных блоков и блока управления приводом плунжера. Генератор импульсов возмущения, подключенный к сигнальной обмотке ДГР, имеет прямую связь с измерительным блоком частоты свободных колебаний в контуре нулевой последовательности

Система управления ДГР работает по разработанному алгоритму, представленному в блок-схеме (рисунок 3).

Способ автоматической настройки дугогасящего реактора в распределительных сетях 6-35 кВ с выделением свободной составляющей в КНП реализован в блоках 4-19 (рисунок 3).

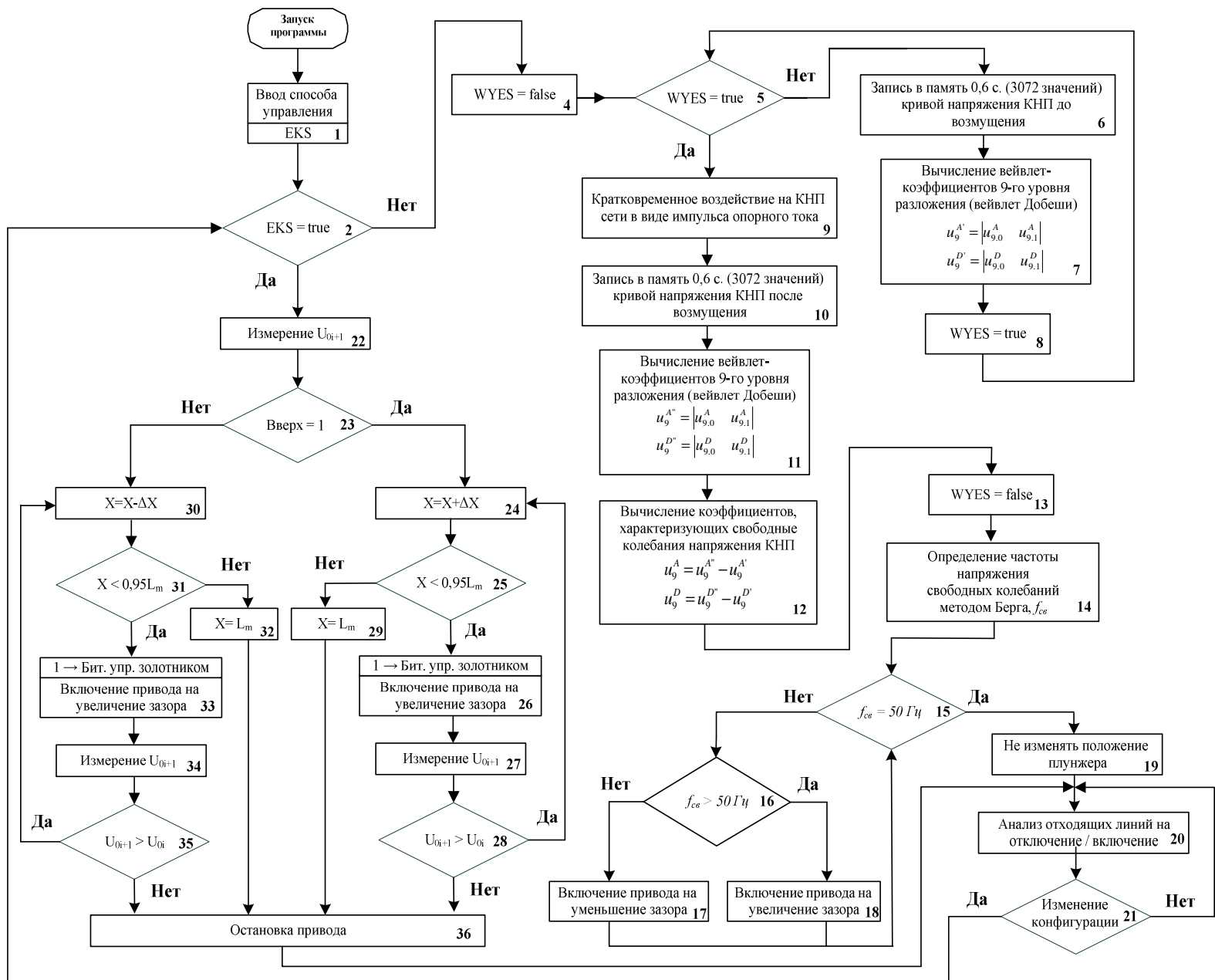
Задача гармонического анализа частоты свободных колебаний напряжения КНП решена с помощью пакетного вейвлет преобразования.

