

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

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

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
д-р техн. наук, профессор
Горюнов Владимир Николаевич

Омск 2019

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 КОМПЕНСАЦИЯ ЕМКОСТНЫХ ТОКОВ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ.....	11
1.1 Теоретические основы компенсации емкостных токов в распределительных сетях.....	11
1.2 Классификация дугогасящих реакторов.....	21
1.3 Способы и методы автоматической настройки компенсации емкостных токов.....	24
1.4 Выводы по первой главе.....	33
2 РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ С КОМПЕНСИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДУГОГАСЯЩИМ РЕАКТОРОМ НАПРЯЖЕНИЕМ 35 КВ	36
2.1 Математическая модель электрической сети 35 кВ в режиме однофазного замыкания на землю.....	36
2.2 Математическая модель системы управления дугогасящим реактором.....	48
2.3 Математическая модель воздушных и кабельных линий, силового трансформатора	52
2.4 Определение начальных условий.....	56
2.5 Разработка алгоритма расчета установившегося режима сети с ДГР	65
2.6 Математическая модель дугового замыкания на землю.....	74
2.7 Выводы по второй главе.....	77
3 РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДУГОГАСЯЩИМ РЕАКТОРОМ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПАКЕТНОГО ВЕЙВЛЕТ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ	79
3.1 Теоретические основы вейвлет преобразования. Методы пакетного вейвлет преобразования для анализа режима работы электрических сетей.....	79
3.2 Принципиальная схема и алгоритм системы управления.....	85

3.3 Имитационное моделирование распределительной сети с компенсированной нейтралью с управляемым ДГР	97
3.4 Выводы по третьей главе.....	105
4 РАЗРАБОТКА МАКЕТА ДУГОГАСЯЩЕГО РЕАКТОРА	106
4.1 Требования к техническим характеристикам дугогасящего реактора	106
4.2 Расчет конструкции магнитной системы дугогасящего реактора	108
4.3 Проведение стендовых испытаний дугогасящего реактора с системой управления	120
4.4 Выводы по четвертой главе.....	127
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	128
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	130
Приложение А. Акты внедрения	142
Приложение Б. Программа для расчета напряжения смещения нейтрали в среде DELPHI при полной схеме замещения электрической сети	144
Приложение В. Свидетельства о регистрации электронного ресурса.....	145
Приложение Г. Схема электрических соединений системы управления дугогасящим реактором.....	146
Приложение Д. Программа и методика стендовых испытаний макета дугогасящего реактора и системы управления	147

ВВЕДЕНИЕ

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), CIRED (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 натурного 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.В37.21.0332 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.

1 КОМПЕНСАЦИЯ ЕМКОСТНЫХ ТОКОВ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ

В данной главе рассматривается вопрос компенсации емкостных токов в распределительных сетях среднего напряжения, производится анализ различных решений в данной области, приводится оценка возникающих перенапряжений и напряжения смещения нейтрали. Кроме того, систематизируются положительные и отрицательные стороны применения дугогасящих реакторов в сетях среднего напряжения, анализируются основные способы настройки компенсации емкостных токов при изменении конфигурации сети. В заключении, проводится анализ выбора конструкции дугогасящего реактора, применяемого для защиты распределительной сети от однофазных замыканий, и определяются способы, реализуемые в разрабатываемой системе автоматического управления дугогасящим реактором.

1.1 Теоретические основы компенсации емкостных токов в распределительных сетях

Режим работы нейтрали в сетях 6-35 кВ регламентируется п.1.2.16 ПТЭ [71], в котором указано, что их работа может осуществляться с изолированной нейтралью или с заземленной через ДГР нейтралью, возможно также использование резистивного заземления.

При этом преимущества компенсированной через ДГР нейтрали возникают только в случае автоматической настройки в резонанс при плавной регулировке, тогда отсутствуют сверхдопустимые перенапряжения при ОЗЗ, в точке повреждения не происходит существенного разрушения электрооборудования, отсутствует необходимость немедленного отключения потребителя [92].

В разветвленных заводских и городских кабельных сетях наиболее часто применяются ДГР. При компенсации емкостных токов нейтральная точка может быть получена с помощью специального трансформатора (при отсутствии на силовом трансформаторе нулевого вывода) [40].

Этот способ заземления нейтрали создал немецкий инженер В. Петерсен в 20-х годах 19 века (часто можно услышать название «катушка Петерсена») [89].

Достоинства компенсации через ДГР: [87]:

- ✓ при возникновении ОЗЗ нет необходимости отключения сети;
- ✓ небольшая величина тока в точке повреждения (при настройке ДГР в резонанс);
- ✓ возможность самоустранения ОЗЗ в воздушных линиях (при настройке ДГР в резонанс).

Недостатками компенсации через ДГР могут быть:

- ✓ при значительной расстройке компенсации появление дуговых перенапряжений;
- ✓ при продолжительном присутствии дугового замыкания в электрической сети повышается вероятность возникновения множественных повреждений;
- ✓ при существенной расстройке компенсации возможен переход однофазного замыкания в двухфазное;
- ✓ при недокомпенсации возникновения больших величин смещений нейтрали и возможность появления неполнофазных режимов;
- ✓ появление существенных смещений нейтрали в воздушных сетях при настройке в резонанс;
- ✓ возникновение трудностей, связанных с обнаружением места повреждения;
- ✓ опасность получения электротравм сотрудниками и другими людьми при длительном присутствии ОЗЗ в сети;
- ✓ при малых значениях тока поврежденного присоединения появляются трудности в обеспечении корректной работы устройств релейной защиты от однофазных замыканий.

В нашей стране режим заземления нейтрали через ДГР используется в большинстве случаев в разветвленных кабельных системах электроснабжения со значительными емкостными токами [37]. Изоляция кабеля не восстанавливается, как это происходил в воздушной сети, поэтому при появлении повреждения

обеспечение полной компенсации тока в точке повреждения не приводит к его ликвидации. Следовательно, для кабельных сетей одно из достоинств такого режима заземления нейтрали исключается [44].

В последние годы наблюдается тенденция увеличения сетей напряжением 6-10 кВ, при этом установленная мощность устройств компенсации на подстанциях не меняется, что характеризует работу сетей среднего напряжения со значительной недокомпенсацией, что является недопустимым при работе сетей с компенсированной нейтралью. Так, согласно ПТЭ [70], допускается перекомпенсация в 5%, иначе данный способ теряет все свои преимущества. Это требование приводит к необходимости применения управляемых дугогасящих реакторов. Возможно также использование реакторов со ступенчатой регулировкой совместно с управляемым реактором малой мощности (рисунок 1.1). Этот способ достаточно экономичен в связи с тем, что нет необходимости в приобретении реактора большой мощности с плавной регулировкой. Такой подход возможен в сетях с мало изменяющимися емкостными токами [74].

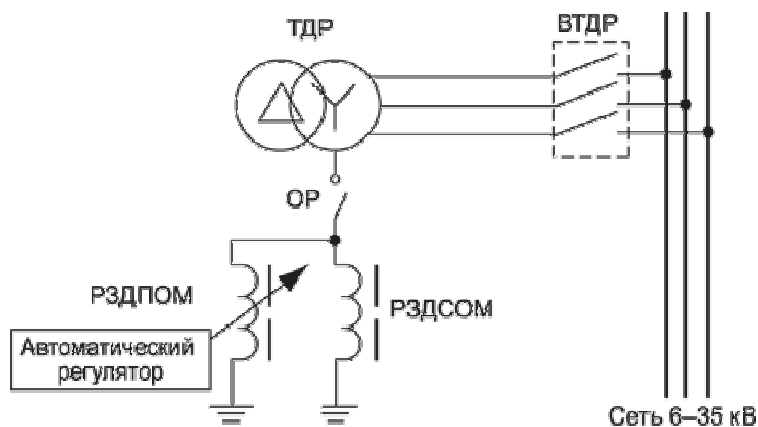


Рисунок 1.1 – Схема параллельного подключения ступенчатого и плунжерного дугогасящих реакторов в сетях 6–35 кВ (привод по [40])

Следует упомянуть, что ДГР является средством компенсации только основной частоты тока ОЗЗ. Если в электрических сетях имеются источники высших гармоник, то помимо промышленной частоты в токе ОЗЗ могут

присутствовать высшие гармоники и при определенных обстоятельствах усиливаться [14].

Режим заземления нейтрали через ДГР в странах Скандинавии используется в основном в сетях с воздушными линиями, поскольку в данном случае он является самым эффективным. Наличие скальных пород приводит к значительному сопротивлению грунта в этих странах, поэтому одним из достоинств режима заземления через ДГР является обнаружение ОЗЗ через высокие переходные сопротивления 3-5 кОм [110]. Такой режим заземления нейтрали используется в Германии, Австрии, Швейцарии в воздушных сетях.

Проблема однофазных замыканий на землю эффективно решается путем компенсации емкостного тока, так как данный способ можно считать бесконтактным средством гашения дуги [40]. Показатель эффективности компенсации \mathcal{E}_k может быть определен по выражению [36]:

$$\mathcal{E}_k = [(n_{\text{общ}} - n_{\text{кз}}) / n_{\text{общ}}] \cdot 100\% \quad (1.1)$$

где $n_{\text{общ}}$ – общее число замыканий;

$n_{\text{кз}}$ – число замыканий на землю, перешедших в короткое замыкание.

Статистика исследований [42], опубликованная ОАО «Фирма ОРГРЭС», характеризует показатель эффективности \mathcal{E}_k сети с изолированной нейтралью на уровне 30 %, а сети с компенсированной через ДГР нейтралью со ступенчатым регулированием – 60 %, сети при наличии плунжерных ДГР с плавной автоматической регулировкой – 90 %.

Преимущества автоматической компенсации [79]:

- ✓ снижение тока в месте возникновения ОЗЗ до минимальной величины;
- ✓ снижение перенапряжений, появляющихся при дуговых ОЗЗ, до величины $2,5U_{\phi}$ при настройке в резонанс;
- ✓ продолжительная работа сети при возникновении ОЗЗ.

Таким образом, все достоинства компенсации существуют при резонансной настройке или незначительной перекомпенсации в 1-3 % [105].

Следовательно, актуальным является применение автоматических систем управления при возможности плавного регулирования ДГР, поскольку в сети изменение емкостного тока происходит в соответствии с режимом работы [36].

В [40] приводятся примеры и результаты применения комплексного подхода к компенсации в европейских странах и России, авторы приходят к выводу, что наиболее эффективным подходом к гашению дуги ОЗЗ является комплексная система, которая включает плавнорегулируемый ДГР, автоматический регулятор и устройство селективного определения места возникновения ОЗЗ. Данный подход к компенсации подтверждает свою эффективность даже в сетях с малыми емкостными токами.

Комбинированное заземление нейтрали.

В последнее время успешно внедряется способ, при котором в нейтрали одновременно используются ДГР и резистор, при этом его эффективность сильно зависит от правильности выбора этих устройств [23]. По мнению авторов статьи [40] правильным решением является установка плунжерного ДГР с автоматической настройкой в резонанс (рисунок 1.2).

В нормальном режиме работы нейтраль сети соединена с ДГР, который имеет автоматическую систему управления. При возникновении ОЗЗ происходит компенсация емкостного тока и снижение величины перенапряжений. Резистор может подключаться параллельно ДГР с целью определения и отключения места повреждения. Резистор может использоваться и при постоянном включении [54].

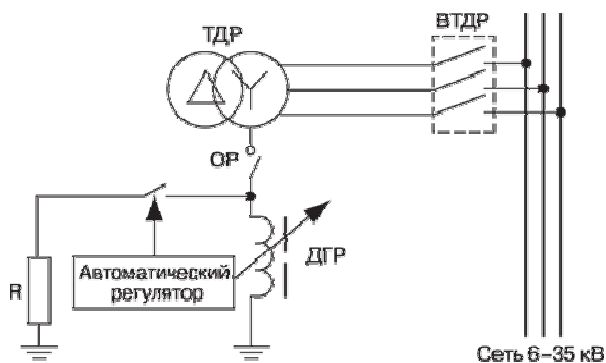


Рисунок 1.2 – Схема подключения плунжерного дугогасящего реактора и высокоомного резистора (привод по [40])

Перенапряжения в сетях с компенсированной нейтралью.

При настройке ДГР в резонанс возникает ряд положительных условий при ОЗЗ, о которых говорилось ранее. Отличием от сетей с применением изолированной нейтрали в данном случае является то, что ОЗЗ с самогашением дуги является причиной процесса затухающего изменения напряжения нейтрали, имеющего колебательный характер. И чем ближе будет коэффициент компенсации K к единице, тем ближе к промышленной будет частота изменения напряжения нейтрали [21].

В процессе эксплуатации сети может происходить изменение ее конфигурации, при этом отсутствие необходимых мощности ДГР и систем автоматической настройки компенсации не позволяет обеспечить настройку в резонанс. Невозможным также оказывается выполнение требований о работе сети с перекомпенсацией до 5 % [46].

Расстройка компенсации приводит к увеличению составляющей тока основной частоты в месте ОЗЗ и появления перенапряжений. Анализ процессов замыкания и гашения дуги в режимах отличных от полной компенсации, показывают что устранение дугового замыкания сопровождается наложением на установившееся напряжение основной частоты свободной составляющей близкой частоты [90].

Свободная составляющая появляется из-за колебаний в контуре $L_p - 3C$ (индуктивность ДГР – емкость сети на землю). Частота свободных колебаний от степени компенсации может быть получена из следующих выражений [21]:

$$K = \frac{1}{3\omega^2 L_p C}, \quad (1.2)$$

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{3 \cdot L_p C}}. \quad (1.3)$$

Преобразуя выражения (1.2) и (1.3), получим частоту свободной составляющей, т.е. напряжения на нейтрали:

$$f = \frac{f_{50}}{\sqrt{1/K}} = 50\sqrt{K}, \quad (1.4)$$

График зависимости частоты свободных колебаний от коэффициента компенсации представлен на рисунке 1.3. Из графика видно, что при недокомпенсации частота свободной составляющей будет меньше 50 Гц, а при перекомпенсации больше.

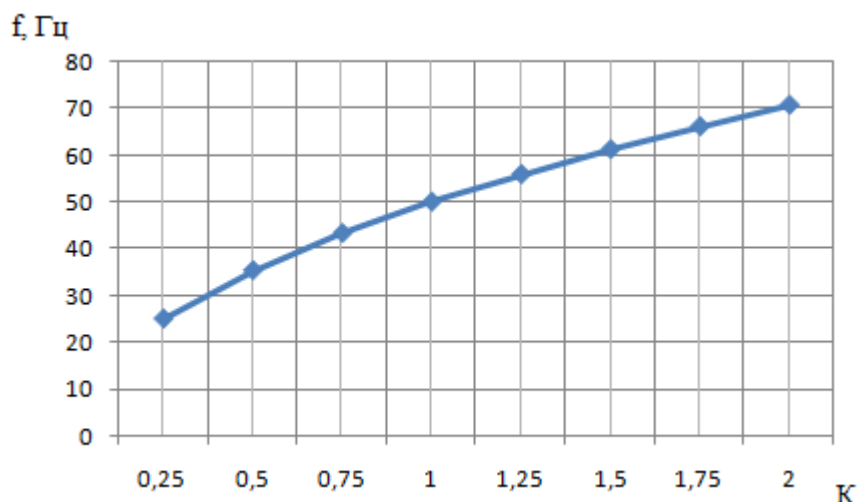


Рисунок 1.3 – Зависимость частоты свободной составляющей напряжения от степени компенсации

Напряжение смещения нейтрали в распределительных сетях с дугогасящим реактором.

Напряжение смещения нейтрали наиболее часто является главным показателем, используемым при настройке дугогасительных реакторов в резонанс. Упрощенная схема замещения распределительной электрической сети представлена на рисунке 1.4. При составлении схемы замещения можно не учитывать продольные активные и индуктивные сопротивления воздушных и кабельных линий, генераторов, трансформаторов, а также междофазные проводимости линий и нагрузок. Эти проводимости включены на источники неизменных линейных напряжений (на рисунке 1.4 обозначены пунктиром) и не влияют на напряжения относительно земли. Эквивалентные проводимости фаз сети на землю $\dot{Y}_{aa}, \dot{Y}_{bb}, \dot{Y}_{cc}$ определяются собственными емкостями на землю кабелей,

воздушных линий, и другого оборудования сети. Емкость на землю сетей 6-35 кВ различного назначения изменяется в широких пределах [15].

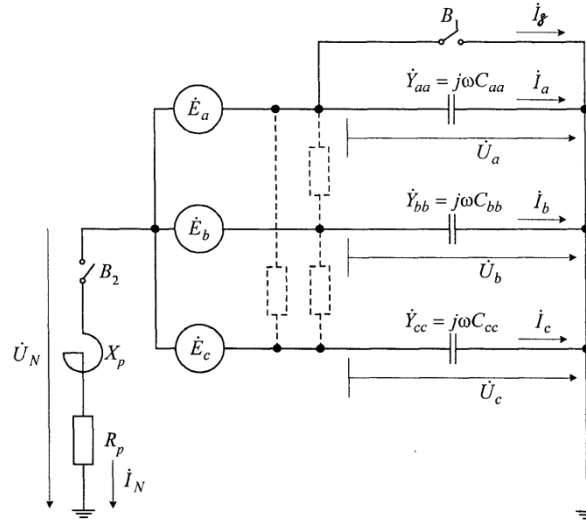


Рисунок 1.4 – Схема замещения сети

В случае несимметрии проводимостей сети относительно земли, т.е. $\dot{Y}_{aa} \neq \dot{Y}_{bb} \neq \dot{Y}_{cc}$. При разомкнутых ключах B_1 и B_2 на рисунке 1.4 и несимметричных проводимостях для сети можно составить следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} \dot{E}_a = \dot{U}_a - \dot{U}_N; \\ \dot{E}_b = \dot{U}_b - \dot{U}_N; \\ \dot{E}_c = \dot{U}_c - \dot{U}_N. \end{cases} \quad \begin{cases} \dot{I}_a = \dot{Y}_{aa} \cdot \dot{U}_a; \\ \dot{I}_b = \dot{Y}_{bb} \cdot \dot{U}_b; \\ \dot{I}_c = \dot{Y}_{cc} \cdot \dot{U}_c. \end{cases} \quad (1.5)$$

В этом случае сеть работает с изолированной нейтралью, следовательно, по первому закону Кирхгофа $\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c = 0$. При подставлении в данное выражение токов и напряжений из (5) получается напряжение смещения нейтрали:

$$\dot{U}_N = - \frac{\dot{Y}_{aa} \cdot \dot{U}_a + \dot{Y}_{bb} \cdot \dot{U}_b + \dot{Y}_{cc} \cdot \dot{U}_c}{\dot{Y}_{aa} + \dot{Y}_{bb} + \dot{Y}_{cc}}. \quad (1.6)$$

В случае несимметрии проводимостей сети $\dot{Y}_{aa} \neq \dot{Y}_{bb} \neq \dot{Y}_{cc}$, если система ЭДС симметричная $\dot{E}_a + \dot{E}_b + \dot{E}_c = 0$, напряжение смещения нейтрали будет отлично от нуля. При равенстве проводимостей двух фаз $\dot{Y}_{bb} = \dot{Y}_{cc} = \dot{Y}$ и отличии проводимости в третьей фазе $\dot{Y}_{aa} = \dot{Y} + \Delta\dot{Y}_{aa}$ напряжение смещения нейтрали будет равняться [16]:

$$\dot{U}_N = \frac{\Delta\dot{Y}_{aa} \cdot \dot{U}_a}{3\dot{Y} + \Delta\dot{Y}_{aa}} \quad (1.7)$$

Таким образом, можно представить выражение при несимметричных проводимостях всех трех фаз ($\dot{Y}_{aa} = \dot{Y}$, $\dot{Y}_{bb} = \dot{Y} + \Delta\dot{Y}_{aa}$, $\dot{Y}_{cc} = \dot{Y} + \Delta\dot{Y}_{cc}$):

$$\dot{U}_N = \frac{\Delta\dot{Y}_{bb} \cdot \dot{E}_b + \Delta\dot{Y}_{cc} \cdot \dot{E}_c}{3\dot{Y} + \Delta\dot{Y}_{bb} + \Delta\dot{Y}_{cc}} \quad (1.8)$$

С физической точки зрения, наличие дополнительной проводимости означает, что между землей и фазой включен источник тока величиной $\dot{I} = \Delta\dot{Y}\dot{E}$, который создает смещение нейтрали при протекании через проводимости всех трех фаз $3\dot{Y}$. Если все дополнительные проводимости $\Delta\dot{Y}_{ii}$ равны нулю, то и напряжение смещения нейтрали отсутствует. То есть при $\dot{Y}_{aa} = \dot{Y}_{bb} = \dot{Y}_{cc}$ $U_N = 0$. При этом $\dot{U}_a = \dot{E}_a$, $\dot{U}_b = \dot{E}_b$, $\dot{U}_c = \dot{E}_c$ [111].

Как правило, нулевое смещение нейтрали характерно для кабельных сетей. В воздушных сетях 6-35 кВ емкости фаз относительно земли различны, поэтому напряжение смещения нейтрали обычно находится в диапазоне 0,5-5%. [41].

Резонансное смещение нейтрали в сети с дугогасящим реактором

Определим напряжение смещения нейтрали с учетом активного сопротивления реактора R_p (рисунок 1.5). При этом известно напряжение смещения нейтрали при отключенном дугогасящем реакторе (1.6).

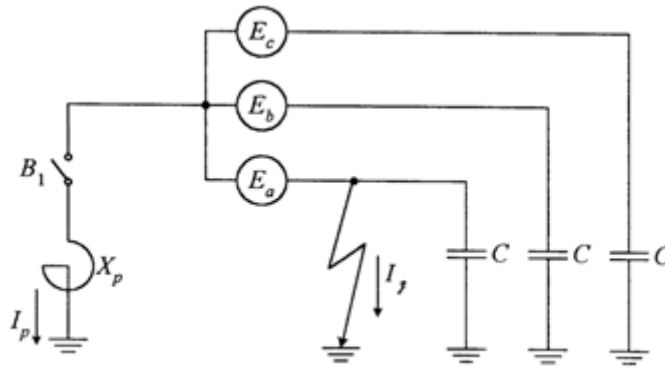


Рисунок 1.5 – Емкостная схема замещения сети

Тогда, согласно теореме об эквивалентном генераторе, напряжение смещения нейтрали при включенном дугогасящем реакторе равно [15]

$$\dot{U}_N = \frac{\dot{U}_{Nxx} \cdot (R_p + j\omega L_p)}{R_p + j\omega L_p + \frac{1}{3 \cdot j\omega C}},$$

где \dot{U}_{Nxx} - напряжение смещения нейтрали при отключенном реакторе;

R_p , L_p - активное сопротивление и индуктивность реактора.

Перепишем данное выражение, введя коэффициент компенсации

$$\dot{U}_N = \frac{\dot{U}_{Nxx} \cdot (R_p + j\omega L_p)}{R_p + j\omega L_p \cdot (1 - K)}.$$

Если $K=1$, то

$$U_N = |\dot{U}_N| = U_{Nxx} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{\omega L_p}{R_p}\right)^2} \approx U_{Nxx} \cdot q. \quad (1.9)$$

Величина $q = \frac{X_p}{R_p}$ – добротность реактора. В случае присутствия несимметрии в сети ($U_{Nxx} \neq 0$), напряжение на нейтрали U_N может достигать опасных для изоляции величин [57, 78]. Схема замещения сети представляет собой последовательное соединение емкости $3C$ всех фаз относительно земли и индуктивность дугогасящего реактора L_p . (рисунок 1.6). При $K=1$ и $R_p=0$ в схеме замещения возникает резонанс напряжений. Этот контур включается на напряжение смещения нейтрали, определенное без учета реактора [92].

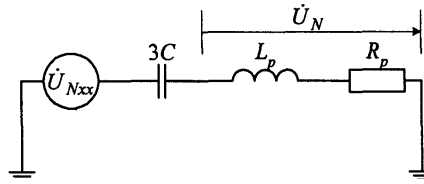


Рисунок 1.6 – Эквивалентная схема замещения сети для определения напряжения смещения нейтрали

1.2 Классификация дугогасящих реакторов

В соответствии с руководящими документами [70, 72] электрические сети напряжением 35 кВ классифицированы как сети с малыми токами замыкания на землю. Режимы работы нейтрали установлены следующие: изолированная или заземленной через ДГР. Опыт эксплуатации показывает, что наиболее часто нарушения нормального режима работы сетей обусловлены возникновением ОЗЗ. При таком повреждении может осуществляться работа сети необходимое количество времени, достаточного для устранения данного повреждения. Вместе с этим ток в точке повреждения должен иметь значение, при котором возникало его самогашение или устойчивое горение дуги с незначительной вероятностью перехода в двухфазное замыкание. Если токи ОЗЗ в электрических сетях имеют высокие значения, то нужно применять ДГР [70, 71].

ДГР, регулируемые без напряжения. Регулирование таких реакторов осуществляется переключением ответвлений регулировочной обмотки, имеющей несколько ответвлений. Переключение осуществляется вручную на отключенном от сети реакторе. Кратность регулирования обычно равняется двум.

Вольт-амперная характеристика таких ДГР имеет линейный характер при увеличении напряжения до $1,1U_{ном}$. Высшие гармоники в токе отсутствуют. Активные потери не превышают 2,5 % от номинальной мощности ДГР. Они имеют простую технологию изготовления и выпускаются много десятилетия. При этом способ регулирования без напряжения ограничивает их использование в современных электрических сетях, поскольку их применение целесообразно только в качестве нерегулируемых [75].

ДГР с фазоуправляемым коммутатором. Принцип регулирования заключается в изменении времени включения индуктивности в цепь в каждом полупериоде приложенного напряжения, что можно осуществить с помощью управляемых тиристоров высокой мощности [11].

В цепь последовательно включаются ДГР (нерегулируемый) и тиристорный коммутатор. При изменении угла включения тиристоров происходит регулирование тока ДГР. Быстродействие работы ДГР составляет величину порядка 0,01 с.

Данный тип ДГР соответствует большинству требований, но его применение необходимо обосновывать, поскольку имеется ряд недостатков, таких как создание дополнительных помех в электрической сети при постоянных коммутациях мощного ДГР. Кроме того, использование такого ДГР ограничивают достаточно сложные алгоритмы работы его системы управления из-за присутствия квазистационарного переходного процесса в КНП сети. Кроме того, наличие существенных значений высших гармоник в токе реактора также делает его использование нецелесообразным.

ДГР с регулированием под напряжением. Эти реакторы имеют устройства переключения ответвлений обмотки под напряжением (РПН) электромеханического типа.

В этих реакторах используются тиристоры, что обеспечивает им быстродействие. При этом массового применения данный тип ДГР не получил ввиду низкой надежности в эксплуатации.

Плунжерные ДГР. Конструктивно ДГР данного типа содержит два цилиндрических сердечника, между которыми имеется регулируемый зазор, по которым, включая ярма, замыкается магнитный поток [13].

Реактор имеет основную, измерительную на 100 В и дополнительную обмотки. Изменение зазора выполняется электроприводом, включаемым автоматикой в соответствии с применяемым алгоритмом управления при номинальном напряжении, для ограничения величины изменения зазора имеется блокировка.

Несколько десятилетий назад электромеханические системы управления характеризовались низкой надежностью, но с развитием теории электропривода и использованием высокотехнологичных материалов ситуация изменилась, что открыло широкие возможности применения ДГР с регулируемым зазором магнитопровода.

Плунжерные ДГР обладают высокой точностью настройки и широким диапазоном регулирования. Статистика исследований [42] говорит, что 30 лет эксплуатации плунжерных ДГР характеризуют их надежным электрооборудованием. Они удовлетворяют всем требованиям по компенсации емкостных токов в нормальном режиме работы, а значит являются высокоэффективным оборудованием для регулирования в режиме ОЗЗ [26].

ДГР с подмагничиванием магнитопровода. В этих реакторах параметры регулируются посредством подмагничивания, которое бывает продольным, поперечным и кольцевым. Простота регулирования, высокая надежность и высокое быстродействие характеризуют их широкое применение в системах компенсации в режиме ОЗЗ [16].

По конструкции ДГР с подмагничиванием состоят из двух функциональных блоков: электромагнитная часть и тиристорный преобразователь. У ДГР такого типа обязательно должна быть система управления [48].

Снижение уровня высших гармоник, источником которых является ДГР с подмагничиванием, может быть достигнуто применением дорогостоящих фильтров, а также применения специальных схем соединения обмоток, специальных режимов намагничивания, «расщепление» магнитопровода и т.п. [1].

Негативным свойством использования ДГР с подмагничиванием является постоянное потребление электроэнергии при его работе. При включении ДГР только в режиме ОЗЗ снижаются характеристики, связанные с ликвидацией кратковременных ОЗЗ.

Основная проблема в эксплуатации ДГР с подмагничиванием остается в системах автоматического управления, имеющих низкую надежность и некорректность в работе. Исследования в данной области [40] показали, что в

управлении ДГР с подмагничиванием эксплуатирующие их организации постоянно сталкиваются с различными трудностями.

1.3 Способы и методы автоматической настройки компенсации емкостных токов

Существуют следующие методы определения емкостного тока замыкания на землю: по модели сети, по фазовым характеристикам, по реактивным проводимостям, по частотным параметрам, по амплитудным (экстримальным) характеристикам, по соотношению величин параметров нулевой последовательности сети, по постоянной времени восстановления напряжения поврежденной фазы [104].

Эти методы относятся к косвенным, поскольку точка замыкания фазы в сети остается неизвестной, и измерение тока при этом не производится. Погрешность при использовании косвенных методов определения присутствует всегда, ее величина оценивается в каждом отдельном случае.

По модели сети. Сеть состоит из участков, которые моделируются с соответствующими параметрами, расчет емкостного тока проводится с учетом текущей конфигурации сети [83]. Этот метод применяется в нормальном режиме работы сети и в режиме ОЗЗ. Он характеризуется высокой погрешностью настройки, обусловленной изменением параметров некоторых участков сети от исходных значений и отклонением частоты. Сложность технической реализации этого метода заключается в необходимости передачи информации о состоянии сети по средствам телемеханики, на практика метод широко не применяется.

По реактивным проводимостям. В основе расчета емкостного тока замыкания на землю лежит измерение полной реактивной проводимости КНП сети, емкостной проводимости или разность емкостной проводимости сети и проводимости реактора [83, 18, 20].

На вторичную обмотку ДГР или через трансформатор подпитки параллельно или последовательно ДГР включается вспомогательный источник питания, который подает напряжение в нейтраль, прикладываемое к КНП сети.

Трансформатор выбирается с такими параметрами, чтобы в нормальном режиме и режиме ОЗЗ резонансная настройка компенсации менялась незначительно. Режим ОЗЗ определяется по напряжению в КНП.

Поскольку присутствует несимметрия фазных проводимостей сети, на ток вспомогательного источника накладывается дополнительный ток, при этом возникают биения, поэтому частота источника отличается от основной (порядка 2%) [10]. Измеряется полная реактивная проводимость КНП

$$b = \frac{I_{уст}}{U_{уст}} \sin \varphi, \quad (1.10)$$

где $U_{уст}$ и $I_{уст}$ – напряжение и ток вспомогательного источника, φ – угол между ними.

Пропорционально изменению проводимости происходит изменение компенсирующего тока.

Данный способ преимущественно используется в сетях с незначительной несимметрией фазных проводимостей относительно земли, в противном случае не может выполняться резонансная настройка ДГР. Из-за сложности защиты вспомогательного источника, включенного в нейтраль сети, этот способ следует применять в нормальном режиме работы. Кроме того, от емкости сети зависит чувствительность устройства и могут появиться автоколебания, что приводит к возрастанию погрешности настройки и ограничивает применение ДГР с регулируемым воздушным зазором. Также наблюдается низкая помехоустойчивость.

Представим метод, в основе которого лежит измерение емкостной проводимости сети [19, 20]. Через вторичную обмотку ДГР в нейтраль сети вводится напряжение не промышленной частоты.

Емкостная проводимость сети относительно земли на основной частоте пропорциональна измеряемой проводимости

$$b_c = \frac{\omega}{\omega_0} b_{c0}, \quad (1.11)$$

где b_c – емкостная проводимость сети на частоте 50 Гц;

b_{c0} – емкостная проводимость сети, измеренная на неосновной частоте;

ω_0 – угловая частота источника питания.

При частоте выше промышленной емкостную проводимость вычисляют по величине тока источника питания или тока в нейтрали сети, после этого определяют индуктивность ДГР и настраивают его [19]. Индуктивность (ток, проводимость) ДГР может быть определена посредством соответствующего датчика или с помощью специальных средств измерения и преобразования.

Этот способ применяется в сетях с незначительной несимметрией, при ОЗЗ генератор непрямоугольной частоты блокируется.

Недостаток этого способа заключается во влиянии сопротивления изоляции сети (например, в сетях с уровнем напряжения 0,4 кВ) на точность настройки компенсации, а также наличие дополнительного источника питания.

В сетях с высокой несимметрией фазных проводимостей относительно земли данный метод может реализоваться посредством подключения ДГР к нейтрали сети через быстродействующий «коммутатор», при этом отдельно измеряются емкость сети и индуктивность ДГР [83]. При данном способе можно настраивать ДГР как в нормальном режиме работы сети, так и при ОЗЗ. Точность настройки компенсации будет определяться погрешностью измерения L_p и C_0 и регулированием индуктивности ДГР.

При перемежающихся дугах этот способ характеризуется неустойчивой работой. [83]. В этом режиме настройку компенсации можно осуществить по частоте свободных колебаний в контуре нулевой последовательности сети. Кроме того, устройство содержит дополнительный источник питания.

Данный способ реализован в патенте [62].

По фазовым характеристикам. При таком способе в нормальном режиме работы сети измеряется фаза напряжения нейтрали по отношению к опорному

напряжению, а в режиме ОЗЗ – напряжение фазы, на котором произошло замыкание. Для обеспечения высокой точности настройки компенсации нужно обеспечить искусственную несимметрию проводимостей сети или использовать источник опорного напряжения [40, 50, 83].

Фазовый принцип компенсации наиболее просто может быть реализован посредством измерения фазы напряжения нейтрали φ_n . При неизменной величине φ_0 (постоянной несимметрии сети) фаза напряжения нейтрали φ_n практически определяется расстройкой компенсации. Влияние активных потерь сети практически исключается при точной настройке компенсации. Следовательно, для обеспечения высокой точности настройки система должна обладать высокой чувствительностью по углу φ_n , наименьшую постоянную времени авторегулирования и плавное регулирование индуктивности ДГР [2].

В действительности в сетях, в том числе и кабельных, фаза напряжения изолированной сети φ_0 при одинаковых значениях емкостного тока может значительно меняться, что создает погрешность в систему автоматической настройки компенсации. Искусственное смещение нейтрали с помощью подключения небольшой емкости к фазе сети позволяет снизить влияние φ_0 на точность настройки компенсации, то же самое можно получить при подключении в нейтраль источника промышленной частоты [40, 50, 83].

При искусственном смещении нейтрали выражение для напряжения нейтрали изолированной сети запишем в виде:

$$\dot{U}_{n,и} = \dot{U}_0 - \dot{U}_{н\Delta c}, \quad (1.12)$$

где $\dot{U}_{н\Delta c}$ – составляющая напряжения нейтрали, обусловленная включением дополнительной емкости.

При оценке емкости и фазы подключения конденсатора и определении погрешности настройки компенсации следует принять во внимание уровень напряжения нейтрали. При настройке компенсации в резонанс напряжение нейтрали должно быть не более $0,15U_\phi$.

На практике при подключении емкости Δc к любой фазе напряжение нейтрали компенсированной сети можно оценить по выражению

$$U_n = QU_{n.u} \leq 0,15U_\phi, \quad (1.13)$$

где Q – добротность сети, $Q = U_{n.рез}/U_0$ ($U_{n.рез}$ – напряжение нейтрали при настройке ДГР в резонанс без Δc).

Такой способ при настройке ДГР может быть применим в сетях с невысокой несимметрией сети в нормальном режиме работы, а при настройке в режиме ОЗЗ (при металлическом замыкании или непрерывном горении заземляющей дуги) – в сетях с высокой несимметрией фазных проводимостей. При этом при перемежающейся дуге устройство блокируется [75].

Недостатками данного способа являются необходимость искусственного смещения нейтрали, а также влияние активных потерь на точность настройки ДГР.

Данный способ реализован в патентах [61, 64].

По экстремальным (амплитудным) характеристикам. В устройствах, работающих по данному способу, в нормальном режиме работы определяется экстремум напряжения нейтрали или тока вводимого источника не промышленной частоты, подключаемого в нейтраль сети, а при ОЗЗ – минимум напряжения фазы с повреждением. А также существуют устройства настройки компенсации с применением экстремальных характеристик КНП сети [40, 50, 106].

Экстремальное регулирование характеризуется минимумом расстройки компенсации посредством регулирования индуктивности ДГР

$$u(t) = 1 - K(t), \quad (1.14)$$

где $K(t)$ – коэффициент настройки компенсации.

Напряжение нейтрали рассчитывается по выражению

$$U_n = \frac{U_0}{\sqrt{K^2(d_K^2 + 1) - 2K + 1}}, \quad (1.15)$$

где U_n , U_0 – относительные величины, приведенные к напряжению фазы;
 d_k – коэффициент демпфирования сети с изолированной нейтралью.

Продифференцировав выражение (1.15), проведем элементарные преобразования и получим

$$\frac{dU_n}{d_k} = \frac{U_0(K(d_k^2 + 1) - 1)}{(K^2(d_k^2 + 1) - 2K + 1)^{3/2}}. \quad (1.16)$$

Экстремальной величине U_n соответствует $K=1/(d_k^2+1)$, если пренебречь составляющей $d_k^2 \ll 1$ коэффициент настройки будет равняться $K=1$.

Экстремальное значение напряжения нейтрали ($K=1$) может быть определено по выражению:

$$U_n = \frac{U_0}{(d + p)}. \quad (1.17)$$

В диапазоне недокомпенсации ($0 < K < 1$) производная $dU_n/dI_p > 0$, в диапазоне перекомпенсации ($1 < K < 2$) производная $dU_n/dI_p < 0$, а в значении экстремума $dU_n/dI_p = 0$. Следовательно, автоматическую настройку компенсации можно осуществлять по приращению напряжения нейтрали (по производной)

Повысить эффективность этого метода можно за счет использования периодического разряда, подаваемого на сигнальную обмотку, от предварительно заряжаемого конденсатора в качестве источника не промышленной частоты [66]. Сигнал, который прямо пропорционален емкости фаз сети, создается амплитудным детектором на выходе дифференцирующего звена, соединенного с выходом обмотки трансформатора напряжения со схемой соединения в открытый треугольник.

Данный способ с настройкой при отсутствии ОЗЗ используется в сетях с малой и высокой несимметрией, например, в сетях с воздушными линиями напряжением 35 кВ, где при настройке ДГР в резонанс напряжение нейтрали не превышает $0,15 U_\phi$. В сетях, где напряжение нейтрали больше допустимой

величины, амплитудный способ может использоваться в режиме металлического замыкания на землю или при стационарной дуге [68].

Главное достоинство экстремального принципа регулирования заключается в отсутствии вспомогательного источника питания, поскольку используются напряжения и токи нулевой последовательности.

Недостатки данного способа: влияние активных потерь в КНП на точность настройки, при существенной расстройке компенсации снижение чувствительности измерительного устройства [67].

По частотным характеристикам. В методе настройки по частотным параметрам выполняются измерения частоты свободных колебаний в КНП сети при переходных процессах естественного и искусственного характера или при принудительной модуляции какого-нибудь параметра КНП сети [34, 50, 83].

Индуктивность ДГР и емкости фаз относительно земли образуют резонансный контур, который имеет два важных параметра: частота собственных колебаний ω_c и коэффициент затухания δ .

Согласно [106], можно записать выражение, связывающее коэффициент расстройки компенсации ν и частоту собственных колебаний контура ω_c , пренебрегая активными потерями в контуре:

$$\omega_c = \omega \sqrt{1 - \nu}. \quad (1.18)$$

При расстройке $\nu=1$ (ДГР отключен) частота собственных колебаний сводится к нулю. При точной настройке компенсации $\nu=0$ собственная частота контура равняется частоте источника ЭДС в сети (50 Гц), а в режиме перекомпенсации $\nu=-1$ частота собственных колебаний достигает значения 70 Гц.

Важнейшим моментом при технической реализации этого способа автоподстройки является то, что частота (период) собственных колебаний строго однозначно зависит от степени расстройки компенсации. Кроме того, высокая по сравнению с другими методами точность измерения расстройки и отсутствие

сложностей в технической реализации, делают этот способ привлекательным для разработчиков [18, 83].

В результате обрыва заземляющей дуги в контуре возникает колебательный обмен энергией между емкостью сети и ДГР с собственной частотой ω_c . В этот же момент производят измерение частоты напряжения нейтрали U_n , которая содержит информацию о расстройке компенсации, и регулируют индуктивность ДГР до значения, при котором частота свободных колебаний равняется 50 Гц.

В работе [18] рассматривается устройство, недостатком которого заключается в том, что измерение расстройки выполняется в течение сравнительно малого временного отрезка (0,2 - 0,5 с) только после самоликвидации ОЗЗ. А значит данный метод компенсации можно рекомендовать в сочетании с другими способами, которые позволят выполнить предварительную настройку ДГР в нормальном режиме и при длительном устойчивом замыкании на землю [106].

Ступенчато-регулируемые ДГР, регулируемые под напряжением с помощью переключений ответвлений обмотки тиристорными коммутаторами, значительно расширяют использование этого способа [40, 66]. Следует отметить, что свободные колебания в последовательном резонансном контуре появляются при любом изменении его параметров. При изменении конфигурации сети в нормальном режиме работы скачкообразно меняется емкость контура, при этом происходит переходной процесс. Но в некоторых случаях длительность такого процесса недостаточна для правильной работы автоматической компенсации.

Эту проблему можно решить искусственным созданием устойчивого переходного процесса, например, периодическим подключением и отключением обмотки или секции обмотки реактора к нейтрали сети. Изменение индуктивности ДГР выполняется переключением ответвлений его обмотки по разности основной и частоты свободных колебаний.

Продолжительность затухания свободной составляющей напряжения нейтрали определяет периодичность коммутации реактора. В действительности затухание длится около секунды. При этом продолжительность нахождения

реактора в отключенном состоянии будет достаточно порядка периода напряжения основной частоты. Вероятность возникновения ОЗЗ при отключенном ДГР очень мала, порядка 0,01.

Если возникло замыкание, то периодически отключать ДГР нельзя. В таком режиме обеспечивается нормальная компенсация емкостного тока замыкания, а необходимая настройка производится путем изменения частоты свободных колебаний напряжения нейтрали при отсутствии заземляющей дуги.

Данный способ настройки компенсации позволяет наиболее полно использовать переключающее устройство реактора, которое помимо изменения индуктивности ДГР необходимо для создания в КНП необходимого переходного процесса. Блок измерения при этом функционирует и в нормальном, и в аварийном режимах [34].

Данный способ настройки реализован в патентах [58, 63, 65].

По постоянной времени восстановления поврежденной фазы. Речь идет о времени достижения номинального значения напряжением на поврежденной фазе после погасания заземляющей дуги [82].

В основе работы системы автоподстройки ДГР лежит измерение времени восстановления напряжения поврежденной фазы τ , которое является основным критерием резонансной настройки КНП.

Для точного определения τ используют выражение [83]:

$$\tau = 0,64 \cdot 10^{-2} \frac{d \pm 4(1 - \sqrt{1 - v})}{d^2 + 8(1 - \sqrt{1 - v})^2}, \quad (1.19)$$

где знак «+» характеризует режим недокомпенсации, знак «-» – режим перекомпенсации.

Данный способ может быть применим только при перемежающейся дуге.

Он содержит следующие недостатки: сложность измерения продолжительности переходных процессов, высокая погрешность настройки компенсации.

По соотношению величин параметров нулевой последовательности сети. В данном случае применяется источник тока не промышленной частоты (кратный основной частоте), настройка осуществляется по отношению тока или напряжения неосновной частоты на ДГР к вводимому напряжению. При подключении источника параллельно ДГР настройку проводят по отношению токов неосновной частоты, протекающих через нейтраль сети и источник [82].

Этот способ также может обеспечить контроль настройки компенсации и селективную сигнализацию ОЗЗ. Источником тока является электромагнитный параметрический делитель частоты [82].

Данный способ настройки реализован в патентах [59, 60].

1.4 Выводы по первой главе

Выбор ДГР. 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 реактор с регулируемым зазором магнитопровода (плунжерный).

Немаловажен тот факт, что с учетом перспективного развития сетей идет планомерное внедрение плунжерных дугогасящих реакторов необходимой мощности. И для подстанций, на которых были установлены ступенчатые ДГР, внедряется способ параллельной установки ступенчатого и плунжерного реакторов с автоматическим регулированием [40].

Кроме того, тип реактора определяет эффективность применения выбранных методов автоматической настройки компенсации емкостных токов. Например, при использовании частотного регулирования, наибольшая погрешность будет наблюдаться у ДГР с подмагничиванием, у которых активные потери сильно зависят от тока подмагничивания и могут достигать значений 5–7% от компенсирующей мощности (у плунжерных ДГР этот показатель

составляет 2–3%) [50]. Плунжерные ДГР имеют более линейную вольт-амперную характеристику, что также позволяет использовать для их управления амплитудный метод регулирования. В большинстве работ [57,58], которые были рассмотрены, авторы склоняются к использованию плунжерных ДГР с автоматической системой управления.

Выбор способа управления. Выбор способа автоматической компенсации емкостных токов определяют тип проектируемого ДГР, сложность технической реализации, погрешность настройки компенсации, уровень напряжения смещения нейтрали и режим работы сети.

С учетом данных критериев 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.

Автоматическая настройка компенсации по частоте свободных колебаний в КНП с модуляцией индуктивности реактора при настройке реактора в нормальном режиме работы широко используется в сетях с величиной напряжения смещения нейтрали, находящейся в пределах допустимых значений. В сетях с высоким уровнем напряжения нейтрали настройка может производиться только в режиме замыкания на землю.

При этом методе точность настройки компенсации при перемежающей дуге по сравнению, например, с фазовым и экстремальным принципами намного выше, так как она в меньшей степени зависит от активных потерь в КНП сети.

Недостатком является то, что этот способ не может быть использован для настройки компенсации при устойчивом замыкании на землю.

Экстремальный способ с настройкой в нормальном режиме сети может применяться в сетях с малой и высокой несимметрией, например в сетях 35 кВ с воздушными линиями. При напряжении нейтрали, превышающем допустимые

значения, экстремальный принцип применим при металлическом замыкании и стационарной дуге.

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.

2 РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ С КОМПЕНСИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДУГОГАСЯЩИМ РЕАКТОРОМ НАПРЯЖЕНИЕМ 35 КВ

2.1 Математическая модель электрической сети 35 кВ в режиме однофазного замыкания на землю

Распределительная сеть и схема замещения приведены на рисунках 2.1, 2.2.

В качестве источника питания рассматриваются обмотки низшего напряжения питающего трансформатора Т. Допущение 1: ЭДС в обмотках низшего напряжения питающего трансформатора e_a, e_b, e_c не зависят от режима рассматриваемой сети 35 кВ.

Обозначим начальные фазы ЭДС $\varphi_{ea}, \varphi_{eb}, \varphi_{ec}$, а амплитудные значения $E_{a,\max}, E_{b,\max}, E_{c,\max}$.

Математическая модель источника питания [86]:

$$e_a = E_{a,\max} \sin(\omega t + \varphi_{ea}), \quad (2.1)$$

$$e_b = E_{b,\max} \sin(\omega t + \varphi_{eb}), \quad (2.2)$$

$$e_c = E_{c,\max} \sin(\omega t + \varphi_{ec}). \quad (2.3)$$

Уравнения режима для участка «Реактор-трансформатор» [86]:

$$i_p R_p + L_p \frac{di_p}{dt} = -\varphi_N, \quad (2.4)$$

$$e_a - i_{am} R_m - L_m \frac{di_{am}}{dt} = \varphi_{an} - \varphi_N, \quad (2.5)$$

$$e_b - i_{bm} R_m - L_m \frac{di_{bm}}{dt} = \varphi_{bn} - \varphi_N, \quad (2.6)$$

$$e_c - i_{cm} R_m - L_m \frac{di_{cm}}{dt} = \varphi_{cn} - \varphi_N, \quad (2.7)$$

$$i_p = i_{am} + i_{bm} + i_{cm}, \quad (2.8)$$

где i_p – ток в реакторе;

i_{am}, i_{bm}, i_{cm} – фазные токи в обмотке низшего напряжения питающего трансформатора;

R_p, L_p – активное сопротивление и индуктивность реактора;

R_m, L_m – активное сопротивление и индуктивность рассеяния обмотки низшего напряжения питающего трансформатора;

φ_N – потенциал нейтрали;

$\varphi_{an}, \varphi_{bn}, \varphi_{cn}$ – потенциалы на выводах трансформатора.

Подставим (2.8) в (2.4), разделим результат на L_p , а уравнения (2.5), (2.6), (2.7) разделим на L_m :

$$\frac{di_{am}}{dt} + \frac{di_{bm}}{dt} + \frac{di_{cm}}{dt} = -\frac{1}{L_p} (R_p (i_{am} + i_{bm} + i_{cm}) + \varphi_N), \quad (2.9)$$

$$\frac{di_{am}}{dt} = \frac{1}{L_m} (e_a - R_m i_{am} + \varphi_N - \varphi_{an}), \quad (2.10)$$

$$\frac{di_{bm}}{dt} = \frac{1}{L_m} (e_b - R_m i_{bm} + \varphi_N - \varphi_{bn}), \quad (2.11)$$

$$\frac{di_{cm}}{dt} = \frac{1}{L_m} (e_c - R_m i_{cm} + \varphi_N - \varphi_{cn}). \quad (2.12)$$

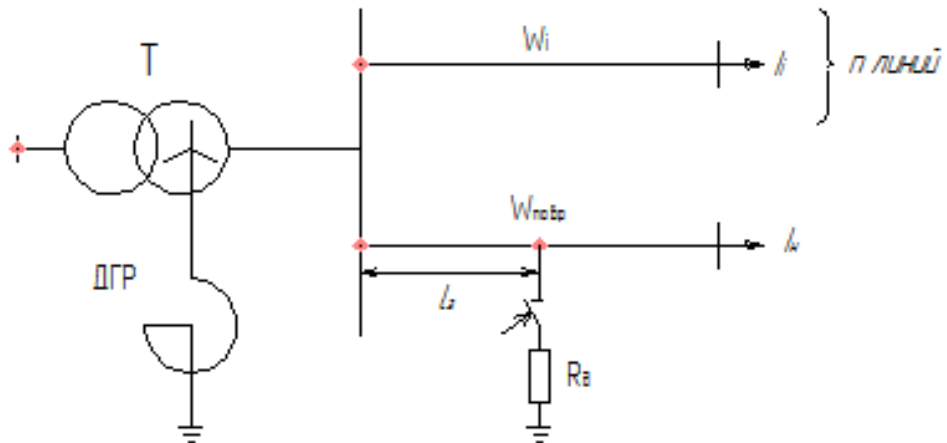


Рисунок 2.1 – Электрическая сеть

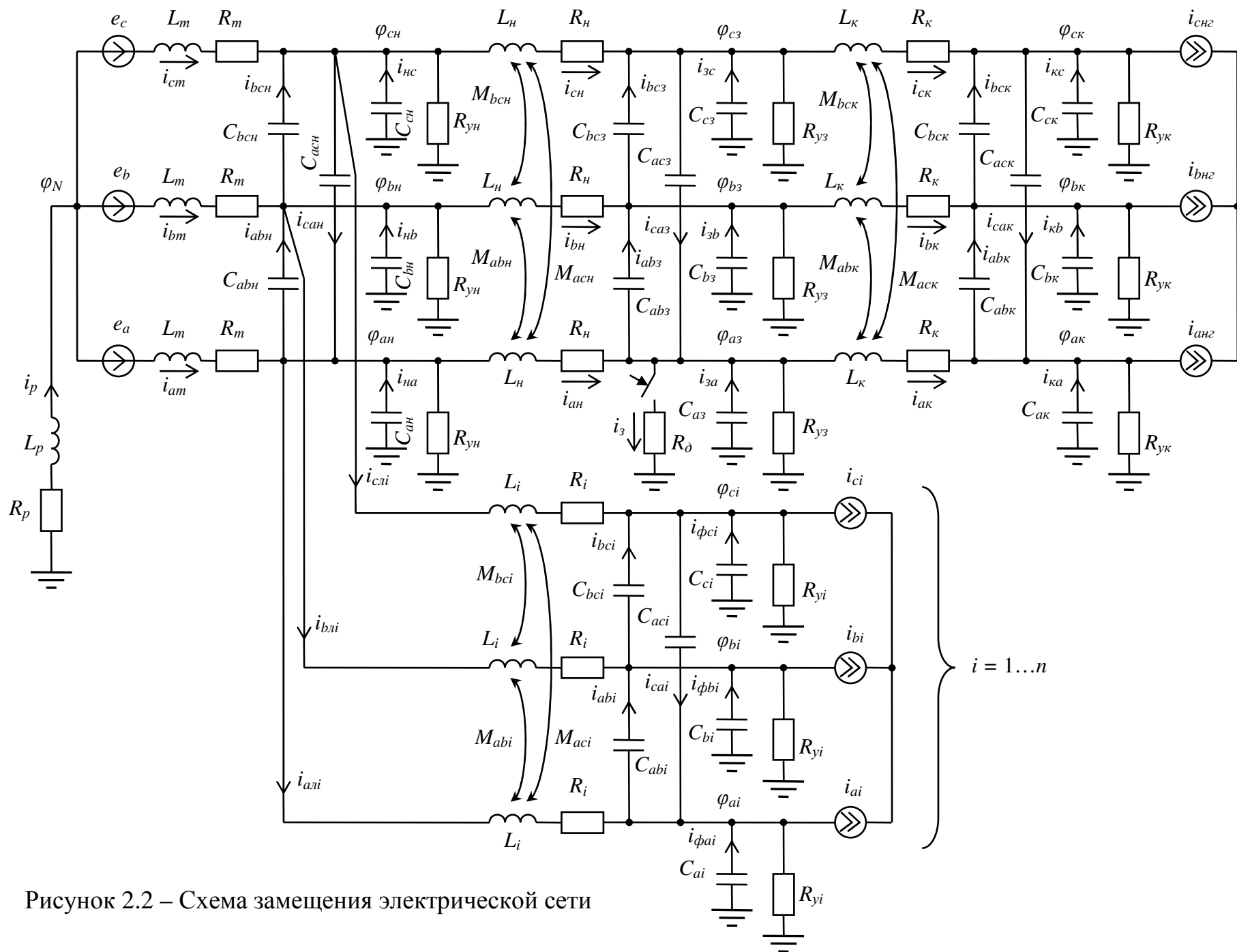


Рисунок 2.2 – Схема замещения электрической сети

Подставим (2.10)–(2.12) в (2.9) и разрешим полученное уравнение относительно потенциала нейтрали:

$$\varphi_N = (i_{am} + i_{bm} + i_{cm}) \frac{L_p R_m - L_m R_p}{3L_p + L_m} + \frac{\varphi_{an} + \varphi_{bn} + \varphi_{cn} - e_a - e_b - e_c}{3 + L_m/L_p}. \quad (2.13)$$

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

$$R_n i_{an} + L_n \frac{di_{an}}{dt} + M_{abn} \frac{di_{bn}}{dt} + M_{acn} \frac{di_{cn}}{dt} = \varphi_{an} - \varphi_{a3}, \quad (2.14)$$

$$R_n i_{bn} + L_n \frac{di_{bn}}{dt} + M_{abn} \frac{di_{an}}{dt} + M_{bcn} \frac{di_{cn}}{dt} = \varphi_{bn} - \varphi_{b3}, \quad (2.15)$$

$$R_n i_{cn} + L_n \frac{di_{cn}}{dt} + M_{bcn} \frac{di_{bn}}{dt} + M_{acn} \frac{di_{an}}{dt} = \varphi_{cn} - \varphi_{c3}, \quad (2.16)$$

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 междофазные индуктивности линии на том же участке.

Разрешим эти уравнения относительно производных:

$$\frac{di_{an}}{dt} = \frac{\Delta'_{an}}{\Delta'_n}, \quad (2.17)$$

$$\frac{di_{bn}}{dt} = \frac{\Delta'_{bn}}{\Delta'_n}, \quad (2.18)$$

$$\frac{di_{cn}}{dt} = \frac{\Delta'_{cn}}{\Delta'_n}, \quad (2.19)$$

где

$$\Delta'_n = \begin{vmatrix} L_n & M_{abn} & M_{acn} \\ M_{abn} & L_n & M_{bcn} \\ M_{acn} & M_{bcn} & L_n \end{vmatrix} = L_n (L_n^2 - M_{abn}^2 - M_{bcn}^2 - M_{acn}^2) + 2M_{abn}M_{bcn}M_{acn}, \quad (2.20)$$

$$\begin{aligned}\Delta'_{an} &= \begin{vmatrix} \varphi_{an} - \varphi_{a3} - R_n i_{an} & M_{abn} & M_{acn} \\ \varphi_{bn} - \varphi_{b3} - R_n i_{bn} & L_n & M_{bcn} \\ \varphi_{cn} - \varphi_{c3} - R_n i_{cn} & M_{bcn} & L_n \end{vmatrix} = \\ &= (\varphi_{an} - \varphi_{a3} - R_n i_{an})(L_n^2 - M_{bcn}^2) - (\varphi_{bn} - \varphi_{b3} - R_n i_{bn})(M_{abn}L_n - M_{bcn}M_{acn}) + \\ &+ (\varphi_{cn} - \varphi_{c3} - R_n i_{cn})(M_{abn}M_{bcn} - M_{acn}L_n),\end{aligned}\quad (2.21)$$

$$\begin{aligned}\Delta'_{bn} &= \begin{vmatrix} L_n & \varphi_{an} - \varphi_{a3} - R_n i_{an} & M_{acn} \\ M_{abn} & \varphi_{bn} - \varphi_{b3} - R_n i_{bn} & M_{bcn} \\ M_{acn} & \varphi_{cn} - \varphi_{c3} - R_n i_{cn} & L_n \end{vmatrix} = \\ &= (\varphi_{an} - \varphi_{a3} - R_n i_{an})(M_{bcn}M_{acn} - M_{abn}L_n) + (\varphi_{bn} - \varphi_{b3} - R_n i_{bn})(L_n^2 - M_{acn}^2) - \\ &- (\varphi_{cn} - \varphi_{c3} - R_n i_{cn})(M_{bcn}L_n - M_{abn}M_{acn}),\end{aligned}\quad (2.22)$$

$$\begin{aligned}\Delta'_{cn} &= \begin{vmatrix} L_n & M_{abn} & \varphi_{an} - \varphi_{a3} - R_n i_{an} \\ M_{abn} & L_n & \varphi_{bn} - \varphi_{b3} - R_n i_{bn} \\ M_{acn} & M_{bcn} & \varphi_{cn} - \varphi_{c3} - R_n i_{cn} \end{vmatrix} = \\ &= (\varphi_{an} - \varphi_{a3} - R_n i_{an})(M_{bcn}M_{abn} - M_{acn}L_n) - (\varphi_{bn} - \varphi_{b3} - R_n i_{bn})(M_{bcn}L_n - M_{abn}M_{acn}) + \\ &+ (\varphi_{cn} - \varphi_{c3} - R_n i_{cn})(L_n^2 - M_{abn}^2).\end{aligned}\quad (2.23)$$

Уравнения для остальных продольных ветвей линий записываются аналогичным образом.

Уравнения режима поперечных ветвей в начале линий:

$$i_{abn} = C_{abn} \frac{d(\varphi_{an} - \varphi_{bn})}{dt}, \quad (2.24)$$

$$i_{bcn} = C_{bcn} \frac{d(\varphi_{bn} - \varphi_{cn})}{dt}, \quad (2.25)$$

$$i_{can} = C_{acn} \frac{d(\varphi_{cn} - \varphi_{an})}{dt}, \quad (2.26)$$

$$i_{na} = -C_{an} \frac{d\varphi_{an}}{dt}, \quad (2.27)$$

$$i_{nb} = -C_{bn} \frac{d\varphi_{bn}}{dt}, \quad (2.28)$$

$$i_{nc} = -C_{cn} \frac{d\varphi_{cn}}{dt}, \quad (2.29)$$

$$i_{am} = i_{abn} - i_{can} - i_{na} + i_{an} + \sum_{i=1}^n i_{ali} + \frac{\varphi_{an}}{R_{yn}}, \quad (2.30)$$

$$i_{bm} = i_{bcn} - i_{abn} - i_{nb} + i_{bn} + \sum_{i=1}^n i_{bli} + \frac{\varphi_{bn}}{R_{yn}}, \quad (2.31)$$

$$i_{cm} = i_{can} - i_{bcn} - i_{cn} + i_{cn} + \sum_{i=1}^n i_{cli} + \frac{\varphi_{cn}}{R_{yn}}, \quad (2.32)$$

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.

Подставим (2.24)–(2.29) в (2.30)–(2.32):

$$(C_{abn} + C_{acn} + C_{an}) \frac{d\varphi_{an}}{dt} - C_{abn} \frac{d\varphi_{bn}}{dt} - C_{acn} \frac{d\varphi_{cn}}{dt} = i_{am} - i_{an} - \sum_{i=1}^n i_{ali} - \frac{\varphi_{an}}{R_{yn}}, \quad (2.33)$$

$$-C_{abn} \frac{d\varphi_{an}}{dt} + (C_{bcn} + C_{abn} + C_{bn}) \frac{d\varphi_{bn}}{dt} - C_{bcn} \frac{d\varphi_{cn}}{dt} = i_{bm} - i_{bn} - \sum_{i=1}^n i_{bli} - \frac{\varphi_{bn}}{R_{yn}}, \quad (2.34)$$

$$-C_{acn} \frac{d\varphi_{an}}{dt} - C_{bcn} \frac{d\varphi_{bn}}{dt} + (C_{acn} + C_{bcn} + C_{cn}) \frac{d\varphi_{cn}}{dt} = i_{cm} - i_{cn} - \sum_{i=1}^n i_{cli} - \frac{\varphi_{cn}}{R_{yn}}. \quad (2.35)$$

Разрешим уравнения (2.33)–(2.35) относительно производных:

$$\frac{d\varphi_{an}}{dt} = \frac{\Delta''_{an}}{\Delta''_n}, \quad (2.36)$$

$$\frac{d\varphi_{bn}}{dt} = \frac{\Delta''_{bn}}{\Delta''_n}, \quad (2.37)$$

$$\frac{d\varphi_{cn}}{dt} = \frac{\Delta''_{cn}}{\Delta''_n}, \quad (2.38)$$

где

$$\begin{aligned} \Delta''_n &= \begin{vmatrix} C_{abn} + C_{acn} + C_{an} & -C_{abn} & -C_{acn} \\ -C_{abn} & C_{bcn} + C_{abn} + C_{bn} & -C_{bcn} \\ -C_{acn} & -C_{bcn} & C_{acn} + C_{bcn} + C_{cn} \end{vmatrix} = \\ &= (C_{abn} + C_{acn} + C_{an})[(C_{bcn} + C_{abn} + C_{bn})(C_{acn} + C_{bcn} + C_{cn}) - C_{bcn}^2] - \\ &- C_{abn}[C_{acn}(C_{acn} + C_{bcn} + C_{cn}) + C_{bcn}C_{acn}] - C_{acn}[C_{abn}C_{bcn} + C_{acn}(C_{bcn} + C_{abn} + C_{bn})], \end{aligned} \quad (2.39)$$

$$\begin{aligned}
\Delta''_{an} &= \begin{vmatrix} i_{am} - i_{an} - \sum_{i=1}^n i_{ali} - \frac{\varphi_{an}}{R_{yn}} & -C_{abn} & -C_{asn} \\ i_{bm} - i_{bn} - \sum_{i=1}^n i_{bli} - \frac{\varphi_{bn}}{R_{yn}} & C_{bsn} + C_{abn} + C_{bn} & -C_{bsn} \\ i_{cm} - i_{cn} - \sum_{i=1}^n i_{cli} - \frac{\varphi_{cn}}{R_{yn}} & -C_{bsn} & C_{asn} + C_{bsn} + C_{cn} \end{vmatrix} = \\
&= \left(i_{am} - i_{an} - \sum_{i=1}^n i_{ali} - \frac{\varphi_{an}}{R_{yn}} \right) [(C_{bsn} + C_{abn} + C_{bn})(C_{asn} + C_{bsn} + C_{cn}) - C_{bsn}^2] + \\
&+ \left(i_{bm} - i_{bn} - \sum_{i=1}^n i_{bli} - \frac{\varphi_{bn}}{R_{yn}} \right) [C_{abn}(C_{asn} + C_{bsn} + C_{cn}) + C_{bsn}C_{asn}] + \\
&+ \left(i_{cm} - i_{cn} - \sum_{i=1}^n i_{cli} - \frac{\varphi_{cn}}{R_{yn}} \right) [C_{abn}C_{bsn} + C_{asn}(C_{bsn} + C_{abn} + C_{bn})],
\end{aligned} \tag{2.40}$$

$$\begin{aligned}
\Delta''_{bn} &= \begin{vmatrix} C_{abn} + C_{asn} + C_{an} & i_{am} - i_{an} - \sum_{i=1}^n i_{ali} - \frac{\varphi_{an}}{R_{yn}} & -C_{asn} \\ -C_{abn} & i_{bm} - i_{bn} - \sum_{i=1}^n i_{bli} - \frac{\varphi_{bn}}{R_{yn}} & -C_{bsn} \\ -C_{asn} & i_{cm} - i_{cn} - \sum_{i=1}^n i_{cli} - \frac{\varphi_{cn}}{R_{yn}} & C_{asn} + C_{bsn} + C_{cn} \end{vmatrix} = \\
&= \left(i_{am} - i_{an} - \sum_{i=1}^n i_{ali} - \frac{\varphi_{an}}{R_{yn}} \right) [C_{abn}(C_{asn} + C_{bsn} + C_{cn}) + C_{bsn}C_{asn}] + \\
&+ \left(i_{bm} - i_{bn} - \sum_{i=1}^n i_{bli} - \frac{\varphi_{bn}}{R_{yn}} \right) [(C_{abn} + C_{asn} + C_{an})(C_{asn} + C_{bsn} + C_{cn}) - C_{asn}^2] + \\
&+ \left(i_{cm} - i_{cn} - \sum_{i=1}^n i_{cli} - \frac{\varphi_{cn}}{R_{yn}} \right) [C_{bsn}(C_{abn} + C_{asn} + C_{an}) + C_{abn}C_{asn}],
\end{aligned} \tag{2.41}$$

$$\begin{aligned}
\Delta''_{cn} &= \begin{vmatrix} C_{abn} + C_{asn} + C_{an} & -C_{abn} & i_{am} - i_{an} - \sum_{i=1}^n i_{ali} - \frac{\varphi_{an}}{R_{yn}} \\ -C_{abn} & C_{bsn} + C_{abn} + C_{bn} & i_{bm} - i_{bn} - \sum_{i=1}^n i_{bli} - \frac{\varphi_{bn}}{R_{yn}} \\ -C_{asn} & -C_{bsn} & i_{cm} - i_{cn} - \sum_{i=1}^n i_{cli} - \frac{\varphi_{cn}}{R_{yn}} \end{vmatrix} = \\
&= \left(i_{am} - i_{an} - \sum_{i=1}^n i_{ali} - \frac{\varphi_{an}}{R_{yn}} \right) [C_{abn}C_{bsn} + C_{asn}(C_{bsn} + C_{abn} + C_{bn})] + \\
&+ \left(i_{bm} - i_{bn} - \sum_{i=1}^n i_{bli} - \frac{\varphi_{bn}}{R_{yn}} \right) [C_{bsn}(C_{abn} + C_{asn} + C_{an}) + C_{abn}C_{asn}] + \\
&+ \left(i_{cm} - i_{cn} - \sum_{i=1}^n i_{cli} - \frac{\varphi_{cn}}{R_{yn}} \right) [(C_{abn} + C_{asn} + C_{an})(C_{bsn} + C_{abn} + C_{bn}) - C_{abn}^2]
\end{aligned} \tag{2.42}$$

Уравнения для остальных поперечных ветвей составляются аналогично.