Поскольку напряжение контура нулевой последовательности задано мгновенными дискретными значениями в виде вектор строки, состоящей из n -элементов $u(t) = [u_0 \ u_1 \ u_2 \ \dots \ u_{n-1} \ u_n]$, то дискретное разложение сигнала на первом уровне с учетом коэффициентов вейвлет фильтров нижних h_0, h_1 и верхних частот g_0, g_1 в матричном виде реализуется по выражению:

$$\begin{bmatrix} h_0 & h_1 & 0 & 0 & \dots & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & h_0 & h_1 & \dots & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & \dots & h_0 & h_1 \\ g_0 & g_1 & 0 & 0 & \dots & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & g_0 & g_1 & \dots & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & \dots & g_0 & g_1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} u_0 \\ u_1 \\ u_2 \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ u_{n-1} \\ u_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{j,0}^A \\ u_{j,1}^A \\ \dots \\ u_{j,n/2}^A \\ u_{j,0}^D \\ u_{j,1}^D \\ \dots \\ u_{j,n/2}^D \end{bmatrix}. \quad (21)$$

Обратное вейвлет преобразование может быть представлено в матричном виде (формула 22). В результате реконструкции сигнала матрица вейвлет

Рисунок 3 – Блок-схема алгоритма системы управления ДТР



коэффициентов преобразуется в единый дискретный сигнал – функцию напряжения нулевой последовательности.

$$\begin{vmatrix} H_0 & 0 & \dots & 0 & G_0 & 0 & \dots & 0 \\ H_1 & 0 & \dots & 0 & G_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & H_0 & \dots & 0 & 0 & G_0 & \dots & 0 \\ 0 & H_1 & \dots & 0 & 0 & G_1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & H_0 & 0 & 0 & \dots & G_0 \\ 0 & 0 & \dots & H_1 & 0 & 0 & \dots & G_1 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} u_{Aj,0}^A \\ u_{Aj,1}^A \\ \dots \\ u_{Aj,n/2}^A \\ u_{Aj,0}^D \\ u_{Aj,1}^D \\ \dots \\ u_{Aj,n/2}^D \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} u_0 \\ u_1 \\ u_2 \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ u_{n-1} \\ u_n \end{vmatrix}. \quad (22)$$

Из анализируемого сигнала выделяется частотный диапазон, в котором присутствует частота свободных колебаний напряжения КНП. Для этого использована локальная энергия спектра вейвлет коэффициентов j -го уровня разложения, представляющих собой вектор-строки из k элементов, которая определяется по выражениям:

$$E_{j,k}^A = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \left(u_{j,k}^A \varphi_{j,k}(t) \right)^2, \\ E_{j,k}^D = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \left(u_{j,k}^D \psi_{j,k}(t) \right)^2. \quad (23)$$

После выделения требуемого частотного диапазона последовательность действий по определению частоты свободных колебаний осуществляется по разработанному алгоритму (рисунок 3, блоки 6-14):

1. На первоначальном этапе в буфер памяти записывается кривая напряжения КНП длительностью 0,6 секунд (3072 значения).
2. Для создания переходного процесса в КНП осуществляется кратковременное воздействие на него в виде импульса опорного тока, получаемого от генератора импульсов возмущения.
3. После создания возмущения в буфер памяти записывается кривая напряжения КНП длительность 0,6 секунд (3072 значения).
4. Происходит вычисление вейвлет коэффициентов 9-го уровня разложения из фрагмента напряжения до управляющего воздействия. Обозначим полученные коэффициенты с индексом «'» (штрих):

$$u_9^{A'} = \begin{vmatrix} u_{9,0}^A & u_{9,1}^A \end{vmatrix} \quad (24) \\ u_9^{D'} = \begin{vmatrix} u_{9,0}^D & u_{9,1}^D \end{vmatrix}$$

5. Аналогичным образом вычисляются коэффициенты 9-го уровня разложения из фрагмента напряжения после управляющего воздействия. Обозначим полученные коэффициенты с индексом «''» (два штриха):

$$u_9^{A''} = \begin{vmatrix} u_{9,0}^A & u_{9,1}^A \end{vmatrix} \quad (25)$$

$$u_9^{D''} = \begin{vmatrix} u_{9,0}^D & u_{9,1}^D \end{vmatrix}$$

6. Коэффициенты, характеризующие свободные колебания напряжения контура нулевой последовательности определяются через разность:

$$\begin{aligned} u_9^A &= u_9^{A''} - u_9^{A'} \\ u_9^D &= u_9^{D''} - u_9^{D'} \end{aligned} \quad (26)$$

Искомая функция напряжения свободной составляющей контура нулевой последовательности в этом случае записывается через вейвлет коэффициенты:

$$u_{cv}(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} u_{J,k}^A \varphi_{J,k}(t) + \sum_{j=J}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} u_{j,k}^D \psi_{j,k}(t) \quad (27)$$

а поскольку в алгоритме используются только коэффициенты $u_9^D(k)$ и $u_9^A(k)$, то на основании (26) формула (27) записывается в виде:

$$u_{cv}(t) = u_{9,0}^A \varphi_{9,0} + u_{9,1}^A \varphi_{9,1} + u_{9,0}^D \psi_{9,0} + u_{9,1}^D \psi_{9,1} \quad (28)$$

7. Определяется частота напряжения свободных колебаний методом Берга.