Полная математическая модель режима однофазного замыкания на землю

(ОЗЗ):

$$\frac{di_{am}}{dt} = \frac{1}{L_m}(e_a - R_m i_{am} + \varphi_N - \varphi_{aH}), \quad (2.44)$$

$$\frac{di_{bm}}{dt} = \frac{1}{L_m}(e_b - R_m i_{bm} + \varphi_N - \varphi_{bH}), \quad (2.45)$$

$$\frac{di_{cm}}{dt} = \frac{1}{L_m}(e_c - R_m i_{cm} + \varphi_N - \varphi_{cH}), \quad (2.46)$$

$$\frac{di_{aH}}{dt} = \frac{\Delta'_{aH}}{\Delta'_H}, \quad (2.47)$$

$$\frac{di_{bH}}{dt} = \frac{\Delta'_{bH}}{\Delta'_H}, \quad (2.48)$$

$$\frac{di_{cH}}{dt} = \frac{\Delta'_{cH}}{\Delta'_H}, \quad (2.49)$$

$$\frac{di_{aK}}{dt} = \frac{\Delta'_{aK}}{\Delta'_K}, \quad (2.50)$$

$$\frac{di_{bK}}{dt} = \frac{\Delta'_{bK}}{\Delta'_K}, \quad (2.51)$$

$$\frac{di_{cK}}{dt} = \frac{\Delta'_{cK}}{\Delta'_K}, \quad (2.52)$$

$$\frac{di_{ai}}{dt} = \frac{\Delta'_{ai}}{\Delta'_i}, \quad i=1 \dots n, \quad (2.53)$$

$$\frac{di_{bi}}{dt} = \frac{\Delta'_{bi}}{\Delta'_i}, \quad i=1 \dots n, \quad (2.54)$$

$$\frac{di_{ci}}{dt} = \frac{\Delta'_{ci}}{\Delta'_i}, \quad i=1 \dots n, \quad (2.55)$$

$$\frac{d\varphi_{aH}}{dt} = \frac{\Delta''_{aH}}{\Delta''_H}, \quad (2.56)$$

$$\frac{d\varphi_{bH}}{dt} = \frac{\Delta''_{bH}}{\Delta''_H}, \quad (2.57)$$

$$\frac{d\varphi_{cH}}{dt} = \frac{\Delta''_{cH}}{\Delta''_H}, \quad (2.58)$$

$$\frac{d\varphi_{a3}}{dt} = \frac{\Delta''_{a3}}{\Delta''_3}, \quad (2.59)$$

$$\frac{d\varphi_{b3}}{dt} = \frac{\Delta''_{b3}}{\Delta''_3}, \quad (2.60)$$

$$\frac{d\varphi_{c3}}{dt} = \frac{\Delta''_{c3}}{\Delta''_3}, \quad (2.61)$$

$$\frac{d\varphi_{a\kappa}}{dt} = \frac{\Delta''_{a\kappa}}{\Delta''_\kappa}, \quad (2.62)$$

$$\frac{d\varphi_{b\kappa}}{dt} = \frac{\Delta''_{b\kappa}}{\Delta''_\kappa}, \quad (2.63)$$

$$\frac{d\varphi_{c\kappa}}{dt} = \frac{\Delta''_{c\kappa}}{\Delta''_\kappa}, \quad (2.64)$$

$$\frac{d\varphi_{ai}}{dt} = \frac{\Delta''_{ai}}{\Delta''_i}, \quad i=1\dots n, \quad (2.65)$$

$$\frac{d\varphi_{bi}}{dt} = \frac{\Delta''_{bi}}{\Delta''_i}, \quad i=1\dots n, \quad (2.66)$$

$$\frac{d\varphi_{ci}}{dt} = \frac{\Delta''_{ci}}{\Delta''_i}, \quad i=1\dots n, \quad (2.67)$$

$$\Delta'_h = L_h(L_h^2 - M_{ab h}^2 - M_{bc h}^2 - M_{ac h}^2) + 2M_{ab h}M_{bc h}M_{ac h}, \quad (2.68)$$

$$\begin{aligned} \Delta'_{ah} = & (\varphi_{ah} - \varphi_{a3} - R_h i_{ah})(L_h^2 - M_{bc h}^2) - (\varphi_{bh} - \varphi_{b3} - R_h i_{bh})(M_{ab h}L_h - M_{bc h}M_{ac h}) + \\ & + (\varphi_{ch} - \varphi_{c3} - R_h i_{ch})(M_{ab h}M_{bc h} - M_{ac h}L_h), \end{aligned} \quad (2.69)$$

$$\begin{aligned} \Delta'_{bh} = & (\varphi_{ah} - \varphi_{a3} - R_h i_{ah})(M_{bc h}M_{ac h} - M_{ab h}L_h) + (\varphi_{bh} - \varphi_{b3} - R_h i_{bh})(L_h^2 - M_{ac h}^2) - \\ & - (\varphi_{ch} - \varphi_{c3} - R_h i_{ch})(M_{bc h}L_h - M_{ab h}M_{ac h}), \end{aligned} \quad (2.70)$$

$$\begin{aligned} \Delta'_{ch} = & (\varphi_{ah} - \varphi_{a3} - R_h i_{ah})(M_{bc h}M_{ab h} - M_{ac h}L_h) - \\ & - (\varphi_{bh} - \varphi_{b3} - R_h i_{bh})(M_{bc h}L_h - M_{ab h}M_{ac h}) + (\varphi_{ch} - \varphi_{c3} - R_h i_{ch})(L_h^2 - M_{ab h}^2), \end{aligned} \quad (2.71)$$

$$\Delta'_\kappa = L_\kappa(L_\kappa^2 - M_{ab \kappa}^2 - M_{bc \kappa}^2 - M_{ac \kappa}^2) + 2M_{ab \kappa}M_{bc \kappa}M_{ac \kappa}, \quad (2.72)$$

$$\begin{aligned} \Delta'_{a\kappa} = & (\varphi_{a3} - \varphi_{a\kappa} - R_\kappa i_{a\kappa})(L_\kappa^2 - M_{bc \kappa}^2) - (\varphi_{b3} - \varphi_{b\kappa} - R_\kappa i_{b\kappa})(M_{ab \kappa}L_\kappa - M_{bc \kappa}M_{ac \kappa}) + \\ & + (\varphi_{c3} - \varphi_{c\kappa} - R_\kappa i_{c\kappa})(M_{ab \kappa}M_{bc \kappa} - M_{ac \kappa}L_\kappa), \end{aligned} \quad (2.73)$$

$$\begin{aligned} \Delta'_{b\kappa} = & (\varphi_{a3} - \varphi_{a\kappa} - R_\kappa i_{a\kappa})(M_{bc \kappa}M_{ac \kappa} - M_{ab \kappa}L_\kappa) + (\varphi_{b3} - \varphi_{b\kappa} - R_\kappa i_{b\kappa})(L_\kappa^2 - M_{ac \kappa}^2) - \\ & - (\varphi_{c3} - \varphi_{c\kappa} - R_\kappa i_{c\kappa})(M_{bc \kappa}L_\kappa - M_{ab \kappa}M_{ac \kappa}), \end{aligned} \quad (2.74)$$

$$\begin{aligned} \Delta'_{c\kappa} = & (\varphi_{a3} - \varphi_{a\kappa} - R_\kappa i_{a\kappa})(M_{bc \kappa}M_{ab \kappa} - M_{ac \kappa}L_\kappa) - \\ & - (\varphi_{b3} - \varphi_{b\kappa} - R_\kappa i_{b\kappa})(M_{bc \kappa}L_\kappa - M_{ab \kappa}M_{ac \kappa}) + (\varphi_{c3} - \varphi_{c\kappa} - R_\kappa i_{c\kappa})(L_\kappa^2 - M_{ab \kappa}^2), \end{aligned} \quad (2.75)$$

$$\Delta'_i = L_i (L_i^2 - M_{abi}^2 - M_{bci}^2 - M_{aci}^2) + 2M_{abi}M_{bci}M_{aci}, \quad i=1 \dots n, \quad (2.76)$$

$$\begin{aligned} \Delta'_{ai} = & (\varphi_{an} - \varphi_{ai} - R_i i_{ali}) (L_i^2 - M_{bci}^2) - (\varphi_{bn} - \varphi_{bi} - R_i i_{bli}) (M_{abi}L_i - M_{bci}M_{aci}) + \\ & + (\varphi_{cn} - \varphi_{ci} - R_i i_{cli}) (M_{abi}M_{bci} - M_{aci}L_i), \quad i=1 \dots n, \end{aligned} \quad (2.77)$$

$$\begin{aligned} \Delta'_{bi} = & (\varphi_{an} - \varphi_{ai} - R_i i_{ali}) (M_{bci}M_{aci} - M_{abi}L_i) + (\varphi_{bn} - \varphi_{bi} - R_i i_{bli}) (L_i^2 - M_{aci}^2) - \\ & - (\varphi_{cn} - \varphi_{ci} - R_i i_{cli}) (M_{bci}L_i - M_{abi}M_{aci}), \quad i=1 \dots n, \end{aligned} \quad (2.78)$$

$$\begin{aligned} \Delta'_{ci} = & (\varphi_{an} - \varphi_{ai} - R_i i_{ali}) (M_{bci}M_{abi} - M_{aci}L_i) - \\ & - (\varphi_{bn} - \varphi_{bi} - R_i i_{bli}) (M_{bci}L_i - M_{abi}M_{aci}) + (\varphi_{cn} - \varphi_{ci} - R_i i_{cli}) (L_i^2 - M_{abi}^2), \quad i=1 \dots n, \end{aligned} \quad (2.79)$$

$$\begin{aligned} \Delta''_n = & (C_{abn} + C_{acn} + C_{an}) [(C_{bcn} + C_{abn} + C_{bn})(C_{acn} + C_{bcn} + C_{cn}) - C_{bcn}^2] - \\ & - C_{abn} [C_{abn}(C_{acn} + C_{bcn} + C_{cn}) + C_{bcn}C_{acn}] - C_{acn} [C_{abn}C_{bcn} + C_{acn}(C_{bcn} + C_{abn} + C_{bn})], \end{aligned} \quad (2.80)$$

$$\begin{aligned} \Delta''_{an} = & \left(i_{am} - i_{an} - \sum_{i=1}^n i_{ali} - \frac{\varphi_{an}}{R_{yn}} \right) [(C_{bcn} + C_{abn} + C_{bn})(C_{acn} + C_{bcn} + C_{cn}) - C_{bcn}^2] + \\ & + \left(i_{bm} - i_{bn} - \sum_{i=1}^n i_{bli} - \frac{\varphi_{bn}}{R_{yn}} \right) [C_{abn}(C_{acn} + C_{bcn} + C_{cn}) + C_{bcn}C_{acn}] + \\ & + \left(i_{cm} - i_{cn} - \sum_{i=1}^n i_{cli} - \frac{\varphi_{cn}}{R_{yn}} \right) [C_{abn}C_{bcn} + C_{acn}(C_{bcn} + C_{abn} + C_{bn})], \end{aligned} \quad (2.81)$$

$$\begin{aligned} \Delta''_{bn} = & \left(i_{am} - i_{an} - \sum_{i=1}^n i_{ali} - \frac{\varphi_{an}}{R_{yn}} \right) [C_{abn}(C_{acn} + C_{bcn} + C_{cn}) + C_{bcn}C_{acn}] + \\ & + \left(i_{bm} - i_{bn} - \sum_{i=1}^n i_{bli} - \frac{\varphi_{bn}}{R_{yn}} \right) [(C_{abn} + C_{acn} + C_{an})(C_{acn} + C_{bcn} + C_{cn}) - C_{acn}^2] + \\ & + \left(i_{cm} - i_{cn} - \sum_{i=1}^n i_{cli} - \frac{\varphi_{cn}}{R_{yn}} \right) [C_{bcn}(C_{abn} + C_{acn} + C_{an}) + C_{abn}C_{acn}], \end{aligned} \quad (2.82)$$

$$\begin{aligned} \Delta''_{cn} = & \left(i_{am} - i_{an} - \sum_{i=1}^n i_{ali} - \frac{\varphi_{an}}{R_{yn}} \right) [C_{abn}C_{bcn} + C_{acn}(C_{bcn} + C_{abn} + C_{bn})] + \\ & + \left(i_{bm} - i_{bn} - \sum_{i=1}^n i_{bli} - \frac{\varphi_{bn}}{R_{yn}} \right) [C_{bcn}(C_{abn} + C_{acn} + C_{an}) + C_{abn}C_{acn}] + \\ & + \left(i_{cm} - i_{cn} - \sum_{i=1}^n i_{cli} - \frac{\varphi_{cn}}{R_{yn}} \right) [(C_{abn} + C_{acn} + C_{an})(C_{bcn} + C_{abn} + C_{bn}) - C_{abn}^2], \end{aligned} \quad (2.83)$$

$$\begin{aligned} \Delta''_3 = & (C_{ab3} + C_{ac3} + C_{a3}) [(C_{bc3} + C_{ab3} + C_{b3})(C_{ac3} + C_{bc3} + C_{c3}) - C_{bc3}^2] - \\ & - C_{ab3} [C_{ab3}(C_{ac3} + C_{bc3} + C_{c3}) + C_{bc3}C_{ac3}] - C_{ac3} [C_{ab3}C_{bc3} + C_{ac3}(C_{bc3} + C_{ab3} + C_{b3})], \end{aligned} \quad (2.84)$$

$$\begin{aligned}
\Delta''_{a3} = & \left(i_{aH} - i_{aK} - i_3 - \frac{\varphi_{a3}}{R_{y3}} \right) \left[(C_{bc3} + C_{ab3} + C_{b3})(C_{ac3} + C_{bc3} + C_{c3}) - C_{bc3}^2 \right] + \\
& + \left(i_{bH} - i_{bK} - \frac{\varphi_{b3}}{R_{y3}} \right) \left[C_{ab3}(C_{ac3} + C_{bc3} + C_{c3}) + C_{bc3}C_{ac3} \right] + \\
& + \left(i_{cH} - i_{cK} - \frac{\varphi_{c3}}{R_{y3}} \right) \left[C_{ab3}C_{bc3} + C_{ac3}(C_{bc3} + C_{ab3} + C_{b3}) \right],
\end{aligned} \tag{2.85}$$

$$\begin{aligned}
\Delta''_{b3} = & \left(i_{aH} - i_{aK} - i_3 - \frac{\varphi_{a3}}{R_{y3}} \right) \left[C_{ab3}(C_{ac3} + C_{bc3} + C_{c3}) + C_{bc3}C_{ac3} \right] + \\
& + \left(i_{bH} - i_{bK} - \frac{\varphi_{b3}}{R_{y3}} \right) \left[(C_{ab3} + C_{ac3} + C_{a3})(C_{ac3} + C_{bc3} + C_{c3}) - C_{ac3}^2 \right] + \\
& + \left(i_{cH} - i_{cK} - \frac{\varphi_{c3}}{R_{y3}} \right) \left[C_{bc3}(C_{ab3} + C_{ac3} + C_{a3}) + C_{ab3}C_{ac3} \right],
\end{aligned} \tag{2.86}$$

$$\begin{aligned}
\Delta''_{c3} = & \left(i_{aH} - i_{aK} - i_3 - \frac{\varphi_{a3}}{R_{y3}} \right) \left[C_{ab3}C_{bc3} + C_{ac3}(C_{bc3} + C_{ab3} + C_{b3}) \right] + \\
& + \left(i_{bH} - i_{bK} - \frac{\varphi_{b3}}{R_{y3}} \right) \left[C_{bc3}(C_{ab3} + C_{ac3} + C_{a3}) + C_{ab3}C_{ac3} \right] + \\
& + \left(i_{cH} - i_{cK} - \frac{\varphi_{c3}}{R_{y3}} \right) \left[(C_{ab3} + C_{ac3} + C_{a3})(C_{bc3} + C_{ab3} + C_{b3}) - C_{ab3}^2 \right],
\end{aligned} \tag{2.87}$$

$$\begin{aligned}
\Delta''_K = & (C_{abK} + C_{aK} + C_{aK}) \left[(C_{bK} + C_{abK} + C_{bK})(C_{aK} + C_{bK} + C_{cK}) - C_{bK}^2 \right] - \\
& - C_{abK} [C_{abK}(C_{aK} + C_{bK} + C_{cK}) + C_{bK}C_{aK}] - C_{aK} [C_{abK}C_{bK} + C_{aK}(C_{bK} + C_{abK} + C_{bK})],
\end{aligned} \tag{2.88}$$

$$\begin{aligned}
\Delta''_{aK} = & \left(i_{aK} - i_{aH2} - \frac{\varphi_{aK}}{R_{yK}} \right) \left[(C_{bK} + C_{abK} + C_{bK})(C_{aK} + C_{bK} + C_{cK}) - C_{bK}^2 \right] + \\
& + \left(i_{bK} - i_{bH2} - \frac{\varphi_{bK}}{R_{yK}} \right) \left[C_{abK}(C_{aK} + C_{bK} + C_{cK}) + C_{bK}C_{aK} \right] + \\
& + \left(i_{cK} - i_{cH2} - \frac{\varphi_{cK}}{R_{yK}} \right) \left[C_{abK}C_{bK} + C_{aK}(C_{bK} + C_{abK} + C_{bK}) \right],
\end{aligned} \tag{2.89}$$

$$\begin{aligned}
\Delta''_{bK} = & \left(i_{aK} - i_{aH2} - \frac{\varphi_{aK}}{R_{yK}} \right) \left[C_{abK}(C_{aK} + C_{bK} + C_{cK}) + C_{bK}C_{aK} \right] + \\
& + \left(i_{bK} - i_{bH2} - \frac{\varphi_{bK}}{R_{yK}} \right) \left[(C_{abK} + C_{aK} + C_{aK})(C_{aK} + C_{bK} + C_{cK}) - C_{aK}^2 \right] + \\
& + \left(i_{cK} - i_{cH2} - \frac{\varphi_{cK}}{R_{yK}} \right) \left[C_{bK}(C_{abK} + C_{aK} + C_{aK}) + C_{abK}C_{aK} \right],
\end{aligned} \tag{2.90}$$

$$\begin{aligned}\Delta_{\text{ск}}'' = & \left(i_{\text{ак}} - i_{\text{анз}} - \frac{\varphi_{\text{ак}}}{R_{\text{уК}}} \right) [C_{\text{абк}} C_{\text{бкк}} + C_{\text{аск}} (C_{\text{бск}} + C_{\text{абк}} + C_{\text{бк}})] + \\ & + \left(i_{\text{бк}} - i_{\text{бнз}} - \frac{\varphi_{\text{бк}}}{R_{\text{уК}}} \right) [C_{\text{бск}} (C_{\text{абк}} + C_{\text{аск}} + C_{\text{ак}}) + C_{\text{абк}} C_{\text{аск}}] +\end{aligned}\quad (2.91)$$

$$\begin{aligned}& + \left(i_{\text{ск}} - i_{\text{снз}} - \frac{\varphi_{\text{ск}}}{R_{\text{уК}}} \right) [(C_{\text{абк}} + C_{\text{аск}} + C_{\text{ак}})(C_{\text{бск}} + C_{\text{абк}} + C_{\text{бк}}) - C_{\text{абк}}^2] \\ \Delta_i'' = & (C_{\text{аби}} + C_{\text{аци}} + C_{\text{аи}}) [(C_{\text{бси}} + C_{\text{аби}} + C_{\text{би}})(C_{\text{аци}} + C_{\text{бси}} + C_{\text{си}}) - C_{\text{бси}}^2] - \\ & - C_{\text{аби}} [C_{\text{аби}} (C_{\text{аци}} + C_{\text{бси}} + C_{\text{си}}) + C_{\text{бси}} C_{\text{аци}}] - \\ & - C_{\text{аци}} [C_{\text{аби}} C_{\text{бси}} + C_{\text{аци}} (C_{\text{бси}} + C_{\text{аби}} + C_{\text{би}})], \quad i = 1 \dots n,\end{aligned}\quad (2.92)$$

$$\begin{aligned}\Delta_{\text{аи}}'' = & \left(i_{\text{аи}} - i_{\text{аи}} - \frac{\varphi_{\text{аи}}}{R_{\text{yi}}} \right) [(C_{\text{бси}} + C_{\text{аби}} + C_{\text{би}})(C_{\text{аци}} + C_{\text{бси}} + C_{\text{си}}) - C_{\text{бси}}^2] + \\ & + \left(i_{\text{блн}} - i_{\text{би}} - \frac{\varphi_{\text{би}}}{R_{\text{yi}}} \right) [C_{\text{аби}} (C_{\text{аци}} + C_{\text{бси}} + C_{\text{си}}) + C_{\text{бси}} C_{\text{аци}}] + \\ & + \left(i_{\text{сли}} - i_{\text{си}} - \frac{\varphi_{\text{си}}}{R_{\text{yi}}} \right) [C_{\text{аби}} C_{\text{бси}} + C_{\text{аци}} (C_{\text{бси}} + C_{\text{аби}} + C_{\text{би}})], \quad i = 1 \dots n,\end{aligned}\quad (2.93)$$

$$\begin{aligned}\Delta_{\text{би}}'' = & \left(i_{\text{аи}} - i_{\text{аи}} - \frac{\varphi_{\text{аи}}}{R_{\text{yi}}} \right) [C_{\text{аби}} (C_{\text{аци}} + C_{\text{бси}} + C_{\text{си}}) + C_{\text{бси}} C_{\text{аци}}] + \\ & + \left(i_{\text{блн}} - i_{\text{би}} - \frac{\varphi_{\text{би}}}{R_{\text{yi}}} \right) [(C_{\text{аби}} + C_{\text{аци}} + C_{\text{аи}})(C_{\text{аци}} + C_{\text{бси}} + C_{\text{си}}) - C_{\text{аци}}^2] + \\ & + \left(i_{\text{сли}} - i_{\text{си}} - \frac{\varphi_{\text{си}}}{R_{\text{yi}}} \right) [C_{\text{бси}} (C_{\text{аби}} + C_{\text{аци}} + C_{\text{аи}}) + C_{\text{аби}} C_{\text{аци}}], \quad i = 1 \dots n,\end{aligned}\quad (2.94)$$

$$\begin{aligned}\Delta_{\text{си}}'' = & \left(i_{\text{аи}} - i_{\text{аи}} - \frac{\varphi_{\text{аи}}}{R_{\text{yi}}} \right) [C_{\text{аби}} C_{\text{бси}} + C_{\text{аци}} (C_{\text{бси}} + C_{\text{аби}} + C_{\text{би}})] + \\ & + \left(i_{\text{блн}} - i_{\text{би}} - \frac{\varphi_{\text{би}}}{R_{\text{yi}}} \right) [C_{\text{бси}} (C_{\text{аби}} + C_{\text{аци}} + C_{\text{аи}}) + C_{\text{аби}} C_{\text{аци}}] + \\ & + \left(i_{\text{сли}} - i_{\text{си}} - \frac{\varphi_{\text{си}}}{R_{\text{yi}}} \right) [(C_{\text{аби}} + C_{\text{аци}} + C_{\text{аи}})(C_{\text{бси}} + C_{\text{аби}} + C_{\text{би}}) - C_{\text{аби}}^2], \quad i = 1 \dots n,\end{aligned}\quad (2.95)$$

$$\varphi_N = (i_{\text{ам}} + i_{\text{бм}} + i_{\text{см}}) \frac{L_p R_m - L_m R_p}{3L_p + L_m} + \frac{\varphi_{\text{ан}} + \varphi_{\text{бн}} + \varphi_{\text{сн}} - e_a - e_b - e_c}{3 + L_m/L_p}, \quad (2.96)$$

$$\varphi_{\text{а3}} = i_3 R_\partial. \quad (2.97)$$

где $i_{\text{аи}}, i_{\text{би}}, i_{\text{си}}, i_{\text{анз}}, i_{\text{бнз}}, i_{\text{снз}}$ – токи нагрузок в конце линий;

R_∂ – сопротивление дуги.

Допущение 2: токи нагрузок не зависят от режима сети, поэтому нагрузки на схеме представлены как идеальные источники тока.

2.2 Математическая модель системы управления дугогасящим реактором

Система управления производит настройку индуктивности ДГР на емкость сети, поэтому математическая модель системы управления содержит два блока:

- ✓ Модель определения расчетной емкости сети.
- ✓ Уравнение настройки индуктивности ДГР на емкость сети.

Емкости линий определяются на основе обращения матрицы потенциальных коэффициентов [7, 86], имеющей вид

$$\mathbf{a} = \begin{pmatrix} \alpha_{1,1} & \alpha_{1,2} & \alpha_{1,3} \\ \alpha_{2,1} & \alpha_{2,2} & \alpha_{2,3} \\ \alpha_{3,1} & \alpha_{3,2} & \alpha_{3,3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha_a & \alpha_{ab} & \alpha_{ac} \\ \alpha_{ba} & \alpha_b & \alpha_{bc} \\ \alpha_{ca} & \alpha_{cb} & \alpha_c \end{pmatrix}. \quad (2.98)$$

Собственные потенциальные коэффициенты неизолированных воздушных линий (диагональные элементы) на единицу длины определяются по формуле [7, 86]

$$\alpha_{i,i} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{2h_i}{r_{np}}, \quad (2.99)$$

где $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная;

h_i – высота расположения провода данной фазы над поверхностью земли;

r_{np} – радиус провода.

Взаимные потенциальные коэффициенты [78]

$$\alpha_{i,j} = \alpha_{j,i} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{r'_{i,j}}{r_{i,j}}, \quad (2.100)$$

где $r_{i,j}$ – расстояние между проводами фаз i и j ;

$r'_{i,j}$ – расстояние от провода i до зеркального отражения провода j относительно поверхности земли.

Значение $r'_{i,j}$ нетрудно определить из геометрических соображений (рисунок 2.3).

По теореме косинусов

$$r'_{i,j} = \sqrt{r_{i,j}^2 + 4h_{\max}^2 - 4r_{i,j}h_{\max} \cos \beta}, \quad (2.101)$$

где h_{\max} – наибольшая величина из значений h_i, h_j .

Из рисунка видно, что

$$\cos \beta = \frac{\Delta h}{r_{i,j}},$$

где $\Delta h = |h_i - h_j|$. Тогда

$$r'_{i,j} = \sqrt{r_{i,j}^2 + 4h_{\max}^2 - 4h_{\max} \Delta h} = \sqrt{r_{i,j}^2 + 4h_{\max} h_{\min}}.$$

И окончательно

$$r'_{i,j} = \sqrt{r_{i,j}^2 + 4h_i h_j}. \quad (2.102)$$

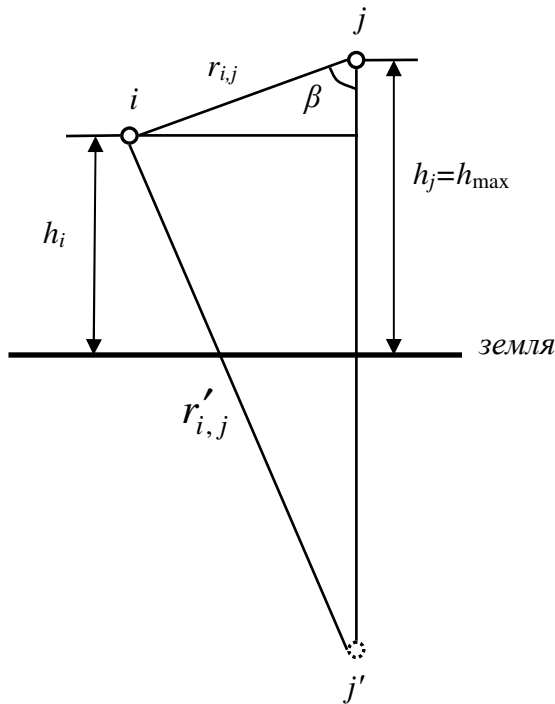


Рисунок 2.3 – К расчету потенциальных коэффициентов

Обращенная матрица потенциальных коэффициентов представляет собой матрицу коэффициентов электростатической индукции

$$\mathbf{\beta} = \begin{pmatrix} \beta_a & \beta_{ab} & \beta_{ac} \\ \beta_{ba} & \beta_b & \beta_{bc} \\ \beta_{ca} & \beta_{cb} & \beta_c \end{pmatrix} = \mathbf{\alpha}^{-1}. \quad (2.103)$$

Погонные фазные и междуфазные емкости определяются по следующим выражениям [7, 86]:

$$C_{0,a} = \beta_a + \beta_{ab} + \beta_{ac}, \quad (2.104)$$

$$C_{0,b} = \beta_b + \beta_{ab} + \beta_{bc}, \quad (2.105)$$

$$C_{0,c} = \beta_c + \beta_{ac} + \beta_{bc}, \quad (2.106)$$

$$C_{0,ab} = -\beta_{ab}, \quad (2.107)$$

$$C_{0,bc} = -\beta_{bc}, \quad (2.108)$$

$$C_{0,ac} = -\beta_{ac}. \quad (2.109)$$

Емкости на схеме замещения:

$$C_{a\text{вн}} = 0,5 \left(C_{0,ab,n} l_3 + \sum_{i=1}^n C_{0,ab,i} l_i \right), \quad (2.110)$$

$$C_{b\text{сн}} = 0,5 \left(C_{0,bc,n} l_3 + \sum_{i=1}^n C_{0,bc,i} l_i \right), \quad (2.111)$$

$$C_{a\text{сн}} = 0,5 \left(C_{0,ac,n} l_3 + \sum_{i=1}^n C_{0,ac,i} l_i \right), \quad (2.112)$$

$$C_{a\text{н}} = 0,5 \left(C_{0,a,n} l_3 + \sum_{i=1}^n C_{0,a,i} l_i \right), \quad (2.113)$$

$$C_{b\text{н}} = 0,5 \left(C_{0,b,n} l_3 + \sum_{i=1}^n C_{0,b,i} l_i \right), \quad (2.114)$$

$$C_{c\text{н}} = 0,5 \left(C_{0,c,n} l_3 + \sum_{i=1}^n C_{0,c,i} l_i \right), \quad (2.115)$$

$$C_{ab3} = 0,5 C_{0,ab,n} l_n, \quad (2.116)$$

$$C_{bc3} = 0,5C_{0,bc,n}l_n, \quad (2.117)$$

$$C_{ac3} = 0,5C_{0,ac,n}l_n, \quad (2.118)$$

$$C_{a3} = 0,5C_{0,a,n}l_n, \quad (2.119)$$

$$C_{b3} = 0,5C_{0,b,n}l_n, \quad (2.120)$$

$$C_{c3} = 0,5C_{0,c,n}l_n, \quad (2.121)$$

$$C_{ab\kappa} = 0,5C_{0,ab,n}(l_n - l_3), \quad (2.122)$$

$$C_{bc\kappa} = 0,5C_{0,bc,n}(l_n - l_3), \quad (2.123)$$

$$C_{ac\kappa} = 0,5C_{0,ac,n}(l_n - l_3), \quad (2.124)$$

$$C_{a\kappa} = 0,5C_{0,a,n}(l_n - l_3), \quad (2.125)$$

$$C_{b\kappa} = 0,5C_{0,b,n}(l_n - l_3), \quad (2.126)$$

$$C_{c\kappa} = 0,5C_{0,c,n}(l_n - l_3), \quad (2.127)$$

$$C_{abi} = 0,5C_{0,ab,i}l_i, \quad (2.128)$$

$$C_{bci} = 0,5C_{0,bc,i}l_i, \quad (2.129)$$

$$C_{aci} = 0,5C_{0,ac,i}l_i, \quad (2.130)$$

$$C_{ai} = 0,5C_{0,a,i}l_i, \quad (2.131)$$

$$C_{bi} = 0,5C_{0,b,i}l_i, \quad (2.132)$$

$$C_{ci} = 0,5C_{0,c,i}l_i, \quad (2.134)$$

где $C_{0,ab,n}$, $C_{0,bc,n}$, $C_{0,ac,n}$, $C_{0,a,n}$, $C_{0,b,n}$, $C_{0,c,n}$ – погонные емкости поврежденной линии;

$C_{0,ab,i}$, $C_{0,bc,i}$, $C_{0,ac,i}$, $C_{0,a,i}$, $C_{0,b,i}$, $C_{0,c,i}$ – погонные емкости линий без повреждений

При настройке ДГР, линия на которой имеется повреждение, заранее неизвестна, поэтому в представленных выражениях все линии рассматриваются как неповрежденные, а формулы и параметры для поврежденной линии исключаются из расчетов.

Кабельные линии 35 кВ выполняются экранированными, поэтому междуфазные емкости $C_{0,ab} = C_{0,bc} = C_{0,ac} = 0$, а собственные емкости симметричны и рассчитываются с использованием справочных данных [4]. Будем считать известной погонную емкостную проводимость кабеля b_0 . Тогда

$$C_{0,a} = C_{0,b} = C_{0,c} = b_0 / \omega. \quad (2.135)$$

Формулы (2.110) – (2.134) являются справедливыми и для кабельных линий.

Уравнение настройки индуктивности ДГР представим с учетом того, что настройка ДГР на фазную емкость должна осуществляться с некоторым рассогласованием (до 0,1) [83]. Получим уравнение настройки при выделении поврежденной линии:

$$L_p = \frac{0,9 \dots 1,1}{\omega^2 \left[(C_{0,a,n} + C_{0,b,n} + C_{0,c,n}) l_n + \sum_{i=1}^n (C_{0,a,i} + C_{0,b,i} + C_{0,c,i}) l_i \right]}. \quad (2.136)$$

Если поврежденная линия отсутствует, то ее параметры также исключаются из уравнения.

2.3 Математическая модель воздушных и кабельных линий, силового трансформатора

Активные сопротивления поврежденной линии и неповрежденных линий [85]:

$$R_n = r_{0,n} l_z, \quad (2.137)$$

$$R_\kappa = r_{0,n} (l_n - l_z), \quad (2.138)$$

$$R_i = r_{0,i} l_i, \quad (2.139)$$

где $r_{0,n}$ – погонное активное сопротивление поврежденной линии;

$r_{0,i}$ – погонные активные сопротивления неповрежденных линий;

l_z – длина участка поврежденной линии от источника питания до точки замыкания;

l_n – общая длина поврежденной линии;

l_i – длины неповрежденных линий.

Емкости линий рассмотрены в предыдущем разделе. Однако при расчете режима ОЗЗ формула (2.119) для вычисления емкости поврежденной фазы в точке замыкания заменяется выражением

$$C_{аз} = \begin{cases} 0,5C_{0,a,n}l_n, & R_0 \neq 0, \\ 0, & R_0 = 0. \end{cases} \quad (2.140)$$

Собственная индуктивность воздушной линии от начала до точки замыкания равна [6]

$$L_n = \frac{\mu_0 l_3}{2\pi} \left(\ln \frac{2l_3}{r_{np,n}} - 1 \right) + \frac{\mu l_3}{8\pi} = 10^{-7} l_3 \left(2 \ln \frac{2l_3}{r_{np,n}} - 1,5 \right), \quad (2.141)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная;

μ – абсолютная магнитная проницаемость проводникового материала, принятая равной μ_0 согласно [99];

$r_{np,n}$ – радиус провода поврежденной линии.

Аналогично остальные собственные индуктивности воздушных линий

$$L_k = 10^{-7} (l_n - l_3) \left(2 \ln \frac{2(l_n - l_3)}{r_{np,n}} - 1,5 \right), \quad (2.142)$$

$$L_i = 10^{-7} l_i \left(2 \ln \frac{2l_i}{r_{np,i}} - 1,5 \right), \quad (2.143)$$

где $r_{np,i}$ – радиусы проводов неповрежденных линий; длины выражены в [м].

Взаимные индуктивности воздушных линий [86]

$$M_{abn} = \frac{\mu_0 l_3}{2\pi} \left(\ln \frac{2l_3}{r_{ab,n}} - 1 \right) = 2 \cdot 10^{-7} l_3 \left(\ln \frac{2l_3}{r_{ab,n}} - 1 \right), \quad (2.144)$$

$$M_{bcn} = 2 \cdot 10^{-7} l_3 \left(\ln \frac{2l_3}{r_{bc,n}} - 1 \right), \quad (2.145)$$

$$M_{acn} = 2 \cdot 10^{-7} l_3 \left(\ln \frac{2l_3}{r_{ac,n}} - 1 \right), \quad (2.146)$$

$$M_{ab\kappa} = 2 \cdot 10^{-7} (l_n - l_3) \left(\ln \frac{2(l_n - l_3)}{r_{ab,n}} - 1 \right), \quad (2.147)$$

$$M_{bc\kappa} = 2 \cdot 10^{-7} (l_n - l_3) \left(\ln \frac{2(l_n - l_3)}{r_{bc,n}} - 1 \right), \quad (2.148)$$

$$M_{ac\kappa} = 2 \cdot 10^{-7} (l_n - l_3) \left(\ln \frac{2(l_n - l_3)}{r_{ac,n}} - 1 \right), \quad (2.149)$$

$$M_{abi} = 2 \cdot 10^{-7} l_i \left(\ln \frac{2l_i}{r_{ab,i}} - 1 \right), \quad (2.150)$$

$$M_{bci} = 2 \cdot 10^{-7} l_i \left(\ln \frac{2l_i}{r_{bc,i}} - 1 \right), \quad (2.151)$$

$$M_{aci} = 2 \cdot 10^{-7} l_i \left(\ln \frac{2l_i}{r_{ac,i}} - 1 \right), \quad (2.152)$$

где $r_{ab,n}$, $r_{bc,n}$, $r_{ac,n}$, $r_{ab,i}$, $r_{bc,i}$, $r_{ac,i}$ – междупазные расстояния для поврежденной и неповрежденных линий.

Примем, что индуктивности кабельных линий являются симметричными, и определим их через погонные индуктивные сопротивления прямой и нулевой последовательности $x_{(1)}$ и $x_{(0)}$. Эти сопротивления связаны с собственной и взаимной индуктивностью известными формулами, аналогичными приведенным в [31]:

$$x_{(1)} = \omega(L_0 - M_0), \quad (2.153)$$

$$x_{(0)} = \omega(L_0 + 2M_0), \quad (2.154)$$

где L_0 и M_0 – собственная и взаимная погонные индуктивности кабеля.

Из этих соотношений с учетом длины l получаем формулы для собственной и взаимной индуктивностей кабельной линии:

$$L = l \frac{x_{(0)} + 2x_{(1)}}{3\omega}, \quad (2.155)$$

$$M_{ab} = M_{bc} = M_{ac} = l \frac{x_{(0)} - x_{(1)}}{3\omega}. \quad (2.156)$$

Параметры трансформатора приводятся к низшему напряжению и определяются исходя из того, что мощности обмоток высшего и низшего напряжения одинаковы [100]:

$$R_m = \frac{1}{2} \Delta P_{кз} \frac{U_{нн}^2}{S_{ном}^2}, \quad (2.157)$$

$$L_m = \frac{1}{2\omega} \frac{U_{к\%}}{100} \frac{U_{нн}^2}{S_{ном}} = \frac{1}{200\pi} \frac{U_{к\%}}{100} \frac{U_{нн}^2}{S_{ном}}, \quad (2.158)$$

где $\Delta P_{кз}$ – потери короткого замыкания, МВт;

$U_{к\%}$ – напряжение короткого замыкания, %;

$U_{нн}$ – номинальное низшее напряжение, кВ;

$S_{ном}$ – номинальная мощность трансформатора, МВА.

Активное сопротивление реактора можно определить через номинальные потери активной мощности ΔP_p , номинальную мощность $S_{ном,p}$ и номинальное напряжение $U_{ном,p}$ реактора [100]:

$$R_p = \Delta P_p \frac{U_{ном,p}^2}{S_{ном,p}^2}. \quad (2.159)$$

Сопротивления токам утечки в изоляторах можно определить через погонные потери мощности (на три фазы) в изоляторах поврежденной $\Delta P_{y,0,n}$ и неповрежденных $\Delta P_{y,0,i}$ линий при номинальном линейном напряжении $U_{ном}$ [6]:

$$R_{yn} = \frac{2U_{ном}^2}{\Delta P_{y,0,n} l_3 + \sum_{i=1}^n \Delta P_{y,0,i} l_i}, \quad (2.160)$$

$$R_{yz} = \frac{2U_{ном}^2}{\Delta P_{y,0,n} l_n}, \quad (2.161)$$

$$R_{yк} = \frac{2U_{ном}^2}{\Delta P_{y,0,n} (l_n - l_3)}, \quad (2.162)$$

$$R_{yi} = \frac{2U_{ном}^2}{\Delta P_{y,0,i} l_i}. \quad (2.163)$$

2.4 Определение начальных условий

В данном случае требуется произвести расчет установившегося режима, предшествующего появлению ОЗЗ. Параметры электрической сети учитываются с такой же точностью, что и при расчете режима ОЗЗ. Нагрузка задается постоянной мощностью, что соответствует реальным исходным данным позволяет учесть нелинейный (в инерционном смысле) характер электропотребителей. Однако влияние несимметрии напряжений на потребляемые мощности не учитывается, поскольку точный перечень электроприемников неизвестен, несимметрия незначительна, а конкретная величина нагрузки не относится к наиболее важным факторам для режима ОЗЗ [91, 109]. Схема замещения изображена на рисунке 2.4.

Все индуктивные сопротивления и емкостные проводимости определяются через соответствующие индуктивности и емкости по стандартным выражениям. Математическая модель установившегося режима составлена по законам Кирхгофа. При расчете токов нагрузки сначала исключается составляющая напряжений нулевой последовательности, а потом составляющая токов нулевой последовательности [102, 109].

Уравнения имеют вид:

$$\dot{U}_{ak12} = \frac{1}{3}(2\dot{U}_{ak} - \dot{U}_{bk} - \dot{U}_{ck}), \quad (2.164)$$

$$\dot{U}_{bk12} = \frac{1}{3}(2\dot{U}_{bk} - \dot{U}_{ak} - \dot{U}_{ck}), \quad (2.165)$$

$$\dot{U}_{ck12} = \frac{1}{3}(2\dot{U}_{ck} - \dot{U}_{ak} - \dot{U}_{bk}), \quad (2.166)$$

$$\dot{I}_{0нз} = \frac{1}{3} \left(\frac{S_{анз}^*}{U_{ak12}^*} + \frac{S_{бнз}^*}{U_{bk12}^*} + \frac{S_{снз}^*}{U_{ck12}^*} \right), \quad (2.167)$$

$$\dot{I}_{анз} = \frac{S_{анз}^*}{U_{ak12}^*} - \dot{I}_{0нз}, \quad (2.168)$$

$$\dot{I}_{бнз} = \frac{S_{бнз}^*}{U_{bk12}^*} - \dot{I}_{0нз}, \quad (2.169)$$

$$\dot{I}_{\text{CH}\mathcal{Z}} = \frac{S_{\text{CH}\mathcal{Z}}^*}{U_{\text{CK}12}^*} - \dot{I}_{0\text{H}\mathcal{Z}}, \quad (2.170)$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_{a\kappa} &= \dot{I}_{a\text{H}\mathcal{Z}} + \frac{\dot{U}_{a\kappa}}{R_{y\kappa}} + j[\dot{U}_{a\kappa} B_{a\kappa} + (\dot{U}_{a\kappa} - \dot{U}_{b\kappa}) B_{ab\kappa} + (\dot{U}_{a\kappa} - \dot{U}_{c\kappa}) B_{ac\kappa}] = \\ &= \dot{I}_{a\text{H}\mathcal{Z}} + \dot{U}_{a\kappa} \left[\frac{1}{R_{y\kappa}} + j(B_{a\kappa} + B_{ab\kappa} + B_{ac\kappa}) \right] - j\dot{U}_{b\kappa} B_{ab\kappa} - j\dot{U}_{c\kappa} B_{ac\kappa}, \end{aligned} \quad (2.171)$$

$$\dot{I}_{b\kappa} = \dot{I}_{b\text{H}\mathcal{Z}} + \dot{U}_{b\kappa} \left[\frac{1}{R_{y\kappa}} + j(B_{b\kappa} + B_{ab\kappa} + B_{bc\kappa}) \right] - j\dot{U}_{a\kappa} B_{ab\kappa} - j\dot{U}_{c\kappa} B_{bc\kappa}, \quad (2.172)$$

$$\dot{I}_{c\kappa} = \dot{I}_{c\text{H}\mathcal{Z}} + \dot{U}_{c\kappa} \left[\frac{1}{R_{y\kappa}} + j(B_{c\kappa} + B_{ac\kappa} + B_{bc\kappa}) \right] - j\dot{U}_{a\kappa} B_{ac\kappa} - j\dot{U}_{b\kappa} B_{bc\kappa}, \quad (2.173)$$

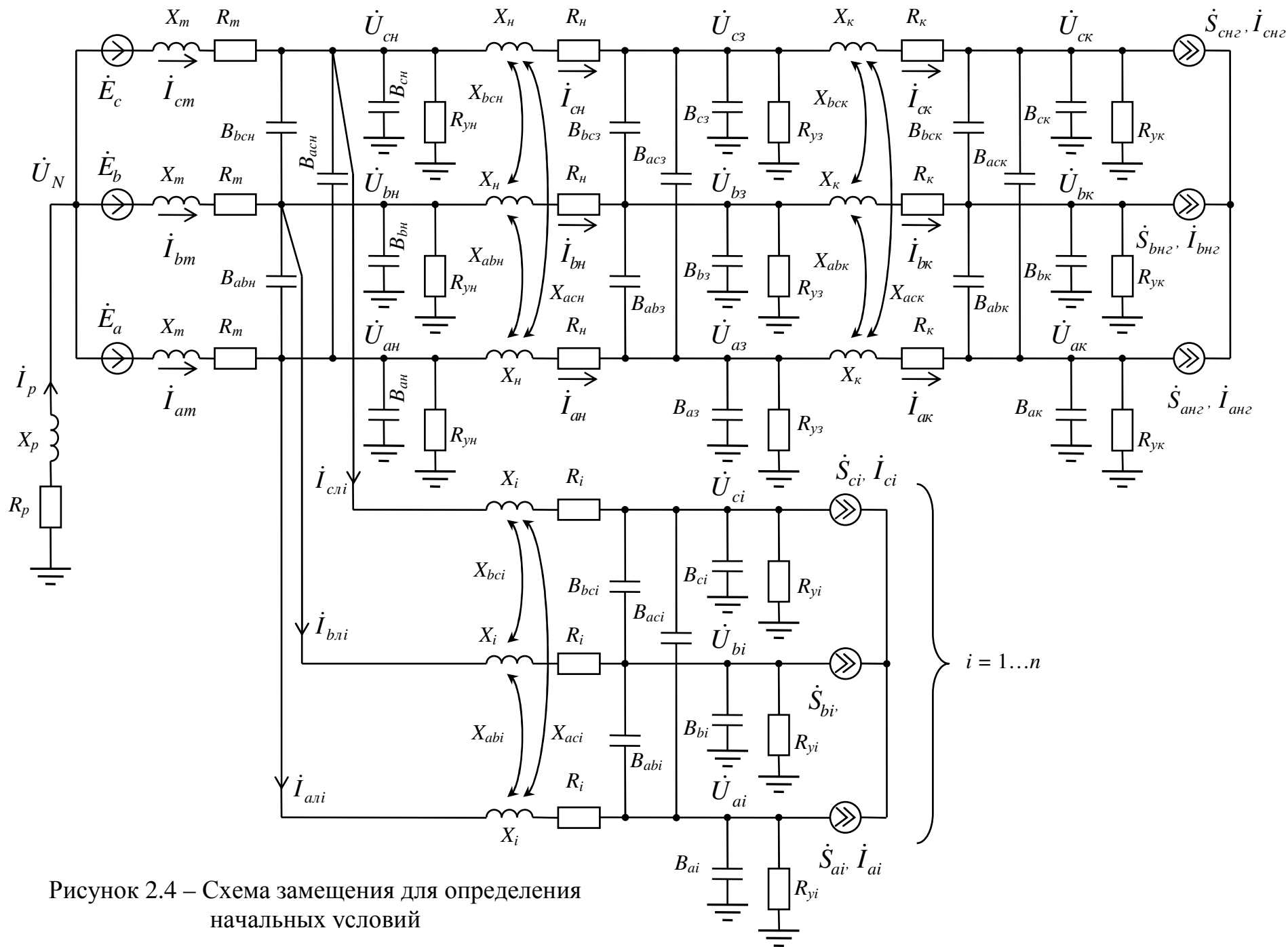


Рисунок 2.4 – Схема замещения для определения начальных условий

$$\dot{I}_{a\kappa} = \dot{I}_{a\kappa} + \dot{U}_{a3} \left[\frac{1}{R_{y3}} + j(B_{a3} + B_{ab3} + B_{ac3}) \right] - j\dot{U}_{b3} B_{ab3} - j\dot{U}_{c3} B_{ac3}, \quad (2.174)$$

$$\dot{I}_{b\kappa} = \dot{I}_{b\kappa} + \dot{U}_{b3} \left[\frac{1}{R_{y3}} + j(B_{b3} + B_{ab3} + B_{bc3}) \right] - j\dot{U}_{a3} B_{ab3} - j\dot{U}_{c3} B_{bc3}, \quad (2.175)$$

$$\dot{I}_{c\kappa} = \dot{I}_{c\kappa} + \dot{U}_{c3} \left[\frac{1}{R_{y3}} + j(B_{c3} + B_{ac3} + B_{bc3}) \right] - j\dot{U}_{a3} B_{ac3} - j\dot{U}_{b3} B_{bc3}, \quad (2.176)$$

$$\dot{U}_{a12i} = \frac{1}{3} (2\dot{U}_{ai} - \dot{U}_{bi} - \dot{U}_{ci}), \quad i = 1 \dots n, \quad (2.177)$$

$$\dot{U}_{b12i} = \frac{1}{3} (2\dot{U}_{bi} - \dot{U}_{ai} - \dot{U}_{ci}), \quad i = 1 \dots n, \quad (2.178)$$

$$\dot{U}_{c12i} = \frac{1}{3} (2\dot{U}_{ci} - \dot{U}_{ai} - \dot{U}_{bi}), \quad i = 1 \dots n, \quad (2.179)$$

$$\dot{I}_{0i} = \frac{1}{3} \left(\frac{S_{ai}^*}{U_{a12i}^*} + \frac{S_{bi}^*}{U_{b12i}^*} + \frac{S_{ci}^*}{U_{c12i}^*} \right), \quad i = 1 \dots n, \quad (2.180)$$

$$\dot{I}_{ai} = \frac{S_{ai}^*}{U_{a12i}^*} - \dot{I}_{0i}, \quad i = 1 \dots n, \quad (2.181)$$

$$\dot{I}_{bi} = \frac{S_{bi}^*}{U_{b12i}^*} - \dot{I}_{0i}, \quad i = 1 \dots n, \quad (2.182)$$

$$\dot{I}_{ci} = \frac{S_{ci}^*}{U_{c12i}^*} - \dot{I}_{0i}, \quad i = 1 \dots n, \quad (2.183)$$

$$\dot{I}_{a\lambda i} = \dot{I}_{ai} + \dot{U}_{ai} \left[\frac{1}{R_{yi}} + j(B_{ai} + B_{abi} + B_{aci}) \right] - j\dot{U}_{bi} B_{abi} - j\dot{U}_{ci} B_{aci}, \quad i = 1 \dots n, \quad (2.184)$$

$$\dot{I}_{b\lambda i} = \dot{I}_{bi} + \dot{U}_{bi} \left[\frac{1}{R_{yi}} + j(B_{bi} + B_{abi} + B_{bci}) \right] - j\dot{U}_{ai} B_{abi} - j\dot{U}_{ci} B_{bci}, \quad i = 1 \dots n, \quad (2.185)$$

$$\dot{I}_{c\lambda i} = \dot{I}_{ci} + \dot{U}_{ci} \left[\frac{1}{R_{yi}} + j(B_{ci} + B_{aci} + B_{bci}) \right] - j\dot{U}_{ai} B_{aci} - j\dot{U}_{bi} B_{bci}, \quad i = 1 \dots n, \quad (2.186)$$

$$\dot{I}_{a\mu} = \dot{I}_{a\kappa} + \sum_{i=1}^n \dot{I}_{a\lambda i} + \dot{U}_{a\mu} \left[\frac{1}{R_{y\mu}} + j(B_{a\mu} + B_{ab\mu} + B_{ac\mu}) \right] - j\dot{U}_{b\mu} B_{ab\mu} - j\dot{U}_{c\mu} B_{ac\mu}, \quad (2.187)$$

$$\dot{I}_{b\mu} = \dot{I}_{b\kappa} + \sum_{i=1}^n \dot{I}_{b\lambda i} + \dot{U}_{b\mu} \left[\frac{1}{R_{y\mu}} + j(B_{b\mu} + B_{ab\mu} + B_{bc\mu}) \right] - j\dot{U}_{a\mu} B_{ab\mu} - j\dot{U}_{c\mu} B_{bc\mu}, \quad (2.188)$$

$$\dot{I}_{cm} = \dot{I}_{ch} + \sum_{i=1}^n \dot{I}_{cli} + \dot{U}_{ch} \left[\frac{1}{R_{yh}} + j(B_{ch} + B_{ach} + B_{bch}) \right] - j\dot{U}_{ah} B_{ach} - j\dot{U}_{bh} B_{bch}, \quad (2.189)$$

$$\dot{I}_p = \dot{I}_{am} + \dot{I}_{bm} + \dot{I}_{cm}, \quad (2.190)$$

$$\dot{U}_N = -\dot{I}_p (R_p + jX_p), \quad (2.191)$$

$$\dot{U}_{ah} = \dot{U}_N + \dot{E}_a - \dot{I}_{am} (R_m + jX_m), \quad (2.192)$$

$$\dot{U}_{bh} = \dot{U}_N + \dot{E}_b - \dot{I}_{bm} (R_m + jX_m), \quad (2.193)$$

$$\dot{U}_{ch} = \dot{U}_N + \dot{E}_c - \dot{I}_{cm} (R_m + jX_m), \quad (2.194)$$

$$\dot{U}_{az} = \dot{U}_{ah} - \dot{I}_{ah} (R_h + jX_h) - j\dot{I}_{bh} X_{abh} - j\dot{I}_{ch} X_{ach}, \quad (2.195)$$

$$\dot{U}_{bz} = \dot{U}_{bh} - \dot{I}_{bh} (R_h + jX_h) - j\dot{I}_{ah} X_{abh} - j\dot{I}_{ch} X_{bch}, \quad (2.196)$$

$$\dot{U}_{cz} = \dot{U}_{ch} - \dot{I}_{ch} (R_h + jX_h) - j\dot{I}_{ah} X_{ach} - j\dot{I}_{bh} X_{bch}, \quad (2.197)$$

$$\dot{U}_{ak} = \dot{U}_{az} - \dot{I}_{ak} (R_k + jX_k) - j\dot{I}_{bk} X_{abk} - j\dot{I}_{ck} X_{ack}, \quad (2.198)$$

$$\dot{U}_{bk} = \dot{U}_{bz} - \dot{I}_{bk} (R_k + jX_k) - j\dot{I}_{ak} X_{abk} - j\dot{I}_{ck} X_{bck}, \quad (2.199)$$

$$\dot{U}_{ck} = \dot{U}_{cz} - \dot{I}_{ck} (R_k + jX_k) - j\dot{I}_{ak} X_{ack} - j\dot{I}_{bk} X_{bck}, \quad (2.200)$$

$$\dot{U}_{ai} = \dot{U}_{ah} - \dot{I}_{ali} (R_i + jX_i) - j\dot{I}_{bli} X_{abi} - j\dot{I}_{cli} X_{aci}, \quad i = 1 \dots n, \quad (2.201)$$

$$\dot{U}_{bi} = \dot{U}_{bh} - \dot{I}_{bli} (R_i + jX_i) - j\dot{I}_{ali} X_{abi} - j\dot{I}_{cli} X_{bci}, \quad i = 1 \dots n, \quad (2.202)$$

$$\dot{U}_{ci} = \dot{U}_{ch} - \dot{I}_{cli} (R_i + jX_i) - j\dot{I}_{ali} X_{aci} - j\dot{I}_{bli} X_{bci}, \quad i = 1 \dots n. \quad (2.203)$$

Верхний индекс «*» в данном случае обозначает сопряженный комплекс.

Представим эти уравнения в действительной форме в декартовой системе координат, действительные и мнимые составляющие токов и напряжений обозначим соответственно одним и двумя штрихами.

$$U'_{ak12} = \frac{1}{3}(2U'_{ak} - U'_{bk} - U'_{ck}), \quad (2.204)$$

$$U'_{bk12} = \frac{1}{3}(2U'_{bk} - U'_{ak} - U'_{ck}), \quad (2.205)$$

$$U'_{ck12} = \frac{1}{3}(2U'_{ck} - U'_{ak} - U'_{bk}), \quad (2.206)$$

$$U''_{ak12} = \frac{1}{3}(2U''_{ak} - U''_{bk} - U''_{ck}), \quad (2.207)$$

$$U''_{bk12} = \frac{1}{3}(2U''_{bk} - U''_{ak} - U''_{ck}), \quad (2.208)$$

$$U''_{ck12} = \frac{1}{3}(2U''_{ck} - U''_{ak} - U''_{bk}), \quad (2.209)$$

$$I'_{0H\epsilon} = \frac{1}{3} \left(\frac{P_{aH\epsilon} U'_{ak12} + Q_{aH\epsilon} U''_{ak12}}{U^2_{ak12}} + \frac{P_{bH\epsilon} U'_{bk12} + Q_{bH\epsilon} U''_{bk12}}{U^2_{bk12}} + \frac{P_{cH\epsilon} U'_{ck12} + Q_{cH\epsilon} U''_{ck12}}{U^2_{ck12}} \right), \quad (2.210)$$

$$I''_{0H\epsilon} = \frac{1}{3} \left(\frac{P_{aH\epsilon} U''_{ak12} - Q_{aH\epsilon} U'_{ak12}}{U^2_{ak12}} + \frac{P_{bH\epsilon} U''_{bk12} - Q_{bH\epsilon} U'_{bk12}}{U^2_{bk12}} + \frac{P_{cH\epsilon} U''_{ck12} - Q_{cH\epsilon} U'_{ck12}}{U^2_{ck12}} \right), \quad (2.211)$$

$$I'_{aH\epsilon} = \frac{P_{aH\epsilon} U'_{ak12} + Q_{aH\epsilon} U''_{ak12}}{U^2_{ak12}} - I'_{0H\epsilon}, \quad (2.212)$$

$$I''_{aH\epsilon} = \frac{P_{aH\epsilon} U''_{ak12} - Q_{aH\epsilon} U'_{ak12}}{U^2_{ak12}} - I''_{0H\epsilon}, \quad (2.213)$$

$$I'_{bH\epsilon} = \frac{P_{bH\epsilon} U'_{bk12} + Q_{bH\epsilon} U''_{bk12}}{U^2_{bk12}} - I'_{0H\epsilon}, \quad (2.214)$$

$$I''_{bH\epsilon} = \frac{P_{bH\epsilon} U''_{bk12} - Q_{bH\epsilon} U'_{bk12}}{U^2_{bk12}} - I''_{0H\epsilon}, \quad (2.215)$$

$$I'_{cH\epsilon} = \frac{P_{cH\epsilon} U'_{ck12} + Q_{cH\epsilon} U''_{ck12}}{U^2_{ck12}} - I'_{0H\epsilon}, \quad (2.216)$$

$$I''_{cH\epsilon} = \frac{P_{cH\epsilon} U''_{ck12} - Q_{cH\epsilon} U'_{ck12}}{U^2_{ck12}} - I''_{0H\epsilon}, \quad (2.217)$$

$$I'_{ak} = I'_{aH\epsilon} + \frac{U'_{ak}}{R_{y\kappa}} - U''_{ak} (B_{ak} + B_{ab\kappa} + B_{ac\kappa}) + U''_{bk} B_{ab\kappa} + U''_{ck} B_{ac\kappa}, \quad (2.218)$$

$$I''_{ak} = I''_{aH\epsilon} + \frac{U''_{ak}}{R_{y\kappa}} + U'_{ak} (B_{ak} + B_{ab\kappa} + B_{ac\kappa}) - U'_{bk} B_{ab\kappa} - U'_{ck} B_{ac\kappa}, \quad (2.219)$$

$$I'_{bk} = I'_{bH\epsilon} + \frac{U'_{bk}}{R_{y\kappa}} - U''_{bk} (B_{bk} + B_{ab\kappa} + B_{bc\kappa}) + U''_{ak} B_{ab\kappa} + U''_{ck} B_{bc\kappa}, \quad (2.220)$$

$$I''_{bk} = I''_{bH\epsilon} + \frac{U''_{bk}}{R_{y\kappa}} + U'_{bk} (B_{bk} + B_{ab\kappa} + B_{bc\kappa}) - U'_{ak} B_{ab\kappa} - U'_{ck} B_{bc\kappa}, \quad (2.221)$$

$$I'_{ck} = I'_{cH\epsilon} + \frac{U'_{ck}}{R_{y\kappa}} - U''_{ck} (B_{ck} + B_{ac\kappa} + B_{bc\kappa}) + U''_{ak} B_{ac\kappa} + U''_{bk} B_{bc\kappa}, \quad (2.222)$$

$$I''_{ck} = I''_{cH\epsilon} + \frac{U''_{ck}}{R_{y\kappa}} + U'_{ck} (B_{ck} + B_{ac\kappa} + B_{bc\kappa}) - U'_{ak} B_{ac\kappa} - U'_{bk} B_{bc\kappa}, \quad (2.223)$$

$$I'_{ah} = I'_{ak} + \frac{U'_{a3}}{R_{y3}} - U''_{a3}(B_{a3} + B_{ab3} + B_{ac3}) + U''_{b3}B_{ab3} + U''_{c3}B_{ac3}, \quad (2.224)$$

$$I''_{ah} = I''_{ak} + \frac{U''_{a3}}{R_{y3}} + U'_{a3}(B_{a3} + B_{ab3} + B_{ac3}) - U'_{b3}B_{ab3} - U'_{c3}B_{ac3}, \quad (2.225)$$

$$I'_{bh} = I'_{bk} + \frac{U'_{b3}}{R_{y3}} - U''_{b3}(B_{b3} + B_{ab3} + B_{bc3}) + U''_{a3}B_{ab3} + U''_{c3}B_{bc3}, \quad (2.226)$$

$$I''_{bh} = I''_{bk} + \frac{U''_{b3}}{R_{y3}} + U'_{b3}(B_{b3} + B_{ab3} + B_{bc3}) - U'_{a3}B_{ab3} - U'_{c3}B_{bc3}, \quad (2.227)$$

$$I'_{ch} = I'_{ck} + \frac{U'_{c3}}{R_{y3}} - U''_{c3}(B_{c3} + B_{ac3} + B_{bc3}) + U''_{a3}B_{ac3} + U''_{b3}B_{bc3}, \quad (2.228)$$

$$I''_{ch} = I''_{ck} + \frac{U''_{c3}}{R_{y3}} + U'_{c3}(B_{c3} + B_{ac3} + B_{bc3}) - U'_{a3}B_{ac3} - U'_{b3}B_{bc3}, \quad (2.229)$$

$$U'_{a12i} = \frac{1}{3}(2U'_{ai} - U'_{bi} - U'_{ci}), \quad i = 1 \dots n, \quad (2.230)$$

$$U'_{b12i} = \frac{1}{3}(2U'_{bi} - U'_{ai} - U'_{ci}), \quad i = 1 \dots n, \quad (2.231)$$

$$U'_{c12i} = \frac{1}{3}(2U'_{ci} - U'_{ai} - U'_{bi}), \quad i = 1 \dots n, \quad (2.232)$$

$$U''_{a12i} = \frac{1}{3}(2U''_{ai} - U''_{bi} - U''_{ci}), \quad i = 1 \dots n, \quad (2.233)$$

$$U''_{b12i} = \frac{1}{3}(2U''_{bi} - U''_{ai} - U''_{ci}), \quad i = 1 \dots n, \quad (2.234)$$

$$U''_{c12i} = \frac{1}{3}(2U''_{ci} - U''_{ai} - U''_{bi}), \quad i = 1 \dots n, \quad (2.235)$$

$$I'_{0i} = \frac{1}{3} \left(\frac{P_{ai}U'_{a12i} + Q_{ai}U''_{a12i}}{U_{a12i}^2} + \frac{P_{bi}U'_{b12i} + Q_{bi}U''_{b12i}}{U_{b12i}^2} + \frac{P_{ci}U'_{c12i} + Q_{ci}U''_{c12i}}{U_{c12i}^2} \right), \quad i = 1 \dots n, \quad (2.236)$$

$$I''_{0i} = \frac{1}{3} \left(\frac{P_{ai}U''_{a12i} - Q_{ai}U'_{a12i}}{U_{a12i}^2} + \frac{P_{bi}U''_{b12i} - Q_{bi}U'_{b12i}}{U_{b12i}^2} + \frac{P_{ci}U''_{c12i} - Q_{ci}U'_{c12i}}{U_{c12i}^2} \right), \quad i = 1 \dots n, \quad (2.237)$$

$$I'_{ai} = \frac{P_{ai}U'_{a12i} + Q_{ai}U''_{a12i}}{U_{a12i}^2} - I'_{0i}, \quad i = 1 \dots n, \quad (2.238)$$

$$I''_{ai} = \frac{P_{ai}U''_{a12i} - Q_{ai}U'_{a12i}}{U_{a12i}^2} - I''_{0i}, \quad i = 1 \dots n, \quad (2.239)$$

$$I'_{bi} = \frac{P_{bi}U'_{b12i} + Q_{bi}U''_{b12i}}{U_{b12i}^2} - I'_{0i}, \quad i = 1 \dots n, \quad (2.240)$$

$$I''_{bi} = \frac{P_{bi}U''_{b12i} - Q_{bi}U'_{b12i}}{U_{b12i}^2} - I''_{0i}, \quad i = 1 \dots n, \quad (2.241)$$

$$I'_{ci} = \frac{P_{ci}U'_{c12i} + Q_{ci}U''_{c12i}}{U_{c12i}^2} - I'_{0i}, \quad i = 1 \dots n, \quad (2.242)$$

$$I''_{ci} = \frac{P_{ci}U''_{c12i} - Q_{ci}U'_{c12i}}{U_{c12i}^2} - I''_{0i}, \quad i = 1 \dots n, \quad (2.243)$$

$$I'_{ai} = I'_{ai} + \frac{U'_{ai}}{R_{yi}} - U''_{ai}(B_{ai} + B_{abi} + B_{aci}) + U''_{bi}B_{abi} + U''_{ci}B_{aci}, \quad i = 1 \dots n, \quad (2.244)$$

$$I''_{ai} = I''_{ai} + \frac{U''_{ai}}{R_{yi}} + U'_{ai}(B_{ai} + B_{abi} + B_{aci}) - U'_{bi}B_{abi} - U'_{ci}B_{aci}, \quad i = 1 \dots n, \quad (2.245)$$

$$I'_{bi} = I'_{bi} + \frac{U'_{bi}}{R_{yi}} - U''_{bi}(B_{bi} + B_{abi} + B_{bci}) + U''_{ai}B_{abi} + U''_{ci}B_{bci}, \quad i = 1 \dots n, \quad (2.246)$$

$$I''_{bi} = I''_{bi} + \frac{U''_{bi}}{R_{yi}} + U'_{bi}(B_{bi} + B_{abi} + B_{bci}) - U'_{ai}B_{abi} - U'_{ci}B_{bci}, \quad i = 1 \dots n, \quad (2.247)$$

$$I'_{ci} = I'_{ci} + \frac{U'_{ci}}{R_{yi}} - U''_{ci}(B_{ci} + B_{aci} + B_{bci}) + U''_{ai}B_{aci} + U''_{bi}B_{bci}, \quad i = 1 \dots n, \quad (2.248)$$

$$I''_{ci} = I''_{ci} + \frac{U''_{ci}}{R_{yi}} + U'_{ci}(B_{ci} + B_{aci} + B_{bci}) - U'_{ai}B_{aci} - U'_{bi}B_{bci}, \quad i = 1 \dots n, \quad (2.249)$$

$$I'_{am} = I'_{am} + \sum_{i=1}^n I'_{ali} + \frac{U'_{ah}}{R_{yh}} - U''_{ah}(B_{ah} + B_{abh} + B_{ach}) + U''_{bh}B_{abh} + U''_{ch}B_{ach}, \quad (2.250)$$

$$I''_{am} = I''_{am} + \sum_{i=1}^n I''_{ali} + \frac{U''_{ah}}{R_{yh}} + U'_{ah}(B_{ah} + B_{abh} + B_{ach}) - U'_{bh}B_{abh} - U'_{ch}B_{ach}, \quad (2.251)$$

$$I'_{bm} = I'_{bm} + \sum_{i=1}^n I'_{bli} + \frac{U'_{bh}}{R_{yh}} - U''_{bh}(B_{bh} + B_{abh} + B_{bch}) + U''_{ah}B_{abh} + U''_{ch}B_{bch}, \quad (2.252)$$

$$I''_{bm} = I''_{bm} + \sum_{i=1}^n I''_{bli} + \frac{U''_{bh}}{R_{yh}} + U'_{bh}(B_{bh} + B_{abh} + B_{bch}) - U'_{ah}B_{abh} - U'_{ch}B_{bch}, \quad (2.253)$$

$$I'_{cm} = I'_{cm} + \sum_{i=1}^n I'_{cli} + \frac{U'_{ch}}{R_{yh}} - U''_{ch}(B_{ch} + B_{ach} + B_{bch}) + U''_{ah}B_{ach} + U''_{bh}B_{bch}, \quad (2.254)$$

$$I''_{cm} = I''_{cm} + \sum_{i=1}^n I''_{cli} + \frac{U''_{ch}}{R_{yh}} + U'_{ch}(B_{ch} + B_{ach} + B_{bch}) - U'_{ah}B_{ach} - U'_{bh}B_{bch}, \quad (2.255)$$

$$I'_p = I'_{am} + I'_{bm} + I'_{cm}, \quad (2.256)$$

$$I''_p = I''_{am} + I''_{bm} + I''_{cm}, \quad (2.257)$$

$$U'_N = -I'_p R_p + I''_p X_p, \quad (2.258)$$

$$U''_N = -I''_p R_p - I'_p X_p, \quad (2.259)$$

$$U'_{aH} = U'_N + E'_a - I'_{am} R_m + I''_{am} X_m, \quad (2.260)$$

$$U''_{aH} = U''_N + E''_a - I''_{am} R_m - I'_{am} X_m, \quad (2.261)$$

$$U'_{bH} = U'_N + E'_b - I'_{bm} R_m + I''_{bm} X_m, \quad (2.262)$$

$$U''_{bH} = U''_N + E''_b - I''_{bm} R_m - I'_{bm} X_m, \quad (2.263)$$

$$U'_{cH} = U'_N + E'_c - I'_{cm} R_m + I''_{cm} X_m, \quad (2.264)$$

$$U''_{cH} = U''_N + E''_c - I''_{cm} R_m - I'_{cm} X_m, \quad (2.265)$$

$$U'_{a3} = U'_{aH} - I'_{aH} R_H + I''_{aH} X_H + I''_{bH} X_{abH} + I''_{cH} X_{acH}, \quad (2.266)$$

$$U''_{a3} = U''_{aH} - I''_{aH} R_H - I'_{aH} X_H - I'_{bH} X_{abH} - I'_{cH} X_{acH}, \quad (2.267)$$

$$U'_{b3} = U'_{bH} - I'_{bH} R_H + I''_{bH} X_H + I''_{aH} X_{abH} + I''_{cH} X_{bcH}, \quad (2.268)$$

$$U''_{b3} = U''_{bH} - I''_{bH} R_H - I'_{bH} X_H - I'_{aH} X_{abH} - I'_{cH} X_{bcH}, \quad (2.269)$$

$$U'_{c3} = U'_{cH} - I'_{cH} R_H + I''_{cH} X_H + I''_{aH} X_{acH} + I''_{bH} X_{bcH}, \quad (2.270)$$

$$U''_{c3} = U''_{cH} - I''_{cH} R_H - I'_{cH} X_H - I'_{aH} X_{acH} - I'_{bH} X_{bcH}, \quad (2.271)$$

$$U'_{aK} = U'_{a3} - I'_{aK} R_K + I''_{aK} X_K + I''_{bK} X_{abK} + I''_{cK} X_{acK}, \quad (2.272)$$

$$U''_{aK} = U''_{a3} - I''_{aK} R_K - I'_{aK} X_K - I'_{bK} X_{abK} - I'_{cK} X_{acK}, \quad (2.273)$$

$$U'_{bK} = U'_{b3} - I'_{bK} R_K + I''_{bK} X_K + I''_{aK} X_{abK} + I''_{cK} X_{bcK}, \quad (2.274)$$

$$U''_{bK} = U''_{b3} - I''_{bK} R_K - I'_{bK} X_K - I'_{aK} X_{abK} - I'_{cK} X_{bcK}, \quad (2.275)$$

$$U'_{cK} = U'_{c3} - I'_{cK} R_K + I''_{cK} X_K + I''_{aK} X_{acK} + I''_{bK} X_{bcK}, \quad (2.276)$$

$$U''_{cK} = U''_{c3} - I''_{cK} R_K - I'_{cK} X_K - I'_{aK} X_{acK} - I'_{bK} X_{bcK}, \quad (2.277)$$

$$U'_{ai} = U'_{aH} - I'_{aLi} R_i + I''_{aLi} X_i + I''_{bLi} X_{abi} + I''_{cLi} X_{aci}, \quad i = 1 \dots n, \quad (2.278)$$

$$U''_{ai} = U''_{aH} - I''_{aLi} R_i - I'_{aLi} X_i - I'_{bLi} X_{abi} - I'_{cLi} X_{aci}, \quad i = 1 \dots n, \quad (2.279)$$

$$U'_{bi} = U'_{bH} - I'_{bLi} R_i + I''_{bLi} X_i + I''_{aLi} X_{abi} + I''_{cLi} X_{bci}, \quad i = 1 \dots n, \quad (2.280)$$

$$U''_{bi} = U''_{bH} - I''_{bLi} R_i - I'_{bLi} X_i - I'_{aLi} X_{abi} - I'_{cLi} X_{bci}, \quad i = 1 \dots n, \quad (2.281)$$

$$U'_{ci} = U'_{cH} - I'_{cLi} R_i + I''_{cLi} X_i + I''_{aLi} X_{aci} + I''_{bLi} X_{bci}, \quad i = 1 \dots n, \quad (2.282)$$

$$U''_{ci} = U''_{cH} - I''_{cLi} R_i - I'_{cLi} X_i - I'_{aLi} X_{aci} - I'_{bLi} X_{bci}, \quad i = 1 \dots n. \quad (2.283)$$