В результате проверочного расчета в программе Matlab произведена оценка корректности вейвлет преобразования, где сравнивается вычисленный сигнал напряжения свободных колебаний с исходным значением, заданным при расчете (рисунок 4).

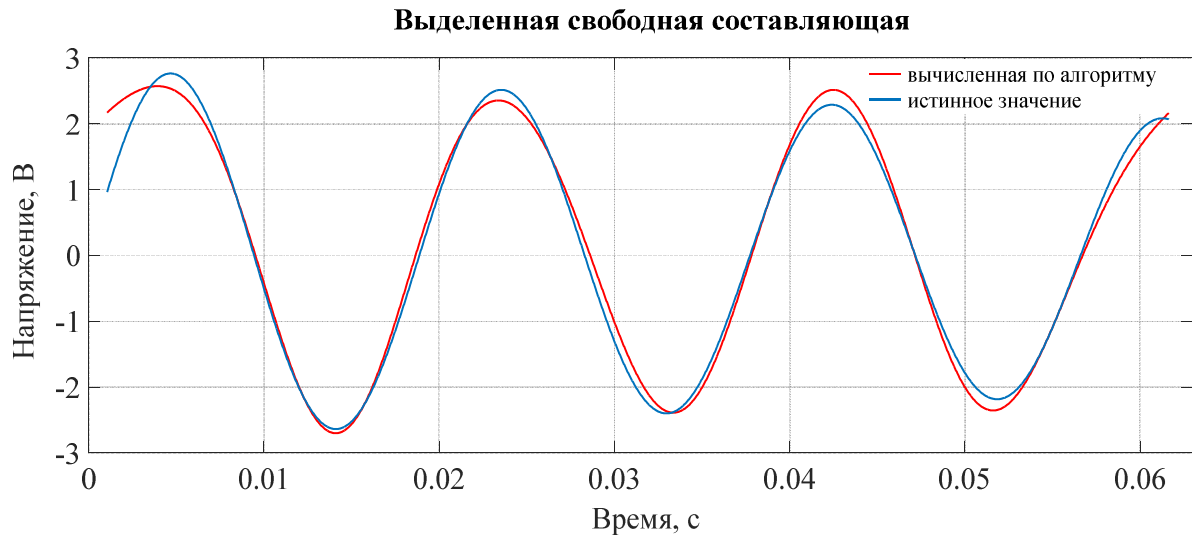


Рисунок 4 – Напряжение свободных колебаний контура нулевой последовательности

Для оценки частоты свободной составляющей использовался алгоритм Берга, который показал наибольшую точность при оценки спектральной плотности мощности (СПМ). На графике (рисунок 5) погрешность при заданной частоте 53 Гц составила 0,2 %. Другие методы дают существенно большую погрешность и имеют зону нечувствительности относительно 50 Гц, которая составляет до ± 2 Гц.

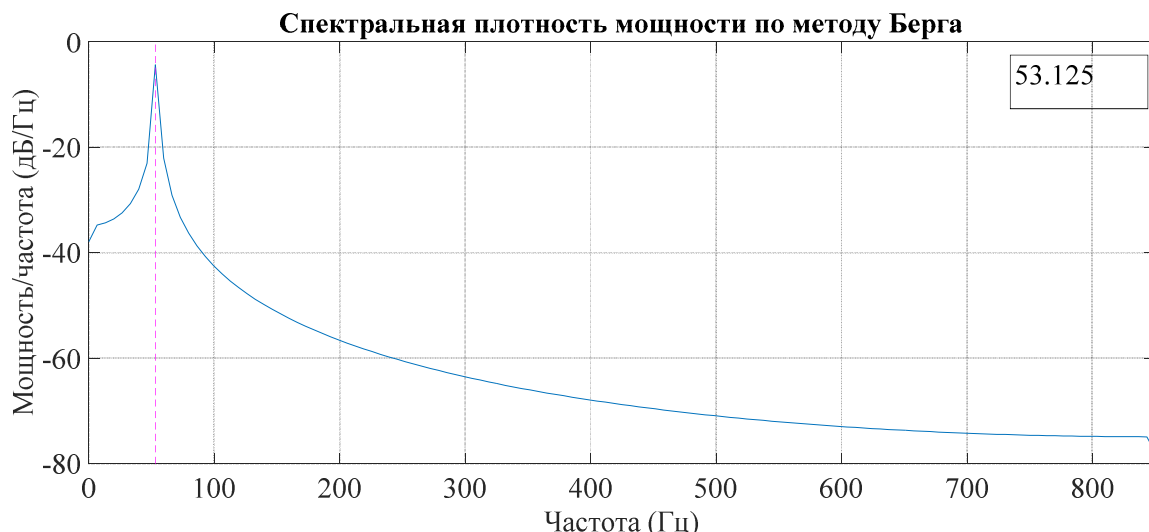


Рисунок 5 – Определение частоты напряжения свободных колебаний по методу Берга

Подстройка ДГР в нормальном режиме работы электрической сети осуществляется по экстремальному способу (блоки 22-36), реализованному в алгоритме (рисунок 3). Параметром настройки является величина напряжения смещения нейтрали U_0 , настройка ДГР выполняется в резонанс.