2.5 Разработка алгоритма расчета установившегося режима сети с ДГР

Расчет установившегося режима имеет также самостоятельное значение. В этом случае нет необходимости выделять предполагаемую поврежденную линию. Схема замещения без поврежденной линии представлена на рисунке 2.5. Ниже приведена соответствующая математическая модель [111].

$$U'_{a12i} = \frac{1}{3}(2U'_{ai} - U'_{bi} - U'_{ci}), \quad i = 1 \dots n, \quad (2.284)$$

$$U'_{b12i} = \frac{1}{3}(2U'_{bi} - U'_{ai} - U'_{ci}), \quad i = 1 \dots n, \quad (2.285)$$

$$U'_{c12i} = \frac{1}{3}(2U'_{ci} - U'_{ai} - U'_{bi}), \quad i = 1 \dots n, \quad (2.286)$$

$$U''_{a12i} = \frac{1}{3}(2U''_{ai} - U''_{bi} - U''_{ci}), \quad i = 1 \dots n, \quad (2.287)$$

$$U''_{b12i} = \frac{1}{3}(2U''_{bi} - U''_{ai} - U''_{ci}), \quad i = 1 \dots n, \quad (2.288)$$

$$U''_{c12i} = \frac{1}{3}(2U''_{ci} - U''_{ai} - U''_{bi}), \quad i = 1 \dots n, \quad (2.289)$$

$$I'_{0i} = \frac{1}{3} \left(\frac{P_{ai}U'_{a12i} + Q_{ai}U''_{a12i}}{U_{a12i}^2} + \frac{P_{bi}U'_{b12i} + Q_{bi}U''_{b12i}}{U_{b12i}^2} + \frac{P_{ci}U'_{c12i} + Q_{ci}U''_{c12i}}{U_{c12i}^2} \right), \quad i = 1 \dots n, \quad (2.290)$$

$$I''_{0i} = \frac{1}{3} \left(\frac{P_{ai}U''_{a12i} - Q_{ai}U'_{a12i}}{U_{a12i}^2} + \frac{P_{bi}U''_{b12i} - Q_{bi}U'_{b12i}}{U_{b12i}^2} + \frac{P_{ci}U''_{c12i} - Q_{ci}U'_{c12i}}{U_{c12i}^2} \right), \quad i = 1 \dots n, \quad (2.291)$$

$$I'_{ai} = \frac{P_{ai}U'_{a12i} + Q_{ai}U''_{a12i}}{U_{a12i}^2} - I'_{0i}, \quad i = 1 \dots n, \quad (2.292)$$

$$I''_{ai} = \frac{P_{ai}U''_{a12i} - Q_{ai}U'_{a12i}}{U_{a12i}^2} - I''_{0i}, \quad i = 1 \dots n, \quad (2.293)$$

$$I'_{bi} = \frac{P_{bi}U'_{b12i} + Q_{bi}U''_{b12i}}{U_{b12i}^2} - I'_{0i}, \quad i = 1 \dots n, \quad (2.294)$$

$$I''_{bi} = \frac{P_{bi}U''_{b12i} - Q_{bi}U'_{b12i}}{U_{b12i}^2} - I''_{0i}, \quad i = 1 \dots n, \quad (2.295)$$

$$I'_{ci} = \frac{P_{ci}U'_{c12i} + Q_{ci}U''_{c12i}}{U_{c12i}^2} - I'_{0i}, \quad i = 1 \dots n, \quad (2.296)$$

$$I''_{ci} = \frac{P_{ci}U''_{c12i} - Q_{ci}U'_{c12i}}{U_{c12i}^2} - I''_{0i}, \quad i = 1 \dots n, \quad (2.297)$$

$$I'_{ali} = I'_{ai} + \frac{U'_{ai}}{R_{yi}} - U''_{ai}(B_{ai} + B_{abi} + B_{aci}) + U''_{bi}B_{abi} + U''_{ci}B_{aci}, \quad i = 1 \dots n, \quad (2.298)$$

$$I''_{ali} = I''_{ai} + \frac{U''_{ai}}{R_{yi}} + U'_{ai}(B_{ai} + B_{abi} + B_{aci}) - U'_{bi}B_{abi} - U'_{ci}B_{aci}, \quad i = 1 \dots n, \quad (2.299)$$

$$I'_{bli} = I'_{bi} + \frac{U'_{bi}}{R_{yi}} - U''_{bi}(B_{bi} + B_{abi} + B_{bci}) + U''_{ai}B_{abi} + U''_{ci}B_{bci}, \quad i = 1 \dots n, \quad (2.300)$$

$$I''_{bli} = I''_{bi} + \frac{U''_{bi}}{R_{yi}} + U'_{bi}(B_{bi} + B_{abi} + B_{bci}) - U'_{ai}B_{abi} - U'_{ci}B_{bci}, \quad i = 1 \dots n, \quad (2.301)$$

$$I'_{cli} = I'_{ci} + \frac{U'_{ci}}{R_{yi}} - U''_{ci}(B_{ci} + B_{aci} + B_{bci}) + U''_{ai}B_{aci} + U''_{bi}B_{bci}, \quad i = 1 \dots n, \quad (2.302)$$

$$I''_{cli} = I''_{ci} + \frac{U''_{ci}}{R_{yi}} + U'_{ci}(B_{ci} + B_{aci} + B_{bci}) - U'_{ai}B_{aci} - U'_{bi}B_{bci}, \quad i = 1 \dots n, \quad (2.303)$$

$$I'_{am} = \sum_{i=1}^n I'_{ali} + \frac{U'_{an}}{R_{yn}} - U''_{an}(B_{an} + B_{abn} + B_{ach}) + U''_{bn}B_{abn} + U''_{cn}B_{ach}, \quad (2.304)$$

$$I''_{am} = \sum_{i=1}^n I''_{ali} + \frac{U''_{an}}{R_{yn}} + U'_{an}(B_{an} + B_{abn} + B_{ach}) - U'_{bn}B_{abn} - U'_{cn}B_{ach}, \quad (2.305)$$

$$I'_{bm} = \sum_{i=1}^n I'_{bli} + \frac{U'_{bn}}{R_{yn}} - U''_{bn}(B_{bn} + B_{abn} + B_{bch}) + U''_{an}B_{abn} + U''_{cn}B_{bch}, \quad (2.306)$$

$$I''_{bm} = \sum_{i=1}^n I''_{bli} + \frac{U''_{bn}}{R_{yn}} + U'_{bn}(B_{bn} + B_{abn} + B_{bch}) - U'_{an}B_{abn} - U'_{cn}B_{bch}, \quad (2.307)$$

$$I'_{cm} = \sum_{i=1}^n I'_{cli} + \frac{U'_{cn}}{R_{yn}} - U''_{cn}(B_{cn} + B_{ach} + B_{bch}) + U''_{an}B_{ach} + U''_{bn}B_{bch}, \quad (2.308)$$

$$I''_{cm} = \sum_{i=1}^n I''_{cli} + \frac{U''_{cn}}{R_{yn}} + U'_{cn}(B_{cn} + B_{ach} + B_{bch}) - U'_{an}B_{ach} - U'_{bn}B_{bch}, \quad (2.309)$$

$$I'_p = I'_{am} + I'_{bm} + I'_{cm}, \quad (2.310)$$

$$I''_p = I''_{am} + I''_{bm} + I''_{cm}, \quad (2.311)$$

$$U'_N = -I'_p R_p + I''_p X_p, \quad (2.312)$$

$$U''_N = -I''_p R_p - I'_p X_p, \quad (2.313)$$

$$U'_{an} = U'_N + E'_a - I'_{am} R_m + I''_{am} X_m, \quad (2.314)$$

$$U''_{an} = U''_N + E''_a - I''_{am} R_m - I'_{am} X_m, \quad (2.315)$$

$$U'_{bn} = U'_N + E'_b - I'_{bm} R_m + I''_{bm} X_m, \quad (2.316)$$

$$U''_{bn} = U''_N + E''_b - I''_{bm} R_m - I'_{bm} X_m, \quad (2.317)$$

$$U'_{cn} = U'_N + E'_c - I'_{cm} R_m + I''_{cm} X_m, \quad (2.318)$$

$$U''_{cn} = U''_N + E''_c - I''_{cm} R_m - I'_{cm} X_m, \quad (2.319)$$

$$U'_{ai} = U'_{an} - I'_{ali} R_i + I''_{ali} X_i + I''_{bli} X_{abi} + I''_{cli} X_{aci}, \quad i=1..n, \quad (2.320)$$

$$U''_{ai} = U''_{an} - I''_{ali} R_i - I'_{ali} X_i - I'_{bli} X_{abi} - I'_{cli} X_{aci}, \quad i=1..n, \quad (2.321)$$

$$U'_{bi} = U'_{bn} - I'_{bli} R_i + I''_{bli} X_i + I''_{ali} X_{abi} + I''_{cli} X_{bci}, \quad i=1..n, \quad (2.322)$$

$$U''_{bi} = U''_{bn} - I''_{bli} R_i - I'_{bli} X_i - I'_{ali} X_{abi} - I'_{cli} X_{bci}, \quad i=1..n, \quad (2.323)$$

$$U'_{ci} = U'_{cn} - I'_{cli} R_i + I''_{cli} X_i + I''_{ali} X_{aci} + I''_{bli} X_{bci}, \quad i=1..n, \quad (2.324)$$

$$U''_{ci} = U''_{cn} - I''_{cli} R_i - I'_{cli} X_i - I'_{ali} X_{aci} - I'_{bli} X_{bci}, \quad i=1..n. \quad (2.325)$$

Расчет реализуем методом простой итерации по напряжениям. Каждая итерация представляет собой вариант известного метода «По данным начала» [43], эффективного для разомкнутых сетей. В данном случае этот метод обобщен на несимметричные режимы, а расчеты производятся в токах, а не в мощностях. В целом, как следует из приведенных уравнений, 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.

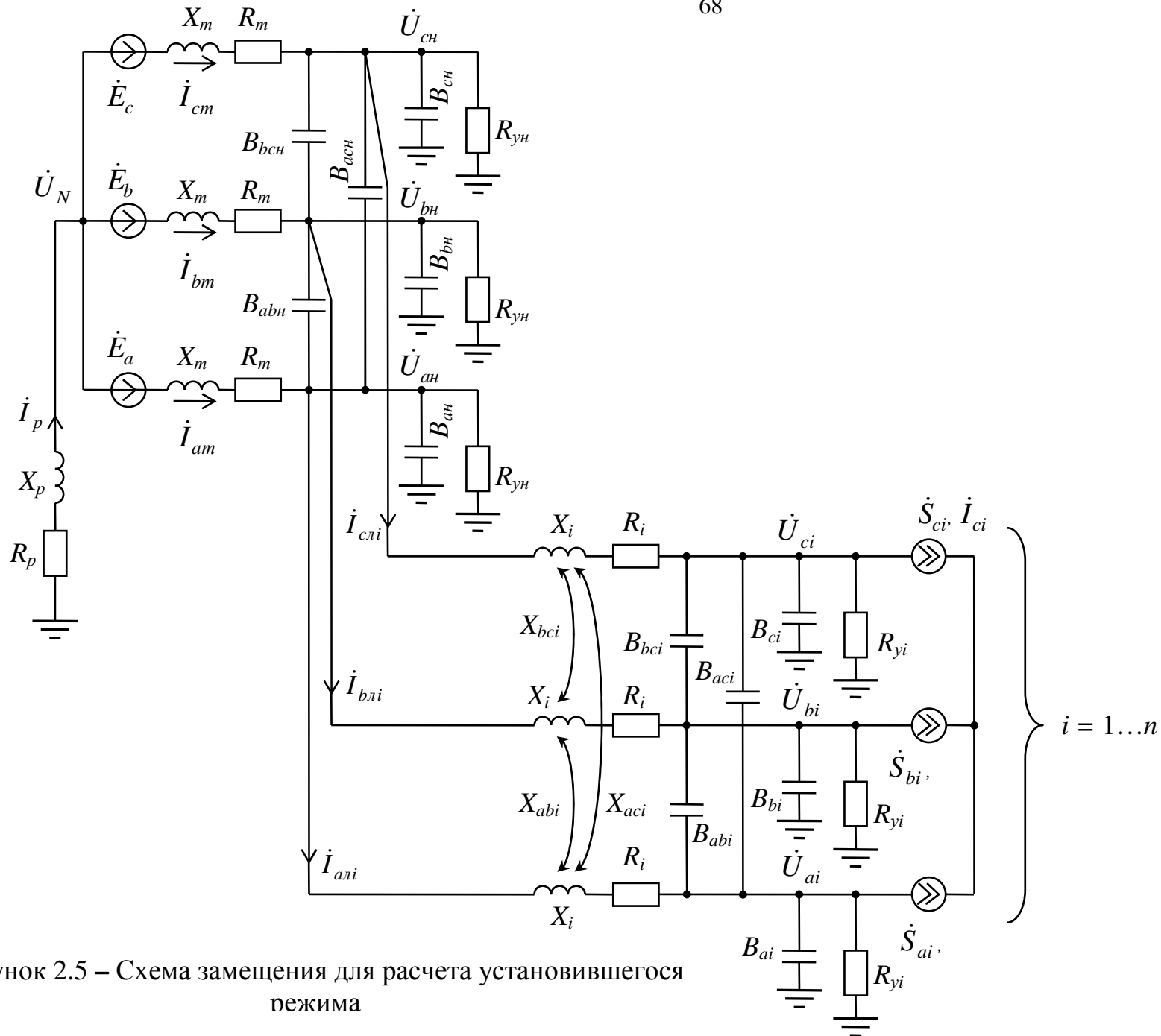


Рисунок 2.5 – Схема замещения для расчета установившегося режима

Алгоритм расчета установившегося режима без выделения поврежденной линии представлен на рисунках 2.6 – 2.10.

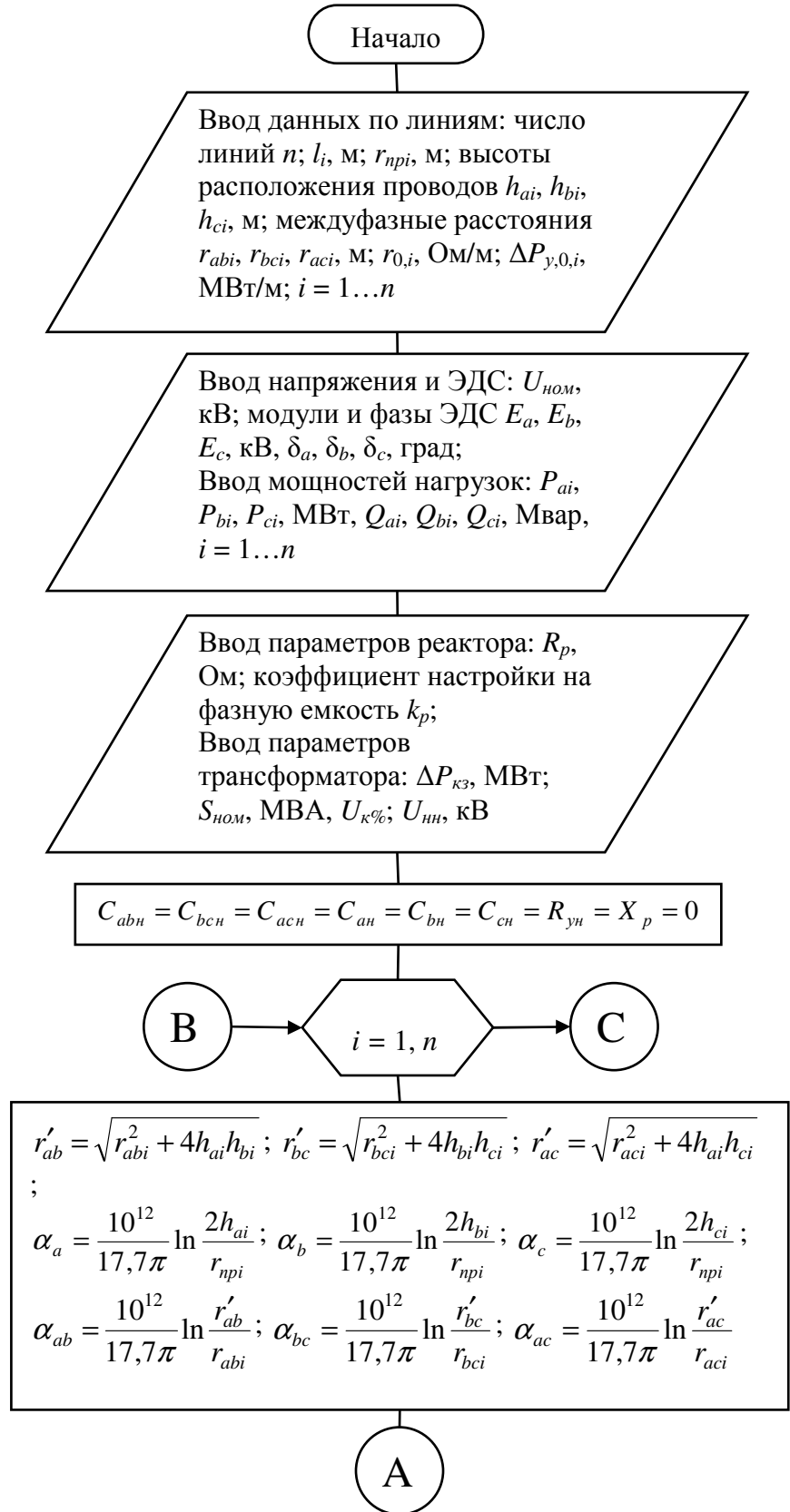


Рисунок 2.6 – Блок-схема расчета установившегося режима без выделения поврежденной линии

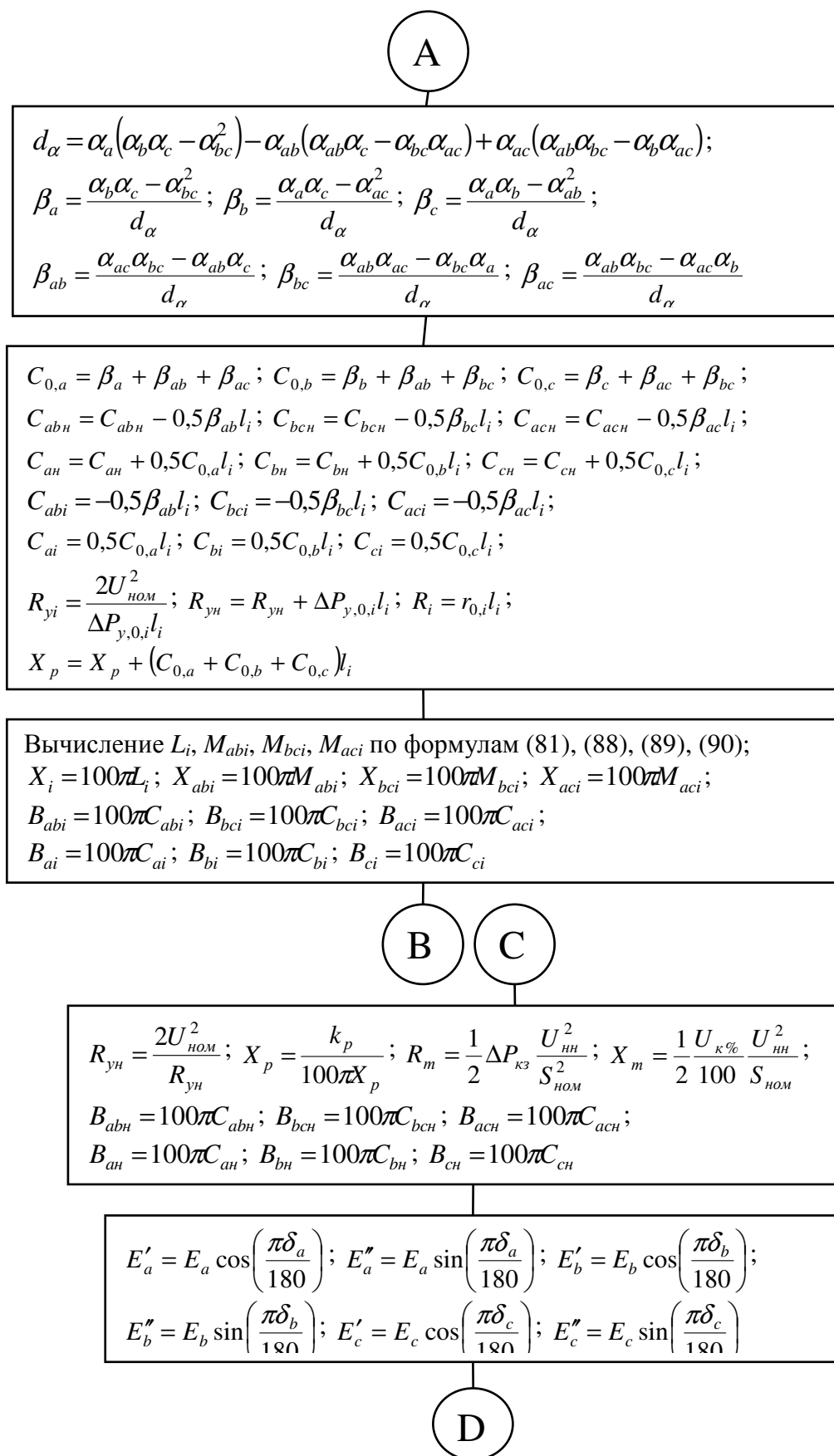


Рисунок 2.7 – Блок-схема расчета установившегося режима без выделения поврежденной линии (продолжение)

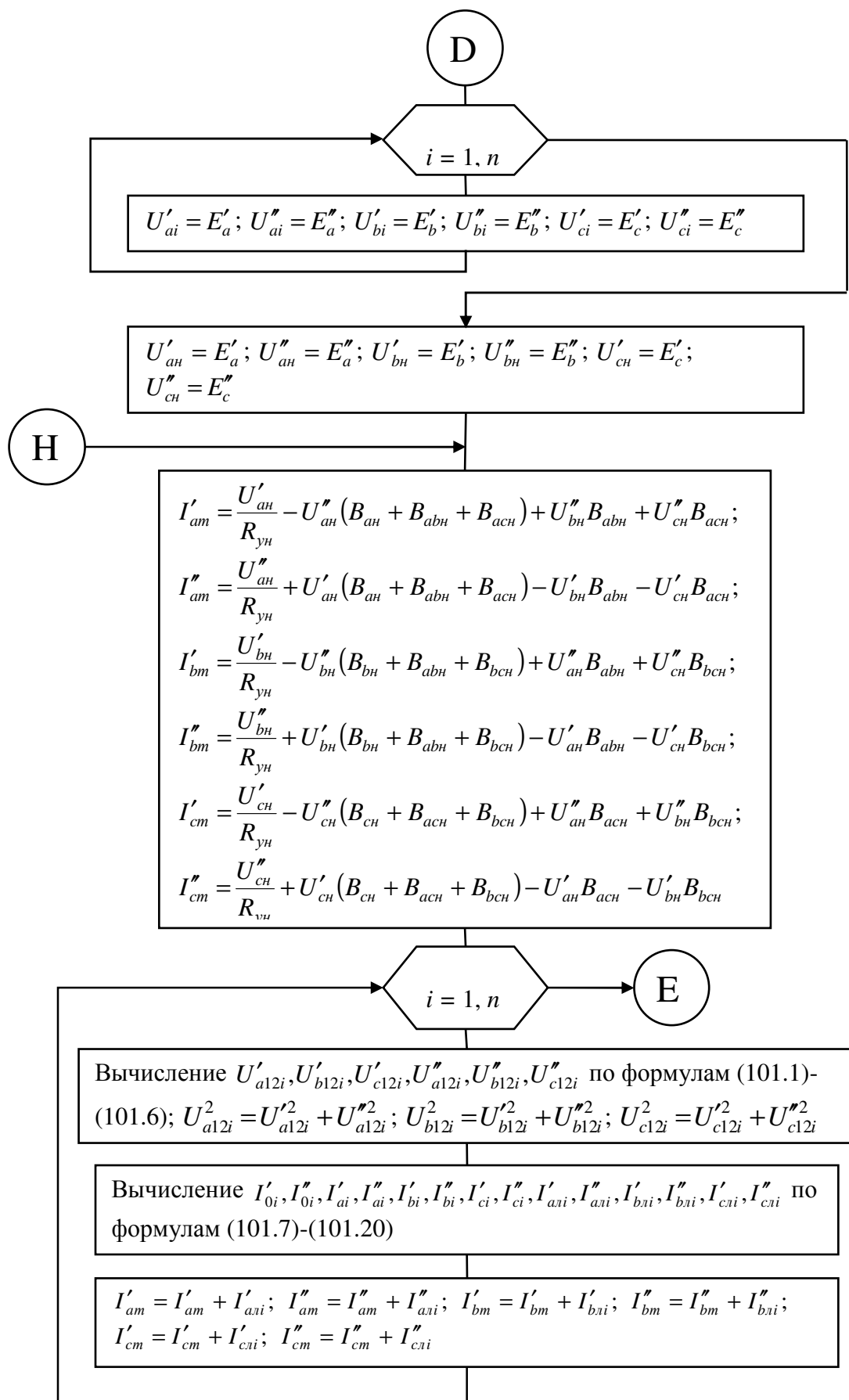


Рисунок 2.8 – Блок-схема расчета установившегося режима без выделения поврежденной линии (продолжение)

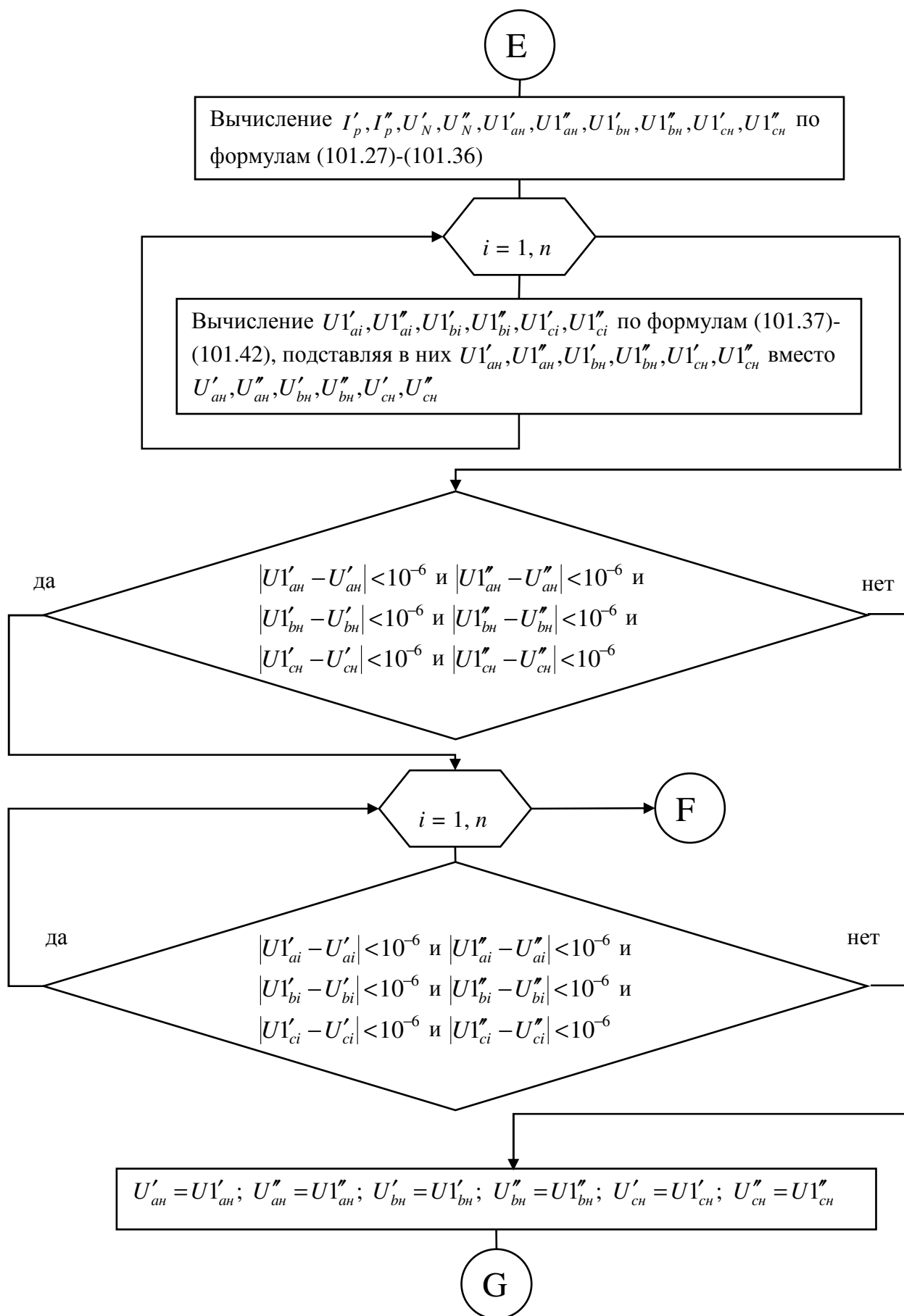


Рисунок 2.9 – Блок-схема расчета установившегося режима без выделения поврежденной линии (продолжение)

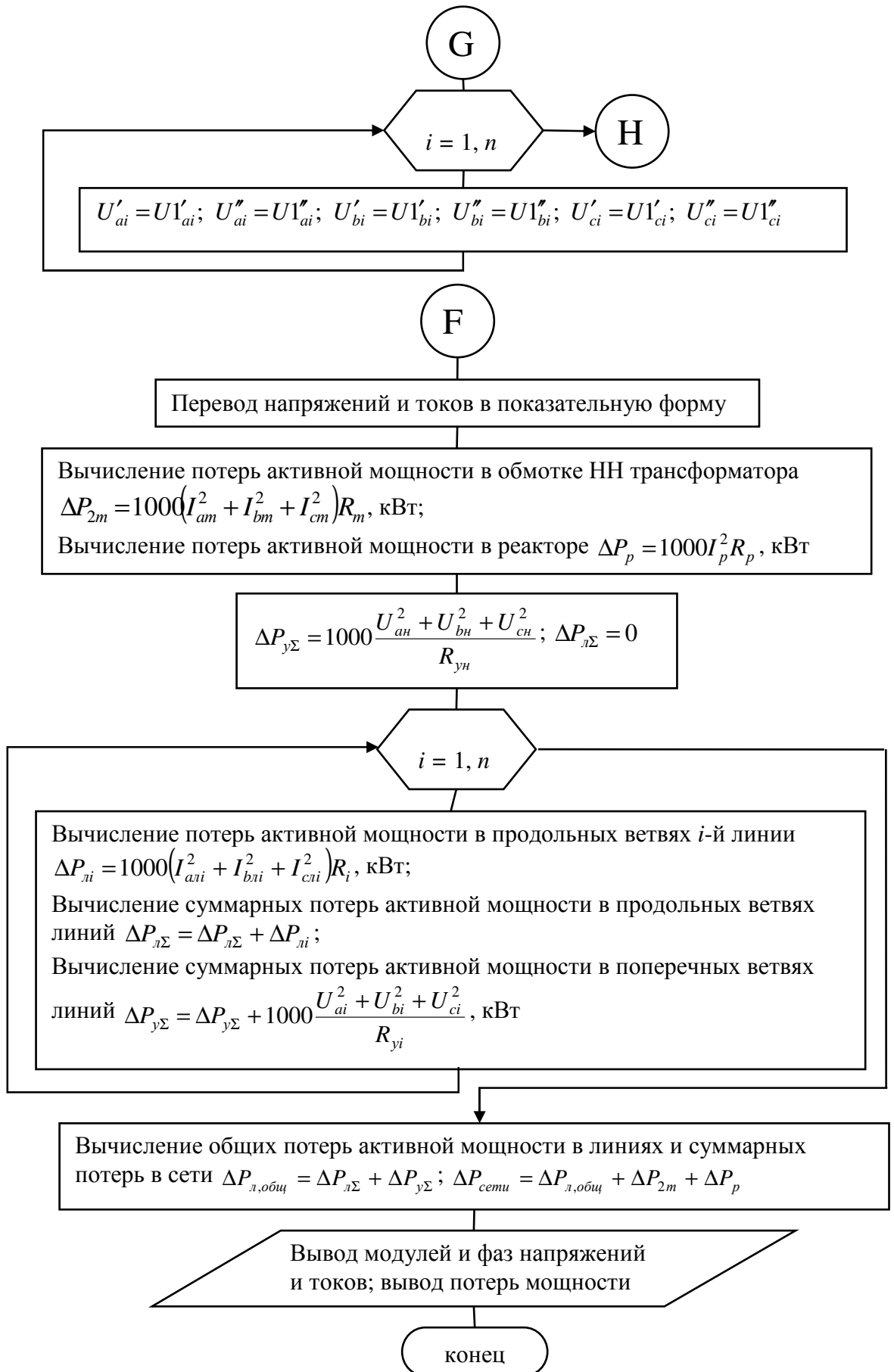


Рисунок 2.10 – Блок-схема расчета установившегося режима без выделения поврежденной линии (окончание)

По разработанному алгоритму (рисунок 2.6-2.10) создана программа для расчета напряжения смещения нейтрали в среде DELPHI при полной схеме замещения электрической сети (Приложение Б).

2.6 Математическая модель дугового замыкания на землю

Модель (2.44-2.97), является корректной только для металлического замыкания и замыкания через постоянной (линейное) сопротивление. Для составления модели дугового замыкания, нужно вместо выражения (2.97) поставить математическую модель дуги, представленную в конце данного пункта.

Основой для составления математической модели является вольт-амперная характеристика (ВАХ) дуги [43], приведенная на рисунке 2.11, которая имеет участок увеличения тока 0-1-2 и участок уменьшения тока 2-3-0, а также аналогичные ветви в третьем квадранте. Математическим критерием различия этих ветвей может служить знак выражения $i_o \frac{di_o}{dt}$ (i_o – ток дуги). Ветви роста соответствует условие $i_o \frac{di_o}{dt} > 0$, а ветви снижения – условие $i_o \frac{di_o}{dt} < 0$.

Каждый из этих участков имеет линейный отрезок (0-1 и 3-0) и нелинейную кривую (1-2 и 2-3). Напряжение дуги на линейных отрезках равняется

$$u_o = i_o R_{np}, \quad u_o = i_o R_{обр}, \quad (2.326)$$

где R_{np} и $R_{обр}$ – сопротивления дуги на линейных отрезках участка увеличения (прямого участка) и участка уменьшения (обратный участок) соответственно.

Кривая 1-2 характеризует интенсивное горение дуги. По форме она соответствует гиперболе [43]. Если принять, что при возрастании тока

дуговое переходит в металлическое замыкание, то это означает, что на дуговом промежутке напряжение асимптотически стремится к нулю, что также характеризуется гиперболической зависимостью.

С учетом этих выводов для кривой 1-2 используем гиперболическую модель. Примем, что горизонтальной асимптотой является прямая

$$u_{\partial} = u_{ocm}, \quad (2.327)$$

где u_{ocm} – остаточное напряжение на дуговом промежутке при неограниченном увеличении тока, которое в общем случае и для лучшего описания кривой примем отличным от нуля.

Проведем аналогичным образом вертикальную асимптоту $i_{\partial} = i_{ocm}$.

Точка 1 имеет координаты $(i_{\partial 1}, u_{\partial 1})$.

Таким образом, для кривой 1-2 имеем окончательное уравнение

$$u_{\partial} = u_{ocm} + (u_{\partial 1} - u_{ocm}) \frac{i_{\partial 1} - i_{ocm}}{i_{\partial} - i_{ocm}}. \quad (2.327)$$

Предположим, что при переходе с участка увеличения на участок уменьшения напряжение и ток не меняются. Тогда кривая участка уменьшения начинается в точке 2 с координатами $(i_{\partial 2}, u_{\partial 2})$ и оканчивается в точке 3 с координатами $(i_{\partial 3}, u_{\partial 3})$. Нелинейность кривой 2-3 выглядит слабее, чем на кривой 1-2, поэтому используем для нее параболическую модель, являющуюся более простой. Первоначально при переходе на участок снижения скорость увеличения напряжения минимальна и близка к нулю [43]. А значит примем, что точка 2 будет точкой минимума параболы, характеризующей кривую 2-3. При этом для кривой 2-3 справедливо выражение

$$u_{\partial} = u_{\partial 2} + (u_{\partial 3} - u_{\partial 2}) \frac{(i_{\partial} - i_{\partial 2})^2}{(i_{\partial 3} - i_{\partial 2})^2}. \quad (2.328)$$

Окончательно математическая модель дуги принимает вид:

$$u_{\partial} = \begin{cases} i_{\partial} R_{np}, & i_{\partial} \frac{di_{\partial}}{dt} > 0, \quad |i_{\partial}| < i_{\partial 1}, \\ u_{ocm} + (u_{\partial 1} - u_{ocm}) \frac{i_{\partial 1} - i_{ocm}}{i_{\partial} - i_{ocm}}, & \frac{di_{\partial}}{dt} > 0, \quad i_{\partial} \geq i_{\partial 1}, \\ -u_{ocm} + (u_{\partial 1} - u_{ocm}) \frac{i_{\partial 1} - i_{ocm}}{i_{\partial} + i_{ocm}}, & \frac{di_{\partial}}{dt} < 0, \quad i_{\partial} \leq -i_{\partial 1}, \\ u_{\partial 2+} + (u_{\partial 3} - u_{\partial 2+}) \frac{(i_{\partial} - i_{\partial 2+})^2}{(i_{\partial 3} - i_{\partial 2+})^2}, & \frac{di_{\partial}}{dt} < 0, \quad i_{\partial} \geq i_{\partial 3}, \\ u_{\partial 2-} - (u_{\partial 3} + u_{\partial 2-}) \frac{(i_{\partial} - i_{\partial 2-})^2}{(i_{\partial 3} + i_{\partial 2-})^2}, & \frac{di_{\partial}}{dt} > 0, \quad i_{\partial} \leq -i_{\partial 3}, \\ i_{\partial} R_{обп}, & i_{\partial} \frac{di_{\partial}}{dt} < 0, \quad |i_{\partial}| < i_{\partial 3}, \end{cases} \quad (2.329)$$

где $i_{\partial 1} = \frac{u_{\partial 1}}{R_{np}}$; $i_{\partial 3} = \frac{u_{\partial 3}}{R_{обп}}$;

$i_{\partial 2+}$ – положительный ток дуги в момент перехода производной $\frac{di_{\partial}}{dt}$ через ноль от положительных значений к отрицательным (точка 2 в первом квадранте);

$i_{\partial 2-}$ – отрицательный ток дуги в момент перехода производной $\frac{di_{\partial}}{dt}$ через ноль от отрицательных значений к положительным (аналог точки 2 в третьем квадранте); значения $u_{\partial 2+}$ и $u_{\partial 2-}$ определяются по второму и третьему уравнениям (1.110) соответственно через токи $i_{\partial 2+}$ и $i_{\partial 2-}$.

Исходными величинами для модели дуги являются: R_{np} , $R_{обп}$, $u_{\partial 1}$, $u_{\partial 3}$, i_{ocm} , u_{ocm} .

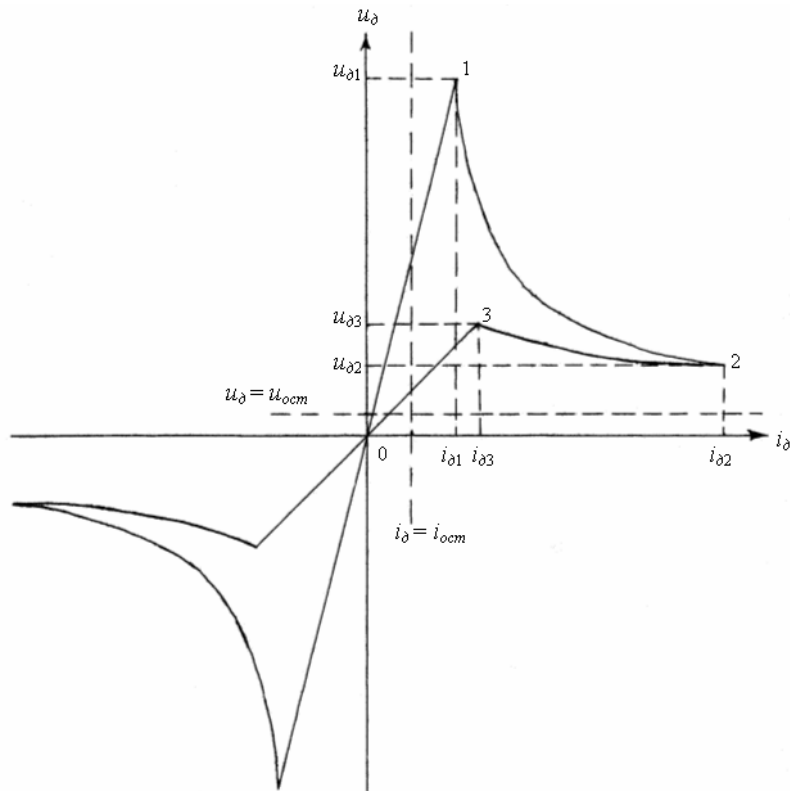


Рисунок 2.11 – Вольт-амперная характеристика дуги

2.7 Выводы по второй главе

На основе теории расчетов и анализа режимов работы электрических сетей, разработана математическая модель электрической сети напряжением 35 кВ в режиме ОЗЗ, учитывающая взаимные индуктивности и емкости (фазные и междуфазные), определенные с учетом несимметрии линии, а также положение точки замыкания. Емкости определены с использованием метода зеркальных отображений.

Математическая модель позволяет также определять емкостные токи линии и перенапряжения в ходе решения дифференциальных уравнений и рассчитывать электрические сети при заданных параметрах.

Специфическим свойством наличия естественной несимметрии обладают сети 35 кВ с воздушными линиями, учет которой более точно характеризует электромагнитные процессы, возникающие при ОЗЗ, а также

позволяет уточнить начальные условия, например, величина напряжения смещения нейтрали не будет равной нулю.

Разработана математическая модель для определения начальных условий, которая включает систему уравнений установившегося режима сети до появления ОЗЗ и также учитывает несимметрию сети. В ее основе лежит метод фазных координат. Данной моделью можно воспользоваться при определении (проверке) допустимой расстройке ДГР по напряжению смещения нейтрали в нормальном режиме сети.

В основе математической модели настройки ДГР используется определение емкостей линии с помощью обращения матрицы потенциальных коэффициентов.

Разработанная модель для расчета режима ОЗЗ может применяться при металлическом замыкании и замыкании через линейное переходное сопротивление. Если имеется дуговое замыкание, то в представленной модели добавятся уравнения математической модели дуги, представляющей аппроксимацию ее вольт-амперной характеристики с учетом гистерезиса посредством кривых второго порядка (гиперболы и параболы).

3 РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДУГОГАСЯЩИМ РЕАКТОРОМ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПАКЕТНОГО ВЕЙВЛЕТ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

3.1 Теоретические основы вейвлет преобразования. Методы пакетного вейвлет преобразования для анализа режима работы электрических сетей

Для гармонического анализа сложных динамических процессов в физике, математике и ряде инженерных направлений в последние десятилетия вся чаще находит применение математический аппарат вейвлет преобразования (ВП). В электроэнергетике вейвлет преобразование применяется для анализа показателей качества электроэнергии, исследования переходных процессов, построения алгоритмов релейной защиты и автоматики, диагностике электрооборудования и др.

В научно-технической литературе принято различать непрерывное (3.1), дискретное (3.2) и пакетное ВП [84]:

$$\hat{F}(a,b) = |a|^{-1/2} \int f(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt, \quad (3.1)$$

$$\hat{F}_{m,n} = a_0^{-m/2} \int f(t) \psi(a_0^{-m}t - nb_0) dt. \quad (3.2)$$

где $\psi_{j,k}(t)$ – функция материнского вейвлета. Формула (3.2) получается из (3.1), если учесть, что a и b принимают только дискретные значения: $a = a_0^m$, $b = nb_0 a_0^m$, а $m, n \in Z$.

Для восстановления (реконструкции) исходного сигнала необходимо применить обратное вейвлет преобразование, которое может быть выполнено по формуле [84, с.187]:

$$f(t) = C_{\psi}^{-1} \iint \hat{F}(a, b) \psi_{ab}(t) \frac{dad b}{a^2}. \quad (3.3)$$

Для вейвлет преобразования действителен аналог равенства Парсеваля, из которого следует, что полная энергия исследуемой функции напряжения u (тока i , мгновенной мощности p) может быть рассчитана через амплитуды вейвлет коэффициентов [84]:

$$E_u = \int u^2(t) dt = C_{\psi}^{-1} \iint V^2(a, b) \frac{dad b}{a^2}. \quad (3.4)$$

Непрерывное вейвлет преобразование является избыточным по своей структуре и для решения прикладных задач, например для развития технологии «цифровая подстанция» или «умные сети» может оказаться не применимым. С учетом постепенного внедрения в электроэнергетику цифровых измерительных приборов с достаточной частотой дискретизации, наиболее перспективным, в настоящей работе, представляются алгоритмы дискретного и пакетного вейвлет преобразования.

В соответствии с теорией дискретного вейвлет преобразования, любой дискретный сигнал тока или напряжения может быть представлен в виде суммы аппроксимирующих и детализирующих коэффициентов:

$$i(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} i_{j,k}^A \varphi_{j,k}(t) + \sum_{j=J}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} i_{j,k}^D \psi_{j,k}(t). \quad (3.5)$$

Алгоритмы вейвлет преобразования строятся на основе кратномасштабного анализа. Кратномасштабный (мультиразрешающий) анализ формулируется на основании трех положений [9, с. 142]:

1) последовательность $(V_j \mid j \in \mathbb{Z})$ замкнутых подпространств L^2 , которые упорядочены по включению:

$$\dots \subset V_2 \subset V_1 \subset V_0 \subset \dots \subset V_j \subset V_{j-1} \subset \dots \subset L^2, \quad (3.6)$$

при выполнении следующих условий: [9, с. 143]:

$$\bigcap_j V_j = \{0\}. \quad (3.7)$$

$$\overline{\bigcup_j V_j} = L^2; \quad (3.8)$$

2) связь подпространств V_j друг с другом осуществляется в соответствии с жестким масштабирующим свойством:

$$V_{j+1} = D_2(V_j) \quad \forall j \in Z; \quad (3.9)$$

3) существует такая масштабирующая функция, что её сдвиги $(\varphi(t-k)|k \in Z)$ образуют ортонормированный базис V_0 [9].

Для решения практических задач гармонического анализа режимов работы электрических сетей может быть применено дискретное вейвлет преобразование.

Если 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 формуле (3.10).

$$\begin{bmatrix} h_0 & h_1 & 0 & 0 & \dots & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & h_0 & h_1 & \dots & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & \dots & h_0 & h_1 \\ g_0 & g_1 & 0 & 0 & \dots & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & g_0 & g_1 & \dots & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & \dots & g_0 & g_1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} u_0 \\ u_1 \\ u_2 \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ u_{n-1} \\ u_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{j,0}^A \\ u_{j,1}^A \\ \dots \\ u_{j,n/2}^A \\ u_{j,0}^D \\ u_{j,1}^D \\ \dots \\ u_{j,n/2}^D \end{bmatrix}. \quad (3.10)$$

Обратное ВП (реконструкцию сигнала), последовательности коэффициентов напряжения нулевой последовательности преобразуются в единый дискретный сигнал – функцию мгновенного напряжения. Количество

элементов в матрице напряжения после реконструкции соответствует количеству элементов в матрице напряжений n .

$$\begin{pmatrix} H_0 & 0 & \dots & 0 & G_0 & 0 & \dots & 0 \\ H_1 & 0 & \dots & 0 & G_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & H_0 & \dots & 0 & 0 & G_0 & \dots & 0 \\ 0 & H_1 & \dots & 0 & 0 & G_1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & H_0 & 0 & 0 & \dots & G_0 \\ 0 & 0 & \dots & H_1 & 0 & 0 & \dots & G_1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} u_{Aj,0}^A \\ u_{Aj,1}^A \\ \dots \\ u_{Aj,n/2}^A \\ u_{Aj,0}^D \\ u_{Aj,1}^D \\ \dots \\ u_{Aj,n/2}^D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_0 \\ u_1 \\ u_2 \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ u_{n-1} \\ u_n \end{pmatrix}. \quad (3.11)$$

Для вейвлет преобразования характерна возможность определения энергии спектра локальной полосы частот. Локальная энергия спектра вейвлет коэффициентов j -го уровня разложения, представляющих собой вектор-строки из k элементов может быть определена по формулам:

$$\begin{aligned} E_{j,k}^A &= \sum_{k=-\infty}^{\infty} \left(i_{j,k}^A \varphi_{j,k}(t) \right)^2, \\ E_{j,k}^D &= \sum_{k=-\infty}^{\infty} \left(i_{j,k}^D \psi_{j,k}(t) \right)^2. \end{aligned} \quad (3.12)$$

Суммарная энергия спектра должна определяться по формуле:

$$E_{\Sigma} = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \left| i_{j,k}^A \right|^2 + \sum_{j=J}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \left| i_{j,k}^D \right|^2. \quad (3.13)$$

Оценивая локальную энергию спектра по заданной полосе частот, имеем возможность определить присутствие той или иной гармонической компоненты (частоты). При стремящемся к нулю значении локальной энергии спектра исследуемого частотного диапазона для сокращения объема вычислительных операций соответствующий узел вейвлет разложения может быть удален из расчета без потери точности.

Дискретное вейвлет преобразование не подразумевает дальнейшего разложения детализирующих вейвлет коэффициентов, в результате чего,

дерево дискретного вейвлет разложения (рисунок 3.1) получается «однобоким». Распределение частот, в этом случае не является равномерным.

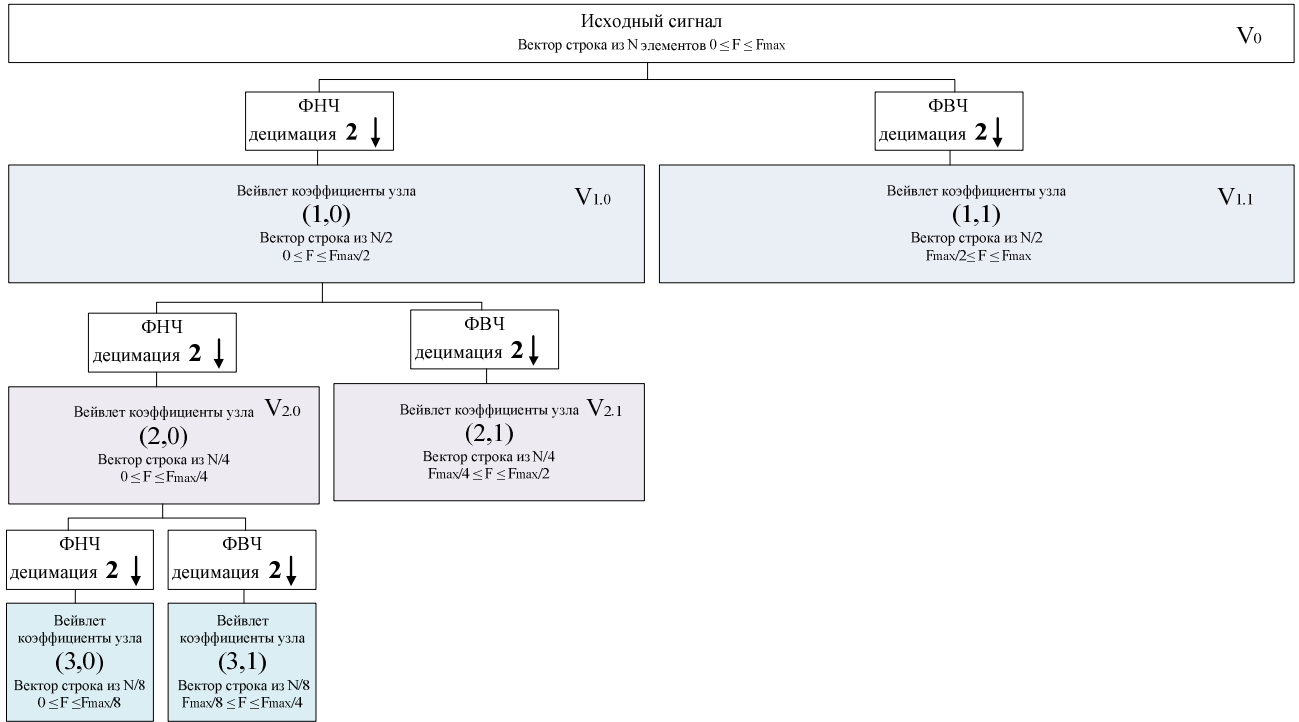


Рисунок 3.1 – Схема дискретного вейвлет преобразования

Для обеспечения равномерной локализации частот исследуемого сигнала следует применять пакетное вейвлет преобразование выполняемое по схеме, представленной на рисунке 3.2. При разложении сигнала до третьего уровня получаем:

$$V_0 = V_{2,0} \oplus V_{2,1} \oplus V_{2,2} \oplus V_{2,3}, \quad (3.14)$$

$$V_0 = V_{3,0} \oplus V_{3,1} \oplus V_{3,2} \oplus V_{3,3} \oplus V_{3,4} \oplus V_{3,5} \oplus V_{3,6} \oplus V_{3,7}. \quad (3.15)$$

В результате пакетного вейвлет преобразования напряжение и ток контура нулевой последовательности могут быть представлены коэффициентами, полученными в результате пакетного вейвлет разложения:

$$i_0(t) = \sum_{2^{-j}nm}^{2^{-j}n(m+1)-1} i_{j,m}(k) \cdot \psi(t) \quad (3.16)$$

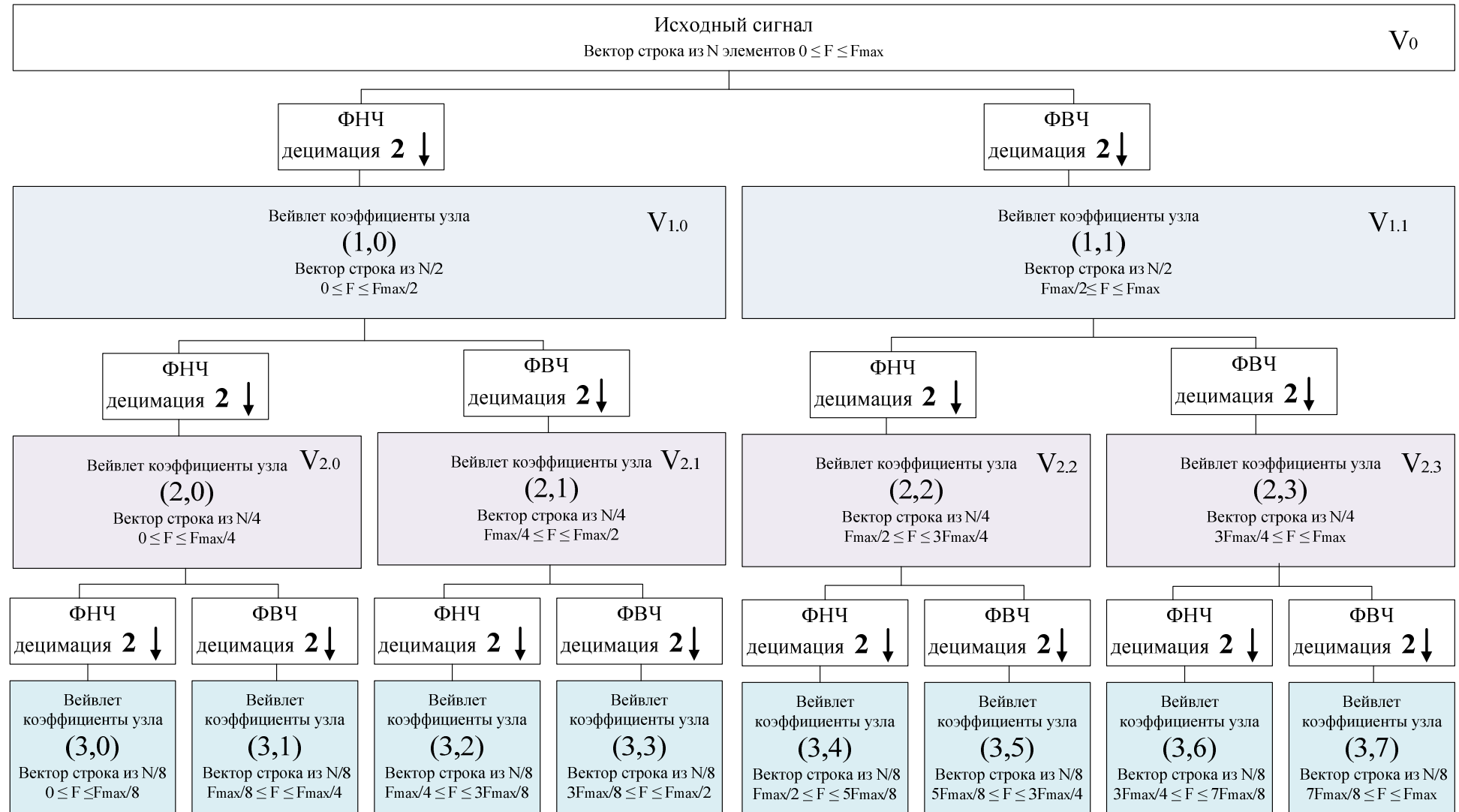


Рисунок 3.2 – Схема пакетного вейвлет разложения

$$u_0(t) = \sum_{2^{-j}nm}^{2^{-j}n(m+1)-1} u_{j,m}(k) \cdot \psi(k) \quad (3.17)$$

Для дальнейшей разработки алгоритма управления дугогасящим реактором необходимо будет выделить сигнал напряжения контура нулевой последовательности.

Как известно, при наличии искажающих нагрузок, данный сигнал напряжения может быть значительно перегружен высшими гармониками. Возникает дополнительная задача частотной фильтрации напряжения. В свою очередь, частота собственных колебаний напряжения контура нулевой последовательности при различных степенях расстройки реактора может находиться в частотном диапазоне от 0 до 100 Гц. Таким образом, для дальнейшей разработки алгоритма управления реактора необходимо произвести цифровую фильтрацию сигнала напряжения, выделив при этом конкретный частотный диапазон.

Учитывая вышеизложенное, примем математический аппарат вейвлет преобразования в качестве основного инструмента для определения частоты свободных колебаний напряжения контура нулевой последовательности.

3.2 Принципиальная схема и алгоритм системы управления

Анализ способов автоматической настройки компенсации емкостных токов, описанных в п. 1.3, позволяет сделать вывод, что наиболее оптимальным для реализации в распределительных сетях 6-35 кВ является совместное использования двух способов: по экстремальным (амплитуде напряжения смещения нейтрали) и частотным характеристикам (по частоте свободных колебаний контура нулевой последовательности).

Данный подход в реализации системы управления ДГР можно увидеть в современных разработках ведущих специалистов в данной области, таких как ООО "Бреслер" [35, 65, 69], ООО "Микроинжиниринг" [50] и других производителей [27].

Принципиальная схема системы управления, реализованная на основе двух способов, представлена на рисунке 3.3.

Выбор способа, который реализует алгоритм, осуществляется блоком выбора (оператором) по следующим принципам:

по частоте свободных колебаний в контуре нулевой последовательности производится предварительная настройка ДГР в нормальном режиме в электрических сетях, где смещение нейтрали не превышает допустимого значения. В сетях с высоким уровнем напряжения нейтрали настройка производится в режиме замыкания на землю. Для реализации частотного метода в схеме предусмотрен генератор импульса искусственного возмущения.

Экстремальный принцип реализуется при работе в распределительных сетях, характеризующихся низкой или высокой несимметрией (например, в воздушных сетях 35 кВ), при отсутствии замыкания на землю. Кроме того, по экстремальному способу осуществляется подстройка ДГР в рабочем режиме.

На схеме (рисунок 3.3) представлен плунжерный ДГР с трансформатором тока ТТ в цепи силовой обмотки ДГР.

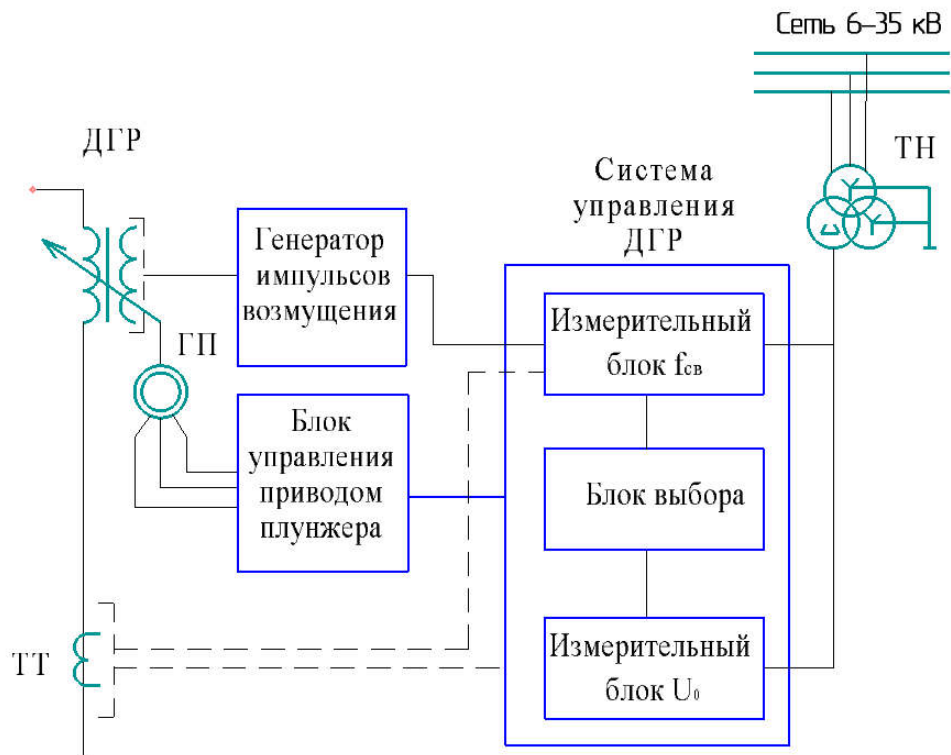


Рисунок 3.3 – Принципиальная схема системы управления

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 [65, 69].

Блок схема алгоритма системы управления ДГР представлена на рисунке 3.4.

Алгоритм автоматической настройки дугогасящего реактора в распределительных сетях 6-35 кВ с выделением свободной составляющей в КНП реализован в блоках 4-21. На данный алгоритм получено свидетельство о регистрации электронного ресурса (Приложение В).

В качестве инструмента для обработки регистрируемых данных кривой напряжения КНП во временной области, выделяя из них данные свободной составляющей переходного процесса, для определения частоты собственных колебаний, характеризующей степень настройки регулируемого контура, может быть использован вейвлет-анализ [98, 103].

Инструмент вейвлет-анализа в последнее время находит все более широкое применение для решения актуальных задач электроэнергетики, включающих анализ переходных процессов, прогнозирование нагрузки, электрические измерения, анализ качества электроэнергии, релейную защиту, диагностику электрооборудования, интернет-коммерцию электроэнергии [9, 24, 28].