С целью подтверждения основных теоретических положений при разработке системы управления ДГР создана имитационная модель трехфазной распределительной сети с компенсированной нейтралью с системой управления ДГР, реализованная в приложении Simulink программного комплекса MATLAB (рисунок 6), позволяющая оценить качество компенсации емкостных токов при ОЗЗ.

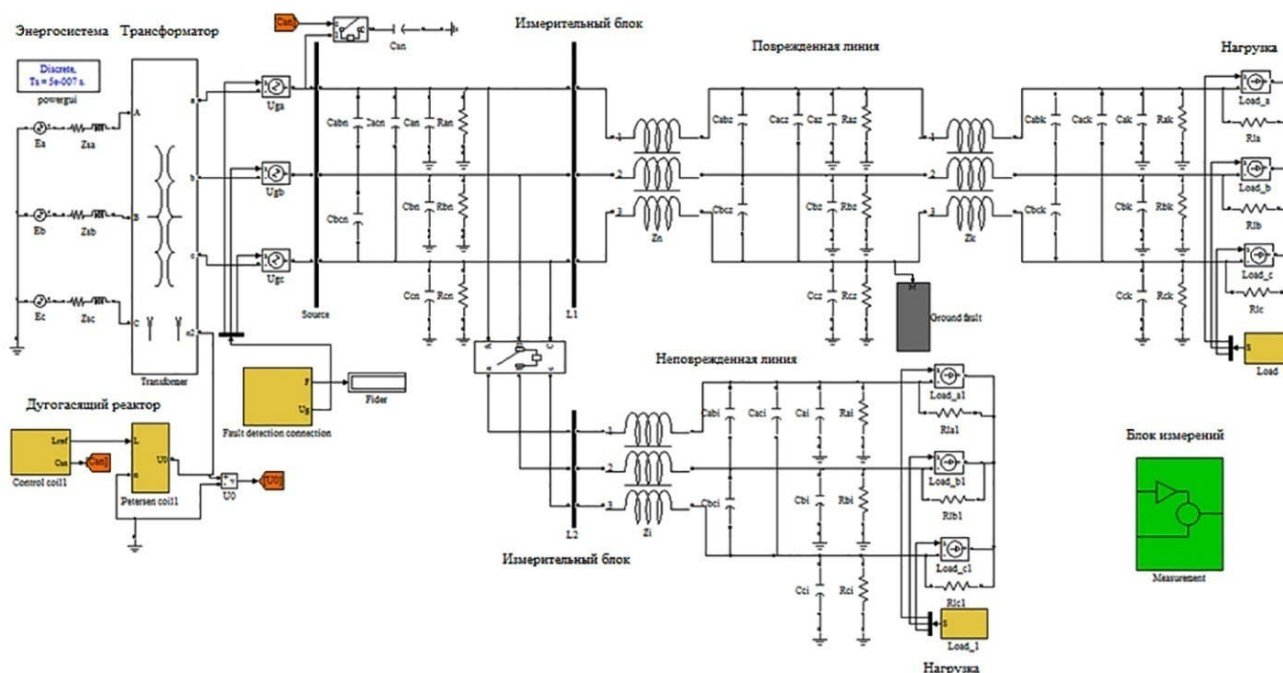


Рисунок 6 – Модель трёхфазной распределительной сети в среде MATLAB

Дугогасящий реактор (Petersen coil) смоделирован с использованием управляемого источника тока. Система управления реактором (Controlcoil) выполнена в соответствии с разработанными алгоритмами.

При моделировании получены следующие результаты. Картина изменения напряжения на эквивалентной нагрузке при однофазном замыкании представлена на рисунке 7.

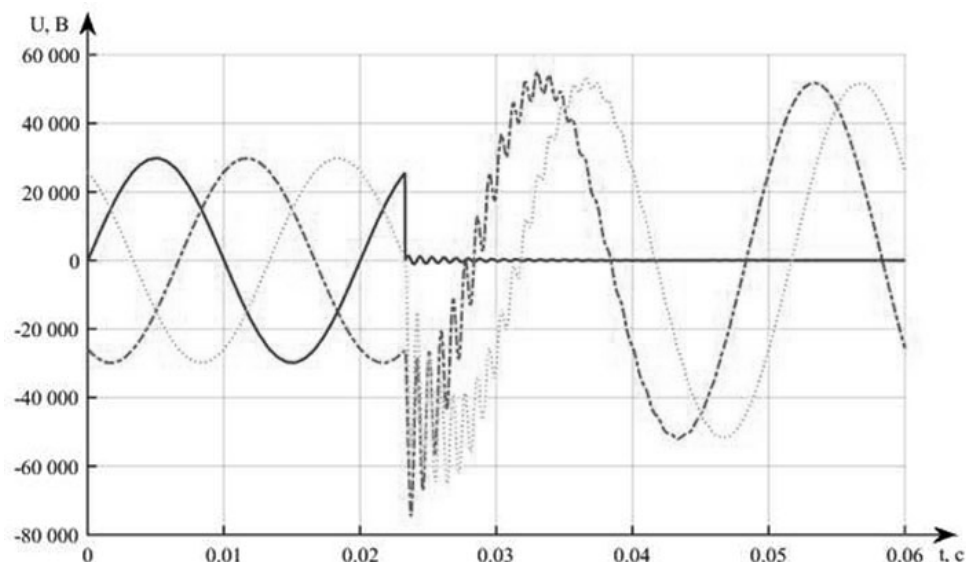


Рисунок 7 – Напряжения на эквивалентной нагрузке при ОЗЗ

Напряжение «здоровой» фазы на трансформаторе напряжения представлено на рисунке 8.

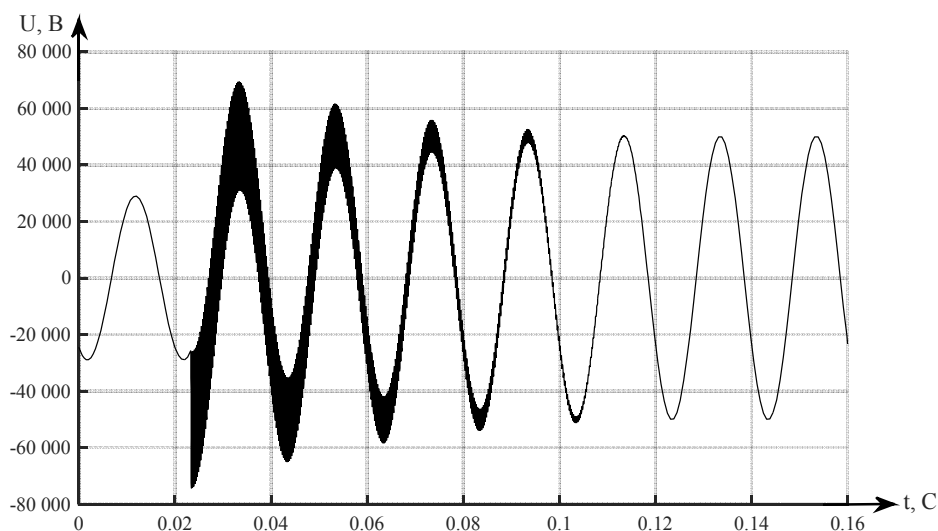


Рисунок 8 – Напряжение фазы В на трансформаторе напряжения при ОЗЗ

Емкостной ток электрической сети и ток реактора представлены на рисунке 9.

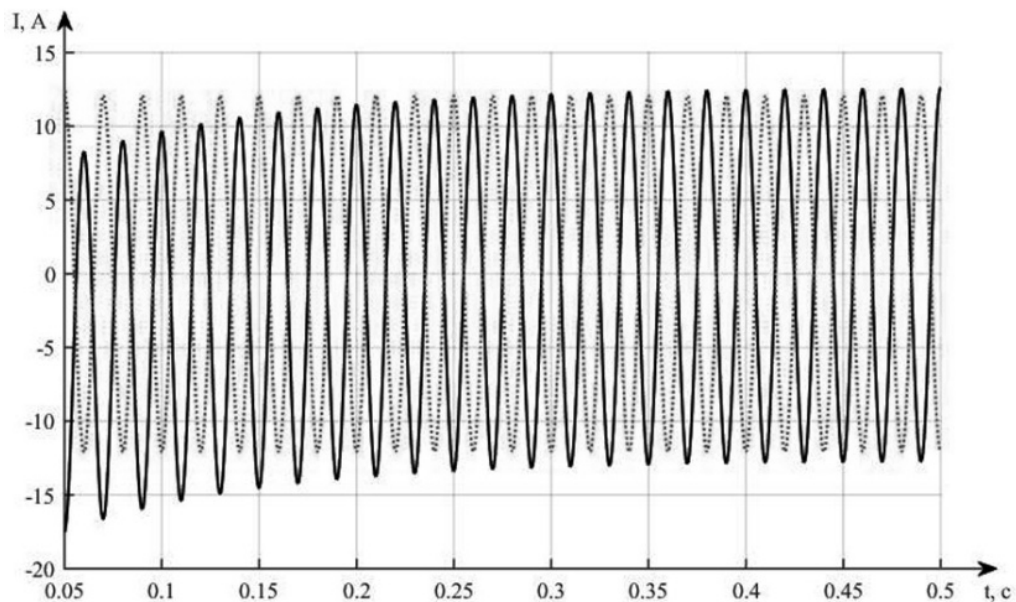


Рисунок 9 – Графики токов: пунктирная линия – емкостной ток сети 35 кВ; сплошная линия – индуктивный ток реактора

Как видно из рисунка 9 индуктивный ток реактора полностью компенсирует емкостной ток электрической сети. Поскольку реактор должен настраиваться на фазную емкость с рассогласованием до 0,1, то индуктивный ток несколько превосходит емкостной ток сети.