ВП одномерного сигнала – это его представление в виде обобщенного ряда или интеграла Фурье по системе базисных функций, собранных из исходного вейвлета $\psi_{00}(t)$, имеющий свойства хорошей локализации по времени за счет операций сдвига во времени k и изменения временного масштаба 2^j [17, 101, 108]:

$$\psi_{jk}(t) = 2^{\frac{j}{2}} \psi_{00}(2^j t - k) \quad (2.330)$$

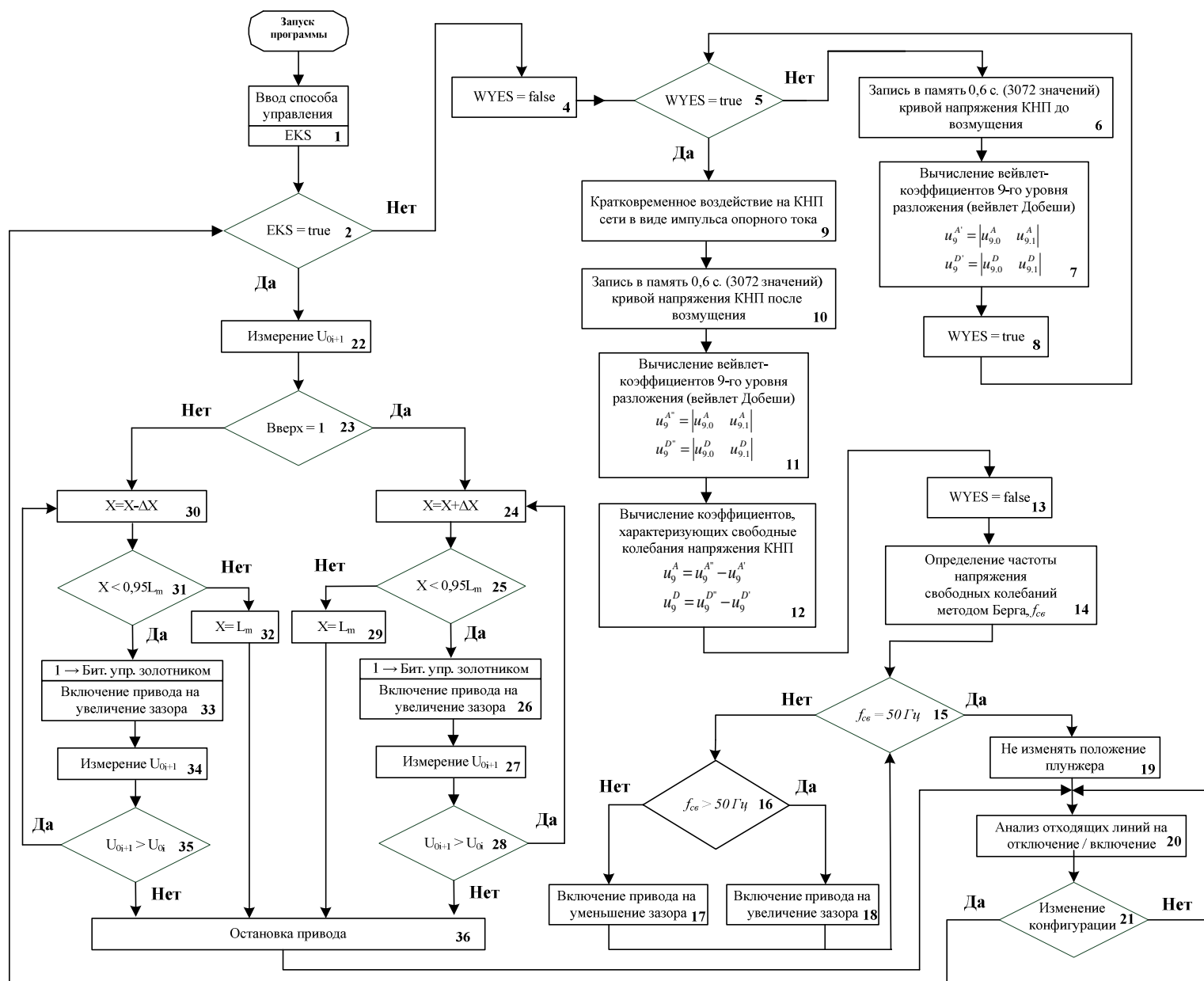


Рисунок 3.4 – Блок-схема алгоритма системы управления ДГР

ВП, основой которого является степень двойки называется диадным ВП. Для диадного ВП создан пирамидальный алгоритм вычислений схожий с быстрым преобразованием Фурье, что позволяет применять его при анализе массивов цифровых данных [3, 107].

Выполнение пошаговых действий по алгоритму [5, 22, 30]:

1. Запись в память кривой напряжения КНП продолжительностью 0,6 секунды (3072 значения).

2. Определение вейвлет коэффициентов 9-го уровня разложения из фрагмента напряжения до управляющего воздействия [55, 56]. Обозначение коэффициентов представим с индексом «'» (штрих):

$$u_9^{A'} = \begin{vmatrix} u_{9,0}^A & u_{9,1}^A \end{vmatrix} \quad (2.331)$$

$$u_9^{D'} = \begin{vmatrix} u_{9,0}^D & u_{9,1}^D \end{vmatrix} \quad (2.332)$$

3. Выполним кратковременной воздействие опорного тока в КНП для создания переходного процесса.

4. Запись в память кривой напряжения КНП длительностью 0,6 секунд (3072 значения).

5. Определение вейвлет коэффициентов 9-го уровня разложения из фрагмента напряжения после управляющего воздействия. Обозначение коэффициентов представим с индексом «''» (два штриха):

$$u_9^{A''} = \begin{vmatrix} u_{9,0}^A & u_{9,1}^A \end{vmatrix} \quad (2.333)$$

$$u_9^{D''} = \begin{vmatrix} u_{9,0}^D & u_{9,1}^D \end{vmatrix} \quad (2.334)$$

6. Коэффициенты, характеризующие свободные колебания напряжения КНП определяются через разность:

$$u_9^A = u_9^{A''} - u_9^{A'} \quad (2.335)$$

$$u_9^D = u_9^{D''} - u_9^{D'} \quad (2.336)$$

Искомая функция напряжения свободной составляющей контура нулевой последовательности в этом случае может быть записана через вейвлет коэффициенты [51, 112]:

$$u_{c6}(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} u_{J,k}^A \varphi_{J,k}(t) + \sum_{j=J}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} u_{j,k}^D \psi_{j,k}(t) \quad (2.337)$$

или с учётом, что в алгоритме используем только коэффициенты $u_9^D(k)$ и $u_9^A(k)$, на основании (2.335-2.336) формула (2.337) может быть переписана в виде:

$$u_{c6}(t) = u_{9,0}^A \varphi_{9,0} + u_{9,1}^A \varphi_{9,1} + u_{9,0}^D \psi_{9,0} + u_{9,1}^D \psi_{9,1} \quad (2.338)$$

7. Определение частоты напряжения свободных колебаний методом Берга.

По формуле (2.338) путем обратного вейвлет преобразования найдем напряжение свободных колебаний контура нулевой последовательности. В программе Matlab реализован расчет частоты свободной составляющей с целью подтверждения корректности работы алгоритма. На рисунке 3.5 приводится сопоставление вычисленного по алгоритму сигнала напряжения свободных колебаний с исходным значением, заданном при выполнении проверочного расчета.

Напряжение свободных колебаний контура нулевой последовательности представляет случайную величину. Поскольку для анализа случайных процессов классическое преобразование Фурье не применимо, то для оценки частоты свободной составляющей можно воспользоваться одним из существующих методов спектрального анализа, разработанных для работы со случайными величинами [97].

Одним из наиболее известных алгоритмов авторегрессионного спектрального оценивания является алгоритм Берга. Для случайной величины корректной оценкой является спектральная плотность мощности (СПМ) [81].

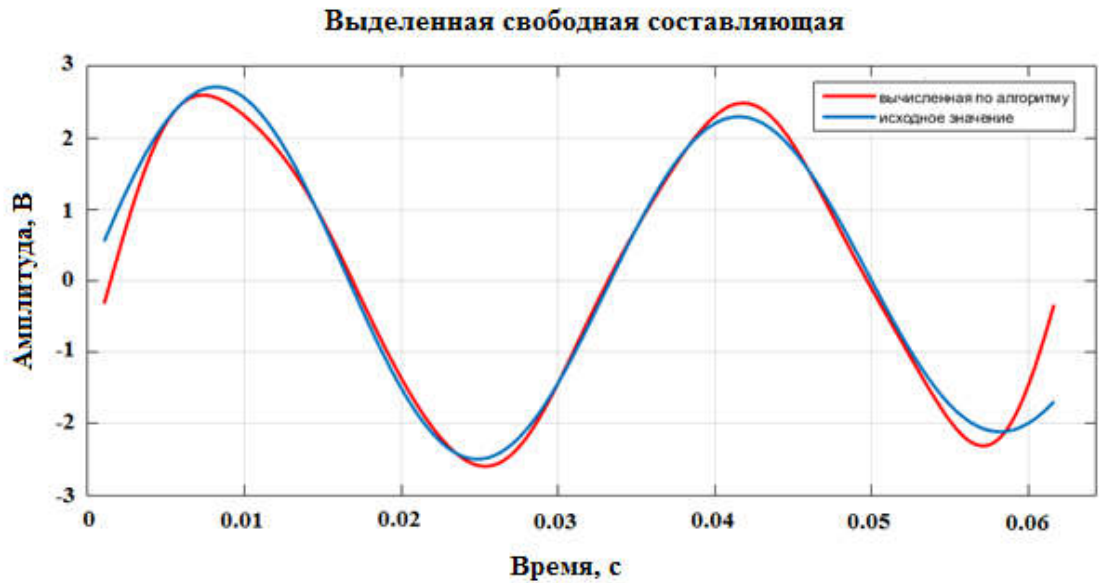


Рисунок 3.5 – Напряжение свободных колебаний контура нулевой последовательности

После обратного вейвлет-преобразования по выражению (11) будем иметь напряжение свободной составляющей контура нулевой последовательности, представленное посредством дискретных значений $[u_0, u_1, u_2, \dots, u_{n-1}]$ на интервале $T_k = (2N+1)T$, где $N \in \mathbb{Z}$ [98].

При применении авторегрессионной модели набор параметров системы называется вектором коэффициентов авторегрессии (АР).

Авторегрессионная модель СПМ порядка p имеет вид [33]:

$$X(\omega t) = \frac{\sigma_\omega^2}{\left| 1 + a_1 e^{-i\omega t_1} + a_2 e^{-i\omega t_2} + \dots + a_p e^{-i\omega t_p} \right|}, \quad (2.339)$$

где ω – частота дискретизации сигнала;

t – период дискретизации;

σ_ω^2 – дисперсия шума;

$a = [a_1 \dots a_p]$ – вектор коэффициентов авторегрессии.

Метод расчета коэффициентов авторегрессии Берга основан на вычислении коэффициентов АР последовательно, начиная с модели первого порядка, и

увеличивая порядок модели на каждой итерации, вплоть до максимального заданного порядка [25].

В алгоритме Берга используется оценка коэффициента отражения, определяемая по методу наименьших квадратов. При каждом значении порядка p в нем минимизируется среднее арифметическое мощности ошибок линейного предсказания вперед и назад (выборочная дисперсия ошибки предсказания) [39]:

$$P_p^{fb} = \frac{1}{2N} \left[\sum_{n=p+1}^N |e_p^f[n]|^2 + \sum_{n=p+1}^N |e_p^b[n]|^2 \right], \quad (2.340)$$

Ошибки линейного предсказания вперед и назад определяются соответственно коэффициентами [39]:

$$\begin{aligned} e_p^f(n) &= x(n) + \sum_{m=1}^p a_p^f(m) x(n-m), \\ e_p^b(n) &= x(n-p) + \sum_{m=1}^p a_p^{f*}(m) x(n+m-p) \end{aligned} \quad (2.341)$$

где x – входной сигнал, а – искомый вектор коэффициентов АР.

Подставив в выражение (2.341) значение $a_p(n)$ из выражения связи между АР-параметрами порядка p с параметрами порядка $p-1$ [81]:

$$a_p(n) = a_{p-1}(n) + k_p a_{p-1}^*(p-n), \quad 1 \leq n \leq p-1, \quad (2.342)$$

получаем рекурсивные соотношения, связывающие ошибки предсказания порядка p с параметрами порядка $p-1$, а также с начальными условиями $e_0^f(n) = e_0^b(n) = x(n)$:

$$\begin{aligned} e_p^f(n) &= e_{p-1}^f(n) + k_p e_{p-1}^b(n-1), \\ e_p^b(n) &= e_{p-1}^b(n) + k_p^* e_{p-1}^f(n). \end{aligned} \quad (2.343)$$

Функция P_p^{fb} является функцией только одного параметра комплексного коэффициента отражения K_p . Приравнивая комплексную производную от P_p^{fb} к нулю

$$\frac{dP_p^{fb}}{d \operatorname{Re}\{K_p\}} + j \frac{dP_p^{fb}}{d \operatorname{Im}\{K_p\}} = 0, \quad (2.344)$$

и решая полученное уравнение относительно K_p , получаем выражение для коэффициентов отражения [97]:

$$K_p = \frac{-2 \sum_{n=p+1}^N e_{p-1}^f[n] e_{p-1}^{b*}[n-1]}{\sum_{n=p+1}^N |e_{p-1}^f[n]|^2 + \sum_{n=p+1}^N |e_{p-1}^b[n-1]|^2}, \quad (2.346)$$

Для получения АР-коэффициента для модели следующего порядка используется рекурсивный алгоритм Левинсона [33]:

$$\begin{aligned} a_{11} &= K_1, \\ a_{m,p} &= a_{m,p-1} + K_m a_{m-1,p-1}^*, \\ a_{p,p} &= K_p. \end{aligned} \quad (2.347)$$

Рекурсивная процедура повторяется до нахождения всех АР-коэффициентов. В итоге, используя вектор авторегрессии, построим целевую функцию (СПМ), представленную на рисунке 3.6.

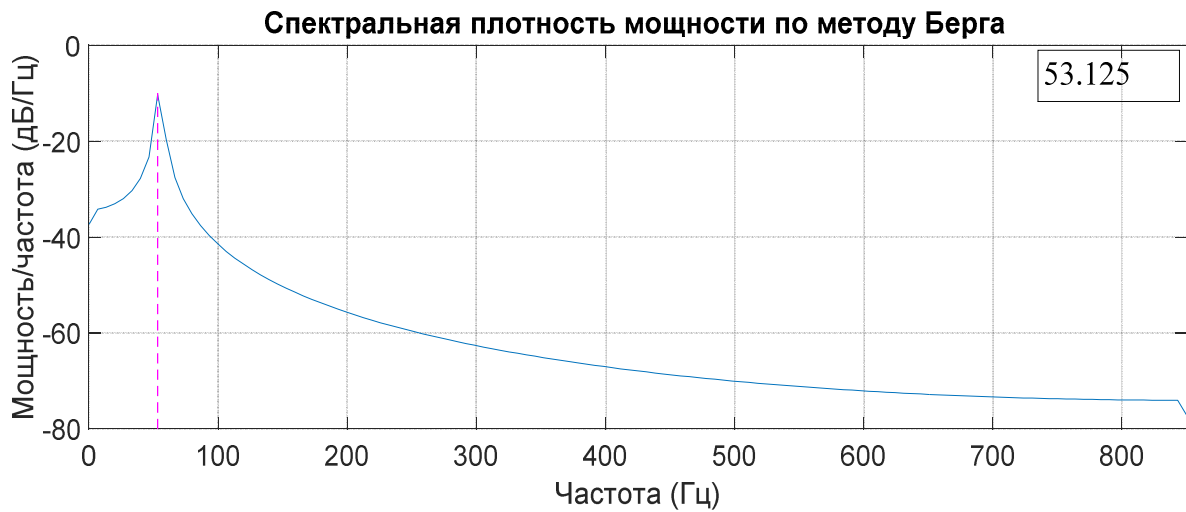


Рисунок 3.6 – Определение частоты напряжения свободных колебаний
по методу Берга

После определения частоты $f_{св}$ происходит ее сравнение с основной частотой.

8. Если частота свободных колебаний КНП равна 50 Гц, то изменять индуктивность дугогасящего реактора не требуется.

9. В случае если частота $f_{св}$ меньше 50 Гц, то необходимо уменьшить воздушный зазор дугогасящего реактора, чтобы увеличить его индуктивность.

10. В ином случае – необходимо увеличить воздушный зазор для уменьшения индуктивности дугогасящего реактора.

В дальнейшем производится мониторинг изменения конфигурации сети (наличия включения или отключения линий), в случае возникновения коммутации производится выбор способа управления ДГР и алгоритм повторяется.

На этапе подстройки ДГР на заданный режим компенсации ПО работает по экстремальному способу в соответствии с блоками 22-36 (рисунок 3.4). Запускаем программу и после ввода способа управления и логического блока (2) выполняется измерение U_{oi} (блок 22). После этого выполняется сопоставление заданной функции со значением, присвоенным программой по окончании выполнения блок-схемы на рисунке 3.7 (блок 23). При выполнении условия производится увеличение величины координаты X (блок 24). Вместе с этим выполняется оценка положения плунжера в данный момент: происходит сравнение величины координаты X со значением $0,95l_m$ (блок 25). Если это условие не выполняется, то плунжер находится в крайне верхнем положении и дальнейшее его поднятие недопустимо. В такой ситуации работа по настройке ДГР будет остановлена (29 и 36 блоки). При выполнении условия (25 блок) следует команда приводу увеличить зазор (26 блок). Вместе с этим постоянно выполняется измерение (блок 27) и сравнение (блок 28) величин напряжения смещения нейтрали. Зазор будет увеличиваться, пока условия блоков 25 и 28 выполняются. Невыполнение условия блока 28 говорит о настройке ДГР близко к резонансу, при этом перемещение плунжера останавливается.

Процесс уменьшения величины зазора происходит аналогичным образом в соответствии с блоками 23-35.

На рисунке 3.7 представлен алгоритм определения направления движения плунжера. После пуска программы выполняется определение положения плунжера с целью дальнейшей настройки ДГР на требуемый уровень компенсации. Входными параметрами являются сигнал с датчика положения плунжера и величина напряжения смещения нейтрали U_{0i} от трансформатора напряжения. Определять направление изменения величины X (координата положения плунжера) нужно для того, чтобы при подключении ДГР к сети система управления понимала текущее направление движения плунжера и могла правильно его перемещать, не приводя к повышенным механическим нагрузкам на привод или ДГР. В качестве базовой величины при определении начального направления перемещения плунжера принята $0,5 l_m$, т.е. половина величины максимального зазора между подвижной и неподвижной частями плунжера, что обеспечит безопасное перемещение плунжера в любом направлении в начальный момент.

Таким образом, программа выполняет работу в соответствии с блок-схемой на рисунке 3.7. Производим запуск программы (1 блок), далее датчик положения определяет координату плунжера X (блок 2), после чего измеряется напряжение смещения нейтрали (блок 3). В блоке 4 происходит сравнение текущей координаты плунжера и значения $0,5l_m$. При величине координаты меньшей чем $0,5l_m$ плунжер начинает движение на увеличение значения координаты (блок 6). При этом принимается условное движение плунжера вверх ($X05=1$). При величине координаты большей чем $0,5l_m$ плунжер начинает движение на уменьшение значения координаты (блок 5). При этом принимается условное движение плунжера вниз ($X05=0$). Далее происходит измерение нового значения напряжения смещения нейтрали U_{0i+1} (блок 7) и сравнение его с предыдущей величиной (блок 8). После чего выполняется анализ правильности осуществленного выбора при определении направления изменения X (блоки 9-

10), функциям присваиваются соответствующие значения (блоки 11-14) и работа завершается (блок 15).

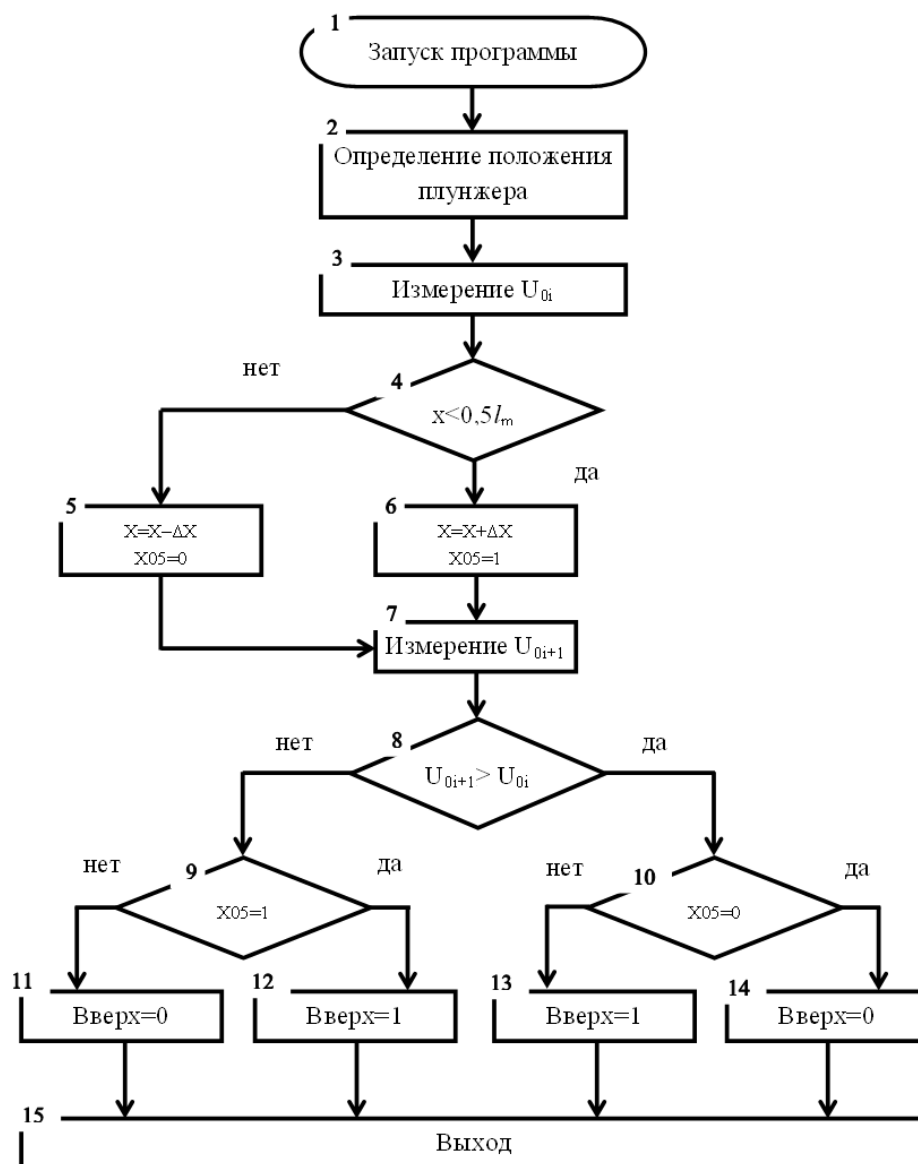


Рисунок 3.7 – Блок-схема алгоритма системы управления ДГР.

«Определение направления движения плунжера».

Схема электрических соединений и подключений системы управления ДГР представлена в Приложении Г.

3.3 Имитационное моделирование распределительной сети с компенсированной нейтралью с управляемым ДГР

Имитационное моделирование переходных процессов, происходящих в электрических сетях, существенно облегчает задачи анализа режимов и позволяет получить практически достоверную картину изменения токов и напряжений в элементах сети при различных начальных условиях [10].

Исследование параметров сети, происходящих при появлении ОЗЗ, проводилось на подстанции “Шербакульская” 110/35/10 кВ, однолинейная схема которой приведена на рисунке 3.8.

Составлена схема замещения подстанции с параметрами установленного на ней электрооборудования. В схему замещения вошли: в качестве источника питания трансформатор ТДТН-10000/110, трансформатор напряжения ЗНОМ-35, эквивалентная емкость присоединений и эквивалентная нагрузка. Значения эквивалентной емкости присоединений получены для реальных линий с применением метода зеркальных отображений, представленного в [8], а также на основе данных, используемых в [78]. Эквивалентная нагрузка представлена отходящими воздушными линиями.

Имитационная модель трехфазной распределительной сети с компенсированной нейтралью с системой управления ДГР реализована в приложении Simulink программного комплекса MATLAB (рисунок 3.9), позволяющему построить электрическую сеть требуемой конфигурации [77].

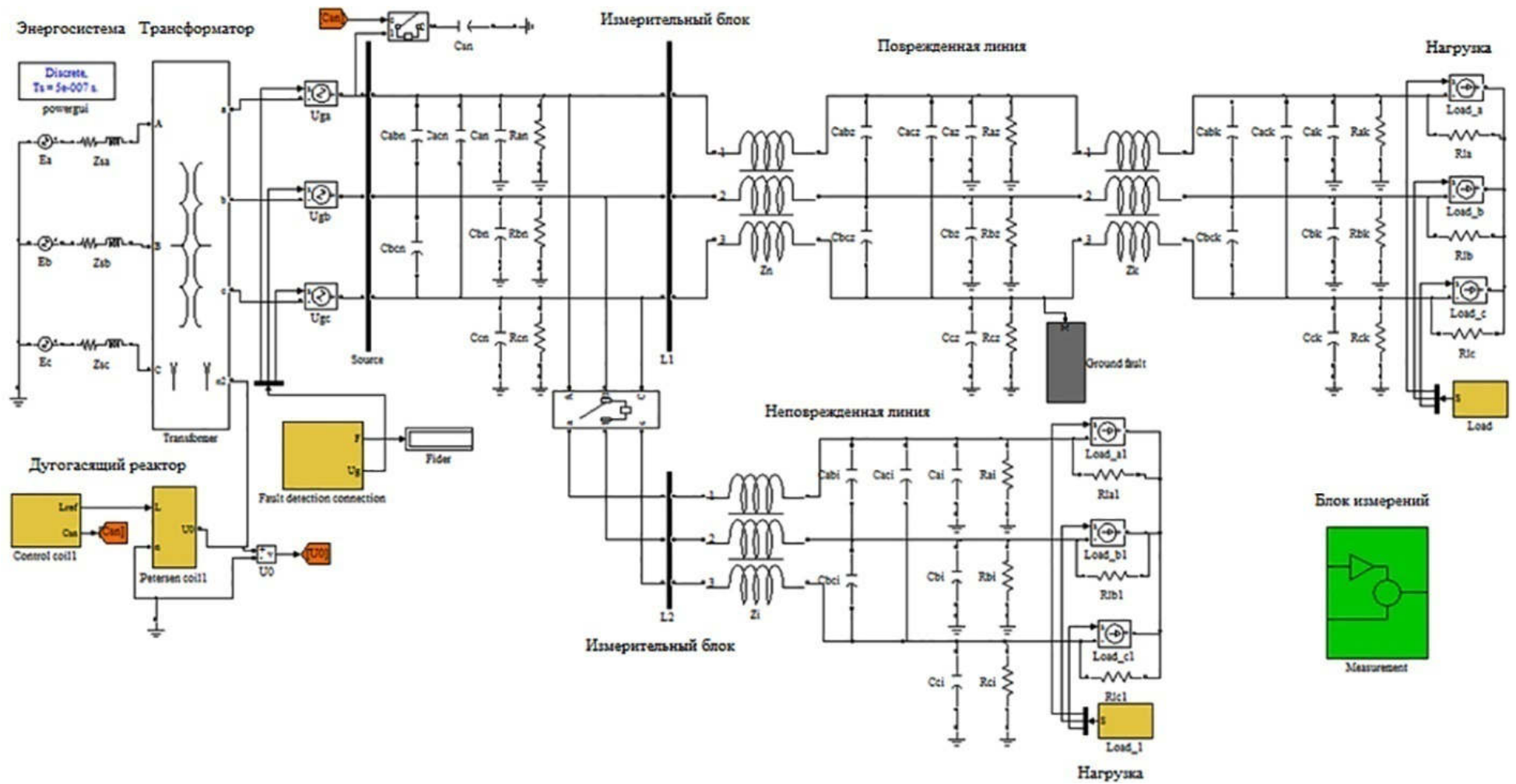


Рисунок 3.9 – Модель трёхфазной распределительной сети в среде MATLAB

Создание имитационной модели распределительной сети с компенсированной нейтралью совместно с системой управления ДГР решает следующие задачи:

- подтверждение основных теоретических положений при разработке системы управления дугогасящим реактором;
- оценка качества компенсации емкостных токов при различных возмущающих факторах – однофазном замыкании на землю [77].

Для моделирования трёхфазной распределительной сети в среде MATLAB использовались блоки из базы данных SimPowerSystems.

Параметры элементов распределительной сети определяются в соответствии с формулами, представленными в п.п. 2.2-2.3.

Для оценки эффективности работы системы автоподстройки дугогасящего реактора необходимо рассмотреть возможность изменения схемы распределительной сети (изменение емкости), а так же реализовать различные виды замыкания на землю. В данной модели это реализовано возможностью отключения неповрежденной линии в заданный момент времени с помощью блока трехфазного выключателя (Tree-PhaseBreaker) (рисунок 3.10), изменяя конфигурацию сети и ее суммарную емкость [95].

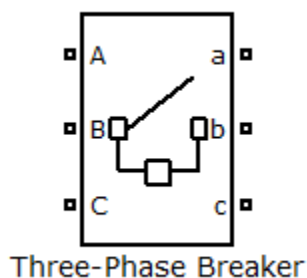


Рисунок 3.10 – Блок трехфазного выключателя (Tree-Phase Breaker)

В модели электрической сети изменение нагрузки реализуется посредством блоков управляемых источников тока (ControlledCurrentSource) и блока генерации формы тока нагрузки (Load) (рисунок 3.11). Данное решение позволяет моделировать несинусоидальную и несимметричную динамически

изменяющуюся во времени нагрузку, что позволит проверить работоспособность применяемого алгоритма при любых режимах нагрузки [95].

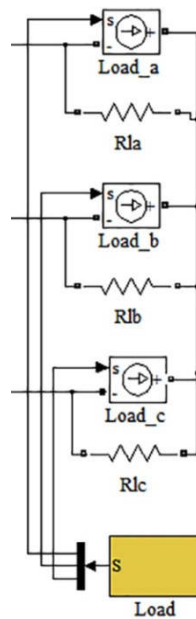


Рисунок 3.11 – Составной блок трёхфазной нагрузки

Работу ДГР моделирует составной блок Petersencoil, который реализует плавное изменение индуктивности ДГР в соответствии с действием системы управления, реализованной в разработанном блоке Controlcoil (рисунок 3.12).

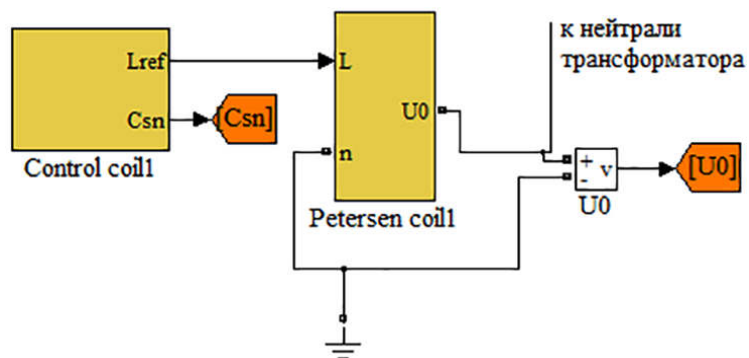


Рисунок 3.12 – Модель дугогасящего реактора (Petersencoil) и его системы управления (Controlcoil)

Модель ДГР выполнена с использованием управляемого источника тока. Система управления реактором выполнена в соответствии с разработанным алгоритмом, представленным в разделе 3. Принцип ее работы основан на

выделении свободной составляющей в контуре нулевой последовательности с целью подстройки индуктивности реактора путем изменения воздушного зазора.

Для проверки точности автоподстройки ДГР выполнено моделирование его работы в различных условиях. Для этого на имитационной модели были реализованы различные режимы работы при автоподстройке ДГР [77].

Во всех рассмотренных режимах распределительной сети система управления автоподстройки дугогасящего реактора работает корректно.

Картина изменения напряжения на эквивалентной нагрузке при однофазном замыкании представлена на рисунке 3.13.

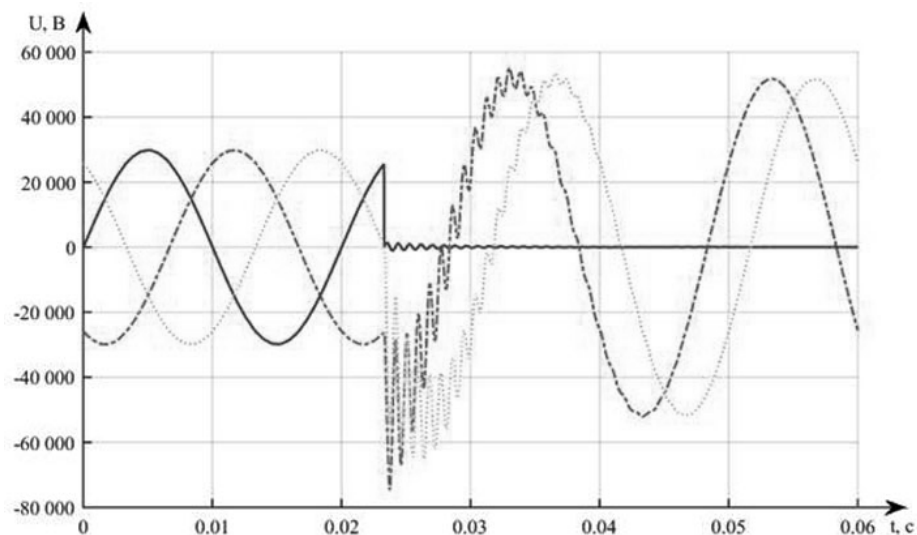


Рисунок 3.13 – Напряжения на эквивалентной нагрузке при ОЗЗ

Напряжение «здоровой» фазы на трансформаторе напряжения представлено на рисунке 3.14.

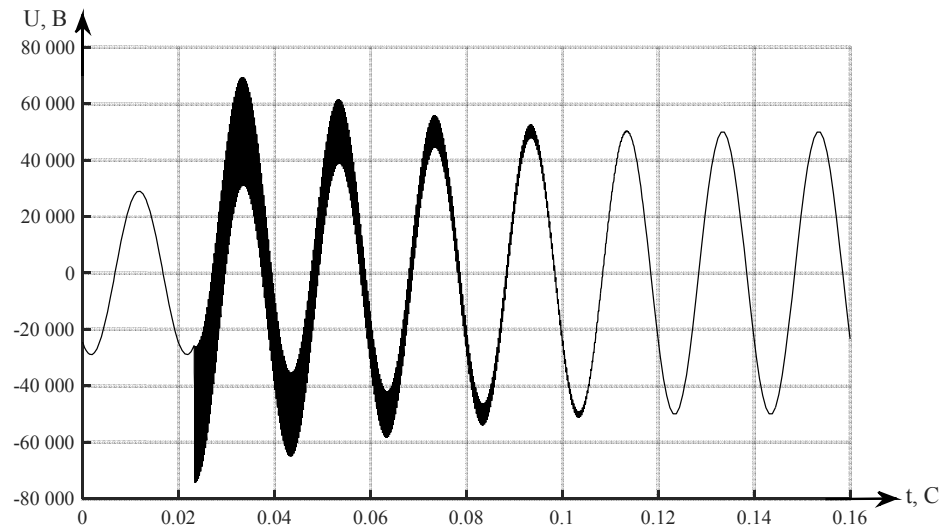


Рисунок 3.14 – Напряжения на трансформаторе напряжения при ОЗЗ

Напряжения на эквивалентной емкости присоединений при ОЗЗ представлены на рисунке 3.15.

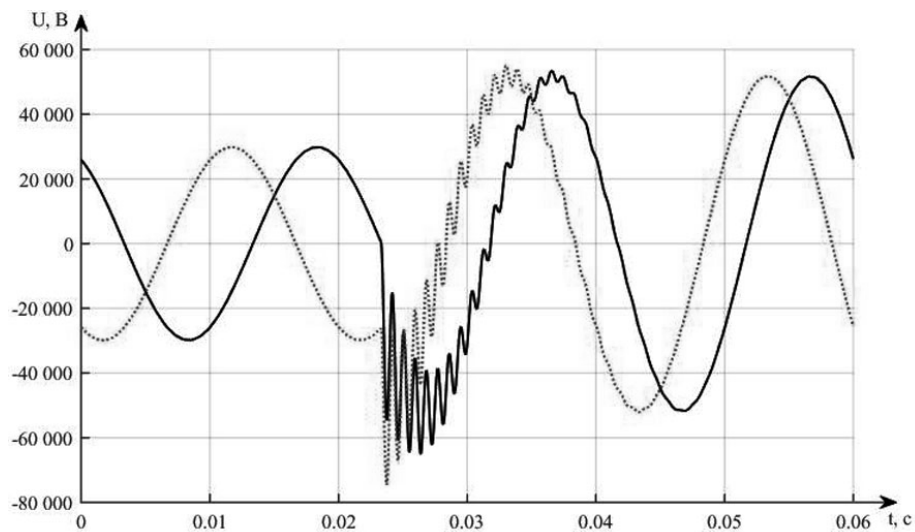


Рисунок 3.15 – Напряжения на емкости присоединений

Наблюдаемые биения напряжений могут являться причиной ложного срабатывания релейной защиты на подстанции и приводить к вынужденному отключению цепей управления. Возникающие перенапряжения при длительном воздействии и частом появлении сокращают срок службы трансформаторов напряжения, а также приводят к выходу их из работы [45, 53].