В четвертой главе приводится расчет магнитной части дугогасящего реактора. Для проверки расчета и выяснения влияний рассеяния было произведено моделирование стационарного магнитного поля в программе ELCUT методом конечных элементов на основе векторного магнитного потенциала, при граничных условиях Дирихле на границах $A=0$. Была выбрана модель плоскопараллельного поля, описываемая уравнением Пуассона, представленное в формуле:

$$\mu\mu_0\delta = \frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial y^2}, \quad (26)$$

где A – векторный магнитный потенциал; $\mu = 7000$ – относительная магнитная проницаемость в магнитопроводе; x, y – координаты; δ – зазор, м; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ – магнитная проницаемость в обмотках и воздухе, Г/м.

Картина магнитного поля при зазоре в 0,01 и 0,1 м, представлена на рисунках 10 и 11 соответственно.

Кратность изменения индуктивности составила 5, что весьма близко к результату при стендовых испытаниях. Погрешность объясняется не учётом бокового рассеяния.

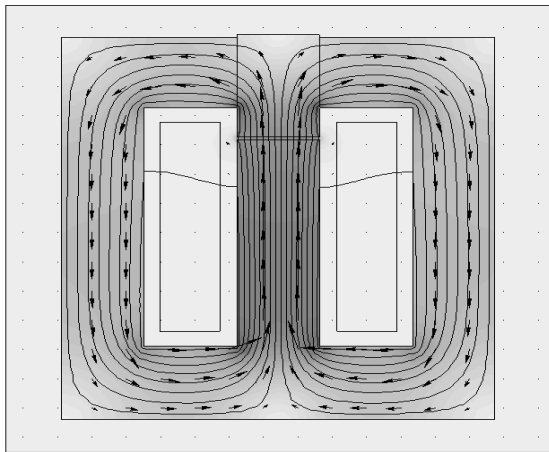


Рисунок 10 – Магнитное поле при зазоре 10 мм

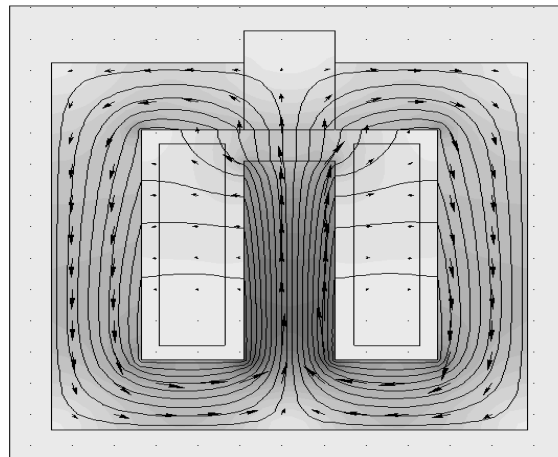


Рисунок 11 – Магнитное поле при зазоре 100 мм

Для более наглядного сравнения полученные результаты были нормированы к экспериментальным данным и приведены на рисунке 12.

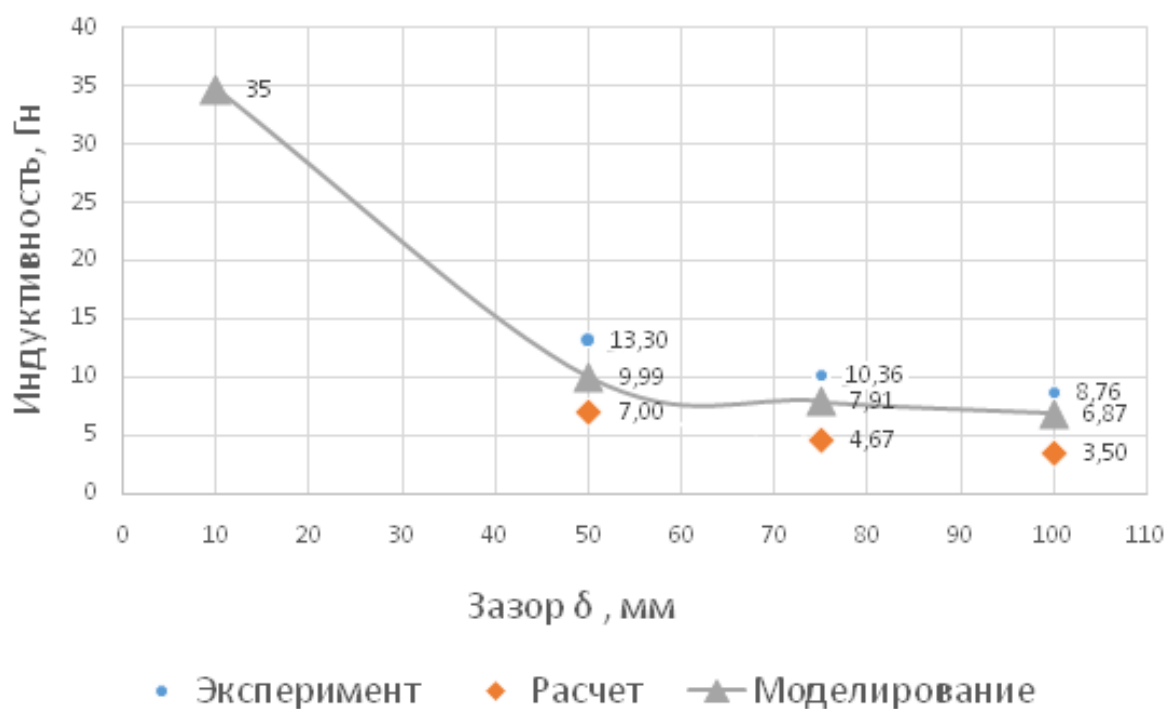


Рисунок 12 – Результаты определения зависимости индуктивности ДГР от зазора

Испытания проводились в соответствии с разработанной программой и методикой испытаний на стендовой установке в открытом распределительном устройстве трансформаторной подстанции 110/35/10 кВ «Щербакульская» «Омскэнерго – Филиал ПАО «МРСК Сибири» на уровне напряжения 35 кВ совместно с оборудованием подстанции (рисунок 13).



Рисунок 13 – Установка ДГР на подстанции

Для создания емкости линии были использованы однофазные конденсаторы типа КЭПО-10,5-7-2У1 (2 шт. на фазу), емкостью $C=0,2021$ мкФ и КЭП1-10,5-112,5-2У1 (2 шт. на фазу), емкостью $C=3,25$ мкФ. На подстанции конденсаторы смонтированы на специальной металлической конструкции (рисунок 14).



Рисунок 14 – Установка конденсаторов на подстанции при испытаниях

Схема подключения системы управления представлена в методике стендовых испытаний, разработанной в процессе выполнения работы. При проведении испытаний система управления была расположена на уровне макета ДГР за пределами подстанции (рисунок 15).

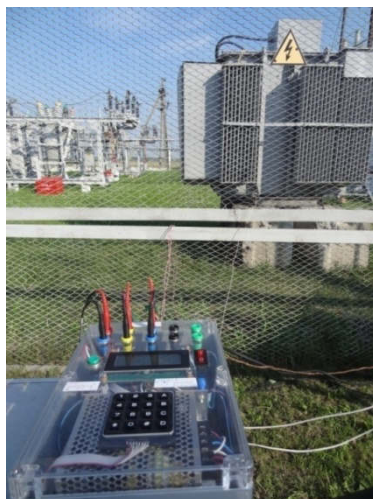


Рисунок 15 – Установка системы управления при стендовых испытаниях

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе получены и защищаются следующие результаты:

1. При расчете установившегося режима распределительной сети 35 кВ, включающей воздушные линии электропередачи, необходим учет в схеме замещения взаимных междуфазных индуктивностей, а также междуфазных и фазных емкостей линий для конкретного расположения фаз, поскольку их значения неодинаковы из-за наличия естественной несимметрии. Это существенно повышает точность расчета параметров режима сети, в том числе напряжения смещения нейтрали, по которому осуществляется настройка ДГР.

2. Разработаны с применением теории расчетов и анализа режимов электрических сетей, уравнений метода зеркальных отображений, математическая модель и алгоритм расчета режима ОЗЗ в электрических сетях напряжением 35 кВ, учитывающие взаимные индуктивности и емкости (фазные и междуфазные), определенные с учетом несимметрии линии, а также положение точки замыкания. Математическая модель позволяет определять емкостные токи линии и перенапряжения в ходе решения дифференциальных уравнений и рассчитывать электрические сети при заданных параметрах.

3. Разработана вспомогательная модель в виде системы уравнений установившегося режима сети до появления ОЗЗ, позволяющая произвести расчет начальных условий. В отличие от представленных ранее данная модель составлена на основе метода фазных координат с учетом естественной несимметрии линий. Разработанная модель позволяет определять (или проверять) допустимую расстройку ДГР по величине напряжения смещения нейтрали в нормальном режиме.

4. Разработан алгоритм системы управления ДГР, использующий два принципа настройки ДГР (экстремальный и частотный), в которых ключевыми параметрами настройки являются соответственно напряжение смещение нейтрали и частота свободных колебаний в КНП.

5. Определено, что при выделении свободной составляющей напряжения в КНП целесообразно использовать пакетное вейвлет преобразование и метод расчета коэффициентов авторегрессии Берга, позволяющих повысить точность определения частоты свободных колебаний в КНП на 5,3%.

6. Разработана в программном продукте Matlab (Simulink) имитационная модель электрической сети с ДГР для оценки качества компенсации емкостных токов при ОЗЗ разработанной системой управления ДГР, позволяющая оценить параметры режима во всех точках схемы, анализировать особенности протекания процессов в реальном времени, а также влияние на параметры режима дополнительных факторов (изменение конфигурации сети, изменения величины и характера нагрузки).

7. Созданы, позволяющие полностью автоматизировать процесс реализации алгоритма системой управления ДГР, электротехнические блоки, проведена модернизация стандартных библиотечных блоков SimPowerSystems, созданы блоки изменения конфигурации сети и изменения характера нагрузки, для обеспечения достоверности результатов моделирования.

8. Разработана программа и методика стендовых испытаний макета ДГР и системы управления. Экспериментально доказано, что кратность изменения индуктивности составляет 4, что подтверждает теоретические расчеты.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых научных изданиях, вошедших в перечень ВАК

1. **Сафонов, Д. Г.** Имитационное моделирование функционирования распределительной сети с дугогасящим реактором / Д.Г. Сафонов // Омский научный вестник. – 2018. – № 6 (162). – С. 98–102.

2. **Сафонов, Д. Г.** Определение напряжения нулевой последовательности с учетом естественной несимметрии параметров воздушной линии электропередачи / Д.Г. Сафонов, В.А. Ощепков, С.С. Гиршин // Омский научный вестник. – 2016. – № 1 (145). – С. 58–60.

3. **Сафонов, Д. Г.** Разработка алгоритма автоматической настройки компенсации емкостных токов на основе существующих методов / Сафонов Д. Г., Осипов Д. С., Долингер С. Ю. // Омский научный вестник. – 2016. – № 4 (148). – С. 79–84.

4. **Сафонов, Д. Г.** Учет дополнительных потерь мощности в электрооборудовании потребителей и систем электроснабжения при отклонениях напряжения / Д.Г. Сафонов, С.Ю. Долингер // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 5. – С. 279.

5. **Сафонов, Д. Г.** Оценка дополнительных потерь мощности от снижения качества электрической энергии в элементах систем электроснабжения / Д.Г. Сафонов, В.Н. Горюнов, С.Ю. Долингер, А.Г. Люtareвич, В.Т. Черемисин // Омский научный вестник. – 2013. – № 2 (120). – С. 178–183.

Публикации в материалах конференций, входящих в библиографическую базу Web of Science

6. **Safonov, D. G.** The Calculation of Steady-State Mode of 35 KW Radial System with Arc Suppression Coils Considering Asymmetry of Power Lines / D.G. Safonov, S.S. Girshin, V.N. Goryunov, E.A. Kuznetsov, E.V. Petrova // 2016 IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering. Florence, June 07–10. 2016. P. 1–5. DOI: 10.1109/EEEIC.2016.7555455.

Публикации в материалах конференций, входящих в библиографическую базу Scopus

7. **Safonov, D. G.** Analysis of Asymmetrical Modes in Medium Voltage Electrical Grids with Compensated Neutral / D.G. Safonov, S.S. Girshin, V.N. Goryunov, E.A. Kuznetsov, E.V. Petrova // 2016 the 3rd International Conference on Manufacturing and Industrial Technologies. Istanbul, May 25–27. 2016. Vol. 70. DOI: 10.1051/mateconf/20167010008.

В других изданиях научных трудов

8. **Сафонов, Д. Г.** Разработка программы и методики проведения экспериментальных исследований дугогасящего реактора и его системы управления / Д.Г. Сафонов, Д.В. Батулько // Экспериментальные и теоретические исследования в современной науке: сб. ст. по матер. XXVII междунар. науч.-практ. конф. № 18(26). – Новосибирск: СибАК, 2018. – С. 28-38.

9. **Сафонов, Д. Г.** Режимы работы нейтрали в электрических сетях 6-35 кВ / Д.Г. Сафонов, В.А. Васильев, В.В. Тевс // Россия молодая: передовые технологии – в промышленность: сб. ст. по матер. VII Всероссийской науч.-техн. конф. № 1(13). – Омск: ОмГТУ, 2017. – С. 100-103.

Патенты и свидетельства о регистрации

1. Свидетельство о регистрации электронного ресурса № 21771 от 14.04.2016 г. Алгоритм автоматической подстройки дугогасящего реактора / Д.Г. Сафонов, С.Ю. Долингер, Д.С. Осипов, ОмГТУ. – М.: ОФЭРНиО.

Печатается в авторской редакции

Подписано в печать 06.11.2019 г. Формат 60х84/16.

Отпечатано на дупликаторе. Усл.печ.л. 1,34.

Тираж 100 экз. Заказ 18.

Типография: 644050, Омск-50, пр. Мира, 11, т.: 65-32-08.

Омский государственный технический университет,
научное издательство