Емкостной ток электрической сети и ток реактора представлены на рисунке 3.16.

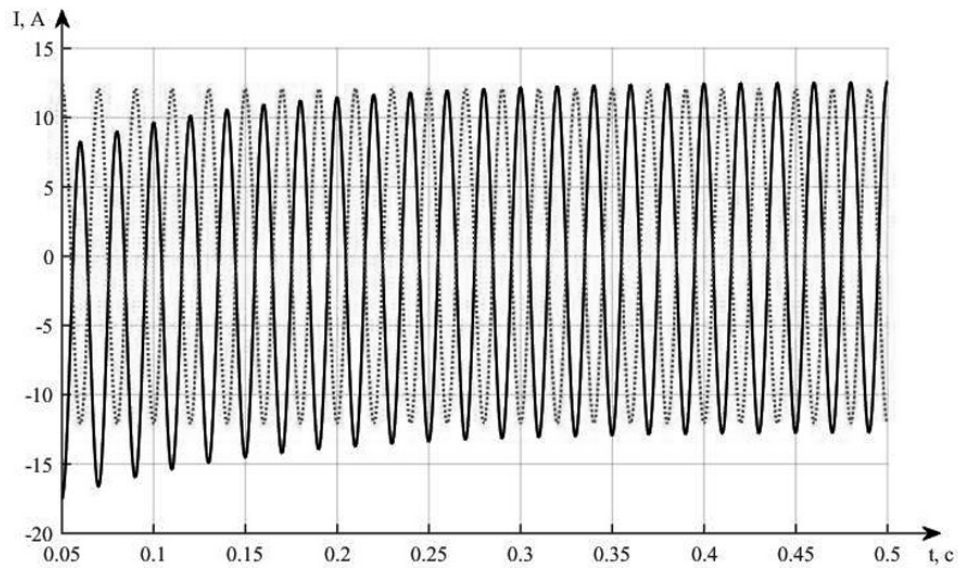


Рисунок 3.16 – Графики токов:

пунктирная линия – емкостной токи сети 35 кВ; сплошная линия – индуктивный ток реактора

На рисунке 3.16 видно, что емкостной ток электрической сети полностью компенсируется индуктивным током ДГР. В соответствии [47], настройка ДГР на фазную емкость может быть осуществлена с рассогласованием до 0,1, поэтому индуктивный тока немного превышает емкостной ток сети.

Таким образом, имитационное моделирование режимов работы электрических сетей позволяет достаточно наглядно представить переходные процессы, происходящие при однофазном замыкании на землю.

В распределительных сетях дефекты изоляции не приводят к ухудшению условий электроснабжения потребителей, но существующий дефект требует устранения, так как оборудование находится под повышенным напряжением, особенно, при дуговых замыканиях, достаточно длительное время, что представляет опасность для ослабленной изоляции электрооборудования [32].

3.4 Выводы по третьей главе

Разработанная система управления, использующая два способа настройки, позволяет производить настройку ДГР как по напряжению смещения нейтрали, так и по частоте свободных колебаний в КНП.

Диапазон, содержащий частоту свободных колебаний, был выделен из общего сигнала с помощью пакетного ВП. Высокочастотные компоненты и шумы при этом были отфильтрованы программным способом алгоритмами вейвлет-фильтрации.

В разработанной имитационной модели электрической сети с ДГР был реализован разработанный алгоритм системы автоподстройки дугогасящего реактора, который показал свою работоспособность в различных режимах работы электрической сети, в том числе при изменении величины и характера нагрузки. Разработанный алгоритм управления показал высокую точность автоподстройки ДГР, что говорит об эффективном его использовании при настройке плунжерных ДГР.

В дальнейшем применение имитационной модели позволит проводить апробацию различных технических решений при настройке ДГР без дорогостоящих и трудоемких реальных испытаний, что существенно повысит эффективность предлагаемых усовершенствований устройства управления ДГР.

4 РАЗРАБОТКА МАКЕТА ДУГОГАЯЩЕГО РЕАКТОРА

Разработка макета ДГР выполнена с учетом требований, представленных в данном разделе. Проектирование ДГР осуществлялось с учетом снижения технических потерь мощности в ДГР. При расчете конструкции магнитопровода и обмоток ДГР использованы современные методы расчета силового электрооборудования.

4.1 Требования к техническим характеристикам дугогасящего реактора

Требования к техническим характеристикам макета ДГР с регулируемым зазором (плунжерного) на 35 кВ:

- ✓ частота сети 50 Гц;
- ✓ номинальное фазное (линейное) напряжение $U_{\text{ном}} - 21(35)$ кВ;
- ✓ номинальный ток $I_{\text{ном}} - 20$ А;
- ✓ коридор непрерывного изменения величины от 2 до 24 А;
- ✓ напряжение испытания, более $3 \times U_{\text{ном}} - 65$ кВ;
- ✓ потери активной мощности при номинальных параметрах ДГР (напряжение, ток, частота напряжения), до 10 кВт;
- ✓ количество полюсов – 1;
- ✓ количество обмоток управления 200-500В – 1 шт.;
- ✓ количество измерительных обмоток 100В – 1 шт.;
- ✓ габариты готового изделия (высота, длина, ширина) – не более 2500 мм, 2000 мм, 2000 мм соответственно;
- ✓ Высота, длина, ширина магнитопровода, мм (не более) – 2000, 1600, 1200 соответственно;
- ✓ сечение ярма магнитопровода (центрального), мм – не более 150x150;
- ✓ сечение ярма магнитопровода (бокового), мм – не более 150x75;
- ✓ толщина пластины магнитопровода, мм – 0,15-0,3;
- ✓ материал и сечение обмотки – медь, 4-10 мм²;
- ✓ вид системы охлаждения – масляная, с естественной циркуляцией;

- ✓ конструктивные габариты электрогидропривода (длина, ширина, высота) не более – 400, 800, 600 соответственно;
- ✓ масса гидроэлектропривода, кг – не более 200;
- ✓ усилие на штоке гидроцилиндра для перемещения плунжера ДГР – до 100 кН;
- ✓ скорость перемещения плунжера ДГР – не менее 2 см/с.
- ✓ линейный ход плунжера между крайними точками – не менее 200 мм.
- ✓ вид регулирования – плавное изменение индуктивности в требуемом диапазоне.

ДГР содержит пространственный бронестержневой магнитопровод с рабочей и сигнальной обмотками и один подвижный сердечник, что позволяет увеличить диапазон регулирования токов. Магнитный стержень разделен воздушным зазором. Для перемещения стержня использован гидроэлектропривод, трансформаторное масло подается через управляющий соленоид в камеру цилиндра. Напряжение питания гидроэлектропривода 380 В. Частота питающей сети 50 Гц. Таким образом, верхняя часть стержня выполняет возвратно-поступательные движения, изменяя величину зазора, тем самым плавно регулируя индуктивное сопротивление ДГР [93].

Магнитопровод изготовлен из высококачественной электротехнической стали, обмотки выполнены из медного провода. Активная часть ДГР расположена в нижней части бака с трансформаторным маслом. На стенке бака имеются вводы рабочей обмотки (А, Х). Управление ДГР производится под напряжением при отсутствии ОЗЗ. Источник опорного сигнала определяется типом блока автоматического управления ДГР, это может быть высоковольтный конденсатор, естественная несимметрия, генератор импульса напряжения, блок смещения нейтрали). ДГР имеет контрольную, защитную и измерительную аппаратуру. На рисунке 4.1 представлены внешний вид макета макета ДГР, а также отдельно гидроэлектропривод с управляющим соленоидом.



Рисунок 4.1 – Внешний вид макета ДГР и гидроэлектропривода

4.2 Расчет конструкции магнитной системы дугогасящего реактора

На рисунке 4.2 представлены в миллиметрах геометрические размеры магнитной цепи, выполненного из электротехнической стали марки 3407.

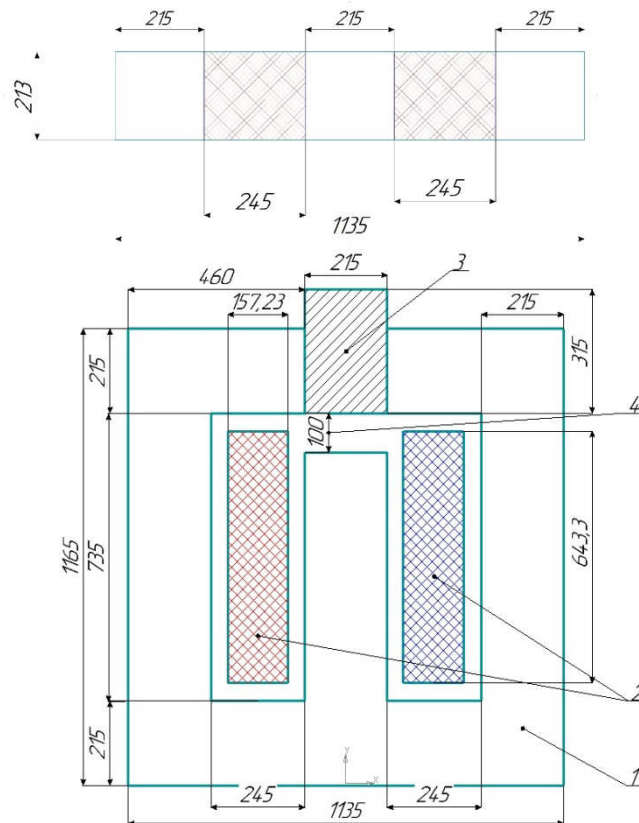


Рисунок 4.2 – Конструкция магнитной системы ДГР:

1-сердечник; 2-катушка; 3-магнитный шунт; 4-Зазор δ , мм

Для магнитной цепи (рисунок 4.3), содержащей два неоднородных участка ℓ_{ϕ_m} и ℓ_{ϕ_v} , в соответствии с законом полного тока справедливо уравнение [49]:

$$H_{\phi_m} l_{\phi_m} + H_{\phi_v} l_{\phi_v} = I \omega, \quad (4.1)$$

$$U_{m\phi_m} + U_{m\phi_v} = I \omega, \quad (4.2)$$

где H_{ϕ_m} и H_{ϕ_v} – напряженности магнитного поля в ферромагнетике и в воздухе соответственно;

ℓ_{ϕ_m} – длина средней линии в ферромагнетике;

ℓ_{ϕ_v} – длина средней линии в воздушном зазоре;

$U_{m\phi_m}$ – магнитное напряжение на участке ферромагнетика;

$U_{m\phi_v}$ – магнитное напряжение в зазоре (между полюсами ферромагнетика).

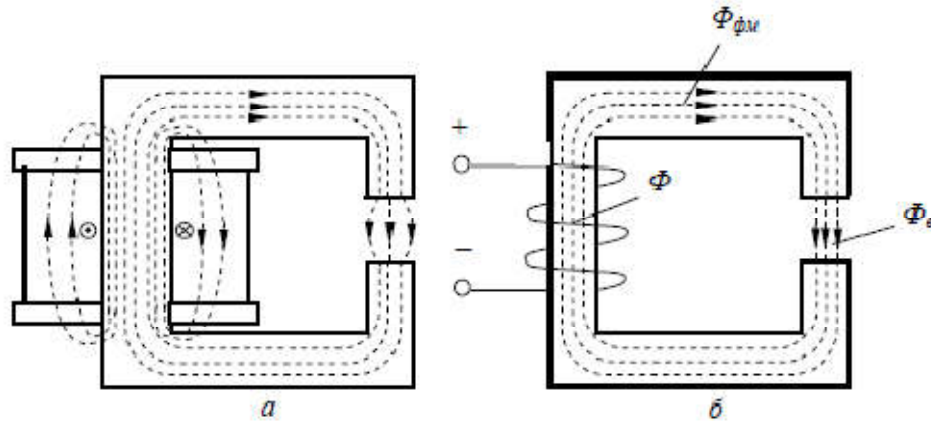


Рисунок 4.3 – Неоднородные магнитные цепи

Следовательно, в неоднородной магнитной цепи для любого замкнутого магнитопровода сумма магнитных напряжений на участках цепи равна магнитодвижущей силе (МДС) обмотки магнитопровода. При наличии нескольких обмоток их МДС суммируются. Данное свойство магнитной цепи соответствует второму закону Кирхгофа для электрической цепи [49].

Для анализа магнитных цепей применяется вебер-амперная характеристика, характеризующая графическую зависимость магнитного потока от магнитного напряжения участка или всей магнитной цепи:

$$\Phi = f(U_m), \quad (4.3)$$

При этом магнитный поток рассчитывается как произведение магнитной индукции B и площади поперечного сечения магнитопровода S , т.е. $\Phi = B \cdot S$, а магнитное напряжение U_m – как произведение напряженности магнитного поля H и протяженности участка цепи ℓ :

$$U_m = H\ell \quad (4.4)$$

Теорема Гаусса устанавливает аналогию с первым законом Кирхгофа для электрических и магнитных цепей, согласно которой поток вектора магнитной индукции B через любую замкнутую поверхность равен нулю [73]. Рассмотрим магнитную цепь (рисунок 4.4).

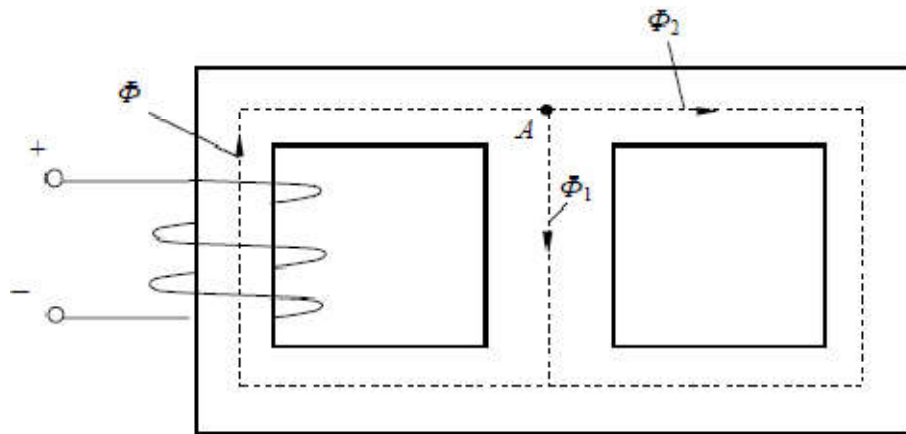


Рисунок 4.4 – Схема магнитной цепи

Ток, протекающий через катушку, создает магнитное поле и в магнитопроводе возникает магнитный поток Φ , который в точке A распадается на потоки Φ_1 и Φ_2 . Поскольку силовые линии магнитного поля являются непрерывными и замкнутыми, то должно выполняться соотношение:

$$\begin{aligned} \Phi &= \Phi_1 + \Phi_2, \\ \Phi - \Phi_1 - \Phi_2 &= 0 \end{aligned} \quad (4.5)$$

Уравнение (4.5) соответствует первому закону Кирхгофа для магнитной цепи.

Далее по такой же аналогии получим запись закона Ома для магнитной цепи. Запишем для ферромагнитного участка цепи (рисунок 4.3)

$$\Phi = B_{\phi_m} S_{\phi_m} = H_{\phi_m} \mu_0 \mu_r S_{\phi_m} = \frac{(I\omega)_{\phi_m} \mu_0 \mu_r S_{\phi_m}}{l_{\phi_m}} = \frac{(I\omega)_{\phi_m}}{l_{\phi_m} / (\mu_0 \mu_r S_{\phi_m})} = \frac{F_{\phi_m}}{R_{\phi_m}}, \quad (4.6)$$

где F_{ϕ_m} , $R_{\phi_m} = \ell_{\phi_m} / (\mu_0 \mu_r S_{\phi_m})$ – соответственно МДС и магнитное сопротивление ферромагнитного участка цепи.

Аналогично для воздушного зазора

$$\Phi = \frac{F_{\phi}}{R_{\phi}}, \quad (4.7)$$

где F_{ϕ} – МДС немагнитного участка цепи (зазора);

$R_{\phi} = \ell_{\phi} / (\mu_0 S_{\phi})$ – магнитное сопротивление воздушного зазора.

Также имеем аналогию в расчетах между нелинейными электрическими цепями постоянного тока и магнитными цепями с постоянными МДС. Имеем, что магнитное напряжение на участке магнитной цепи равняется произведению магнитного сопротивления участка на магнитный поток $U_M = R_M \cdot \Phi$ [73].

Аналогией является закон Ома для активного сопротивления электрической цепи постоянного тока $U = R \cdot I$. Сумма магнитных напряжений в контуре магнитной цепи равняется сумме МДС этого контура

$$\sum U_M = \sum F \quad (4.8)$$

На рисунке 4.5 представлена схема замещения неразветвленной магнитной цепи, которая является полной аналогией схеме замещения нелинейной электрической цепи. Таким образом, для анализа неразветвленных магнитных цепей с постоянной МДС могут быть применимы все графические и аналитические методы расчета нелинейных электрических цепей постоянного тока [76].

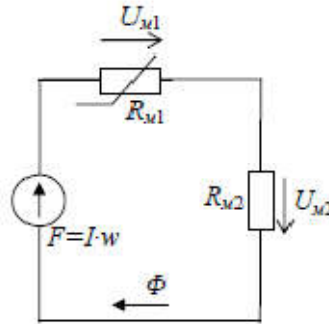


Рисунок 4.5 – Схема замещения

В качестве иллюстрации для анализа неразветвленной магнитной цепи (рисунок 4.3) использованы два графических метода: метод сложения вебер-амперных характеристик (рисунок 4.6, а) и метод нагрузочной характеристики (рисунок 4.6, б).

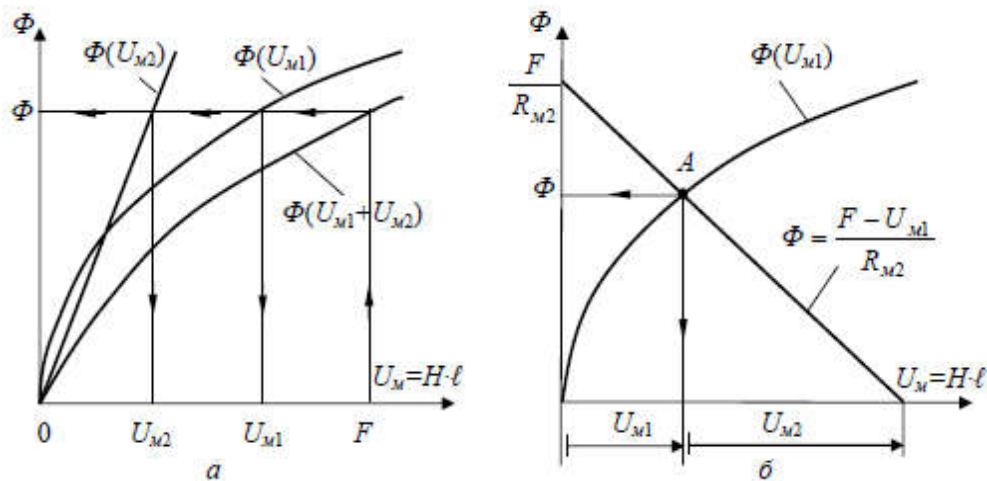


Рисунок 4.6 – Методы сложения вебер-амперных характеристик (а) и нагрузочной характеристики (б)

По первому методу построена вебер-амперная характеристика всей неразветвленной магнитной цепи $\Phi(U_{m1} + U_{m2})$, графически складывая по напряжению вебер-амперные характеристики ее двух участков. При известной МДС ($F = Iw$) по вебер-амперной характеристике всей магнитной цепи рассчитаем рабочую точку A , т.е. магнитный поток Φ , а по вебер-амперным характеристикам участков магнитопровода – магнитные напряжения на каждом из них.

По второму методу для линейного участка определим нагрузочную характеристику

$$\Phi = \frac{U_{м2}}{r_{м2}} = \frac{F - U_{м1}}{r_{м2}}, \quad (4.9)$$

т.е. прямую, проходящую через точку F на оси абсцисс и точку на оси ординат. Точка пересечения A нагрузочной характеристики с вебер-амперной характеристикой ферромагнитного участка цепи $\Phi(U_{м1})$ определяет магнитный поток Φ в цепи и магнитные напряжения на ферромагнитном участке $U_{м1}$ и воздушном зазоре $U_{м2}$. Значение индукции в воздушном зазоре

$$B_2 = \frac{\Phi}{S_2}. \quad (4.10)$$

Существуют прямая и обратная задачи при расчете магнитных цепей. Прямая задача заключается в определении МДС (намагничивающей силы) при заданном магнитном потоке. Если наоборот, то задача является обратной [12].

В случае с разрабатываемым реактором использован расчет обратной задачи.

На основании мощности реактора и материала обмоток средняя плотность тока принята равной $J_{ср} = 3 \text{ А/мм}^2$.

Ориентировочное сечение витка равно:

$$q = \frac{I_p}{jC_p} = \frac{20}{3} = 6,67 \text{ мм}^2 \quad (4.11)$$

Тип обмотки высокого напряжения (ВН) выбран с учетом тока, номинального напряжения, мощности ДГР и полученного сечения витка по таблице нормальных пределов использования типов обмоток: цилиндрическая многослойная из круглого сечения.

Выполним расчет обмоток ВН. Первоначально рассчитаем количество витков, нужного для получения номинального напряжения (для всех

ответвлений). Количество витков при номинальном напряжении определено по формуле:

$$\omega = \frac{U_p}{222 B_{cm} F_{cm}} = \frac{20000}{222 \cdot 1 \cdot 0,0225} = 4004 \text{ витков} \quad (4.12)$$

Принято: $\omega = 4000$ витков.

Электродвижущая сила одного витка получена из следующего соотношения:

$$U_{\text{вит}} = \frac{U_p}{\omega} = \frac{20000}{4000} = 5 \text{ В}, \quad (4.13)$$

где $U_{\text{вит}}$ - ЭДС, возникающая в одном витке, В;

$U_{\text{вн}}$ - напряжение обмотки ВН, В.

Действительная плотность тока:

$$j = \frac{I_p}{7,75} = 2,58 \text{ А/мм}^2 \quad (4.14)$$

Индуктивность обмотки L , при различных значениях зазора получена по выражению:

$$L = \frac{\Psi}{I} = \frac{\omega \Phi}{I} = \frac{\omega B S}{I} = \frac{\omega^2 \mu_0 S}{\delta}, \quad (4.15)$$

где Ψ – потокосцепление, Вб;

I – сила тока в контуре, А;

$\omega = 4000$ – число витков в катушке;

Φ – магнитный поток, Вб;

B – индукция, Тл;

$S = 0,026$ – сечение магнитопровода, м²;

δ – зазор, м;

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ – магнитная проницаемость в обмотках и воздухе, Г/м.

$$L_{100} = \frac{\omega^2 \mu_0 S}{\delta} = \frac{4000^2 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 0,026}{0,1} = 5,4 \text{ Гн},$$

$$L_{75} = \frac{\omega^2 \mu_0 S}{\delta} = \frac{4000^2 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 0,026}{0,075} = 6,9 \text{ Гн},$$

$$L_{50} = \frac{\omega^2 \mu_0 S}{\delta} = \frac{4000^2 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 0,026}{0,05} = 10,5 \text{ Гн},$$

$$L_{10} = \frac{\omega^2 \mu_0 S}{\delta} = \frac{4000^2 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 0,026}{0,01} = 54 \text{ Гн},$$

Результаты расчета при разных значениях зазора приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1. Расчет индуктивности без учета рассеяния

Зазор δ , мм	10	50	75	100	Кратность k_L
Индуктивность, Гн	54	10,4	6,9	5,4	10

При ходе магнитного шунта от 0,01 до 0,1 м была получена кратность изменения индуктивности равная 10.

$$k_L = \frac{L_{\min}}{L_{\max}} = \frac{54}{5,4} = 10. \quad (4.16)$$

На стендовой установке (макет ДГР) измерена индуктивность при двух зазорах 0,01 и 0,1 м, промежуточные значения эксперимента получены методом линейной интерполяции. Однако экспериментальное исследование не подтвердило данные результаты расчета и отношение индуктивности составило 4. Результаты представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2. Индуктивность макета ДГР, полученная экспериментально

Зазор δ , мм	10	50	75	100	Кратность k_L
Индуктивность, Гн	35	23,3	16,0	8,7	4

Для проверки расчета и выяснения влияний рассеяния произведено моделирование стационарного магнитного поля в программе ELCUT методом

конечных элементов на основе векторного магнитного потенциала, при граничных условиях Дирихле на границах $A=0$. На настоящем этапе выбрана модель плоскопараллельного поля, описываемая уравнением Пуассона, представленное в формуле [73]

$$\mu\mu_0\delta = \frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial y^2}, \quad (4.17)$$

где A – векторный магнитный потенциал;

$\mu = 7000$ – относительная магнитная проницаемость в магнитопроводе;

x, y – координаты.

Вычисляемые физические величины. При анализе результатов расчета магнитного поля Elcut позволяет оперировать со следующими локальными и интегральными физическими величинами [52, 94].

Локальные величины:

✓ векторный магнитный потенциал A (функция потока rA в осесимметричном случае)

$$B_x = \frac{\partial A}{\partial y}, B_y = -\frac{\partial A}{\partial x} \text{ – для плоскопараллельного поля;} \quad (4.18)$$

$$B_z = \frac{1}{r} \frac{\partial(rA)}{\partial r}, B_r = -\frac{\partial A}{\partial z} \text{ – для осесимметричного поля.} \quad (4.19)$$

✓ вектор магнитной индукции $B = \text{rot}A$;

✓ вектор напряженности магнитного поля $H = \mu^{-1}B$,

где μ – тензор магнитной проницаемости.

Интегральные величины:

✓ суммарная магнитостатическая сила, действующая на тела, заключенные в заданном объеме:

$$F = 2f((n \cdot B) + B(nH) - n(B \cdot H))s, \quad (4.20)$$

где интегрирование ведется по поверхности, окружающей заданный объем, а n – единичный вектор внешней нормали к поверхности;

✓ энергия магнитного поля:

$$W = 2 \int (H \cdot B) dV - \text{в линейном случае;} \quad (4.21)$$

$$W = \int \left(\int_0^B H(B') dB' \right) dV - \text{в нелинейном случае.} \quad (4.22)$$

✓ потокосцепление на один виток обмотки:

$$\Psi = \frac{\oint AdS}{S} - \text{в плоско-параллельном случае;} \quad (4.23)$$

$$\Psi = \frac{\oint AdS}{S} = \frac{2\pi \oint rAdS}{S} - \text{в осесимметричном случае.} \quad (4.24)$$

Интегрирование в этих выражениях выполняется по поперечному сечению обмотки, а S – площадь поперечного сечения.

При решении плоских задач интегральные величины рассчитываются на 1 м длины в осевом направлении.

Область интегрирования задана в плоскости модели в виде контура (если нужно замкнутого), который состоит из отрезков и дуг окружностей.

Картина магнитного поля при зазоре в 0,01 и 0,1 м, представлена на рисунке 4.7а и 4.7б соответственно. Потокосцепление и индуктивность определены исходя из формулы (4.23).

Расчет индуктивности произведен с помощью мастера индуктивности встроенной функции в программе ELCUT. Мастер индуктивности позволяет рассчитывать собственную и взаимную индуктивность проводников и катушек в расчетах магнитных полей постоянных и переменных токов [52]. При присутствии в модели нескольких проводящих контуров, обтекаемых различными токами, потокосцепление с одним из них может быть определено по выражению (4.25)

$$\Psi_k = L_{kk} i_k + \sum_n M_{nk} i_n, \quad (4.25)$$

где L_{kk} – собственная индуктивность контура k , Гн;

M_{nk} – взаимная индуктивность между контурами n и k, Гн;

i_n – полный ток в контуре k, А.

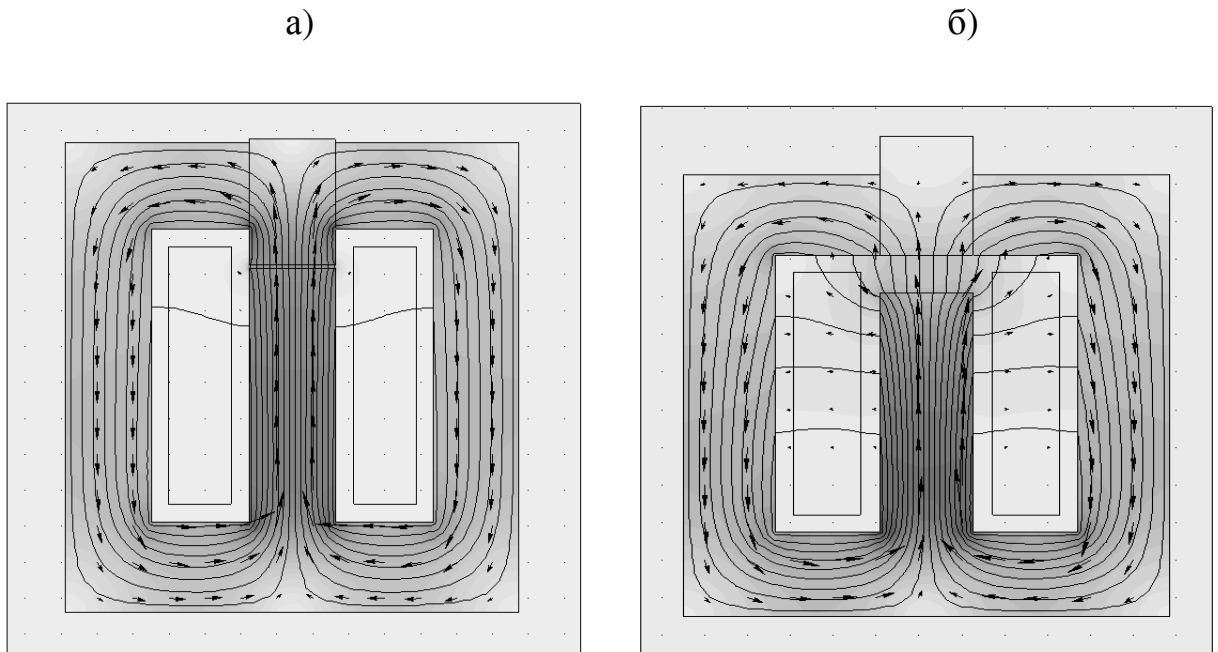


Рисунок 4.7 – Магнитное поле: а) при зазоре 10 мм; б) при зазоре 100 мм

Результаты расчета при моделировании приведена в таблице 4.3.

Таблица 4.3. Расчетная индуктивность с учетом рассеяния

Зазор δ , мм	10	50	75	100	Кратность k_L
Индуктивность, Гн	60	17,3	13,7	12	5

Кратность изменения индуктивности равна 5, что весьма близко к результату при эксперименте. Погрешность может быть объяснена неучетом бокового рассеяния.

Для более наглядного сравнения полученные результаты были нормированы к экспериментальным данным и приведены в таблице 4.4, а также на рисунке 4.8.

Таблица 4.4. Индуктивность ДГР

Зазор δ , мм	Индуктивность, Гн		
	Эксперимент	Расчет без учета рассеяния	Моделирование с учетом рассеяния
10	35	35	35
50	13,3	7	10
75	10,4	4,7	7,9
100	8,8	3,5	6,9
Кратность k_L	4	10	5

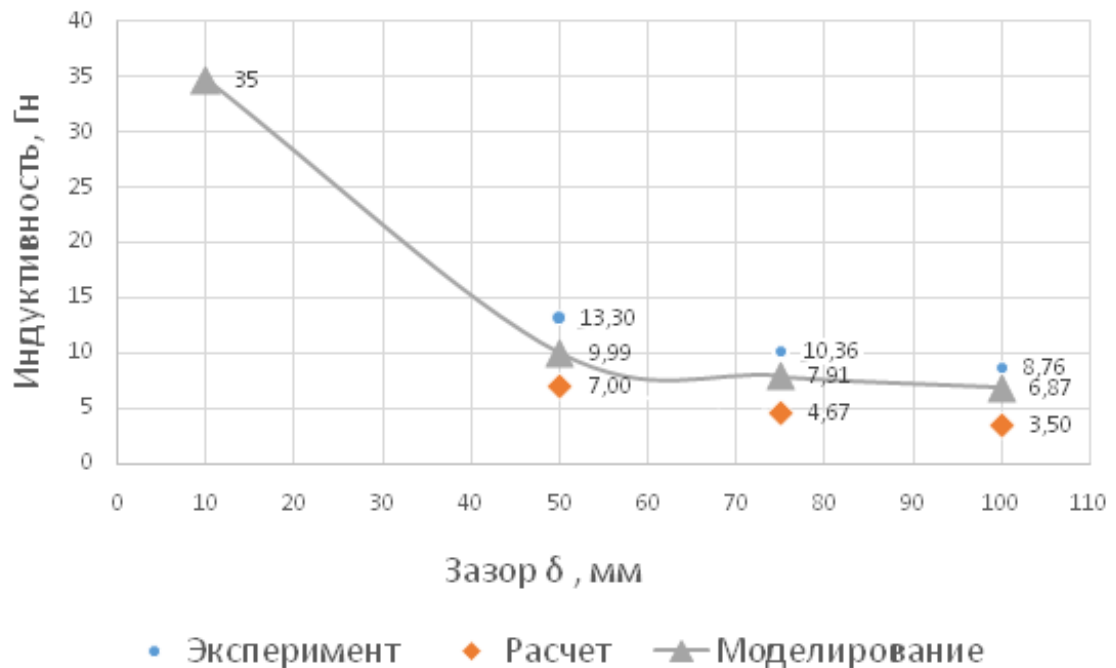


Рисунок 4.8 – Зависимость индуктивности ДГР от величины зазора

На рисунке 4.9 представлена векторная диаграмма напряжений и токов при однофазном замыкании на землю (фаза С). Здесь \bar{U}_{CA} , \bar{U}_{BC} – векторы линейных напряжений; \bar{U}_N – вектор напряжения смещения нейтрали; \bar{I}_{Ca} , \bar{I}_{Cb} – векторы ёмкостных токов по фазам, \bar{I}_3 – вектор тока замыкания на землю; \bar{I}_L – вектор индуктивного тока ДГР; $\bar{I}_{ост}$ – вектор остаточного тока в месте замыкания.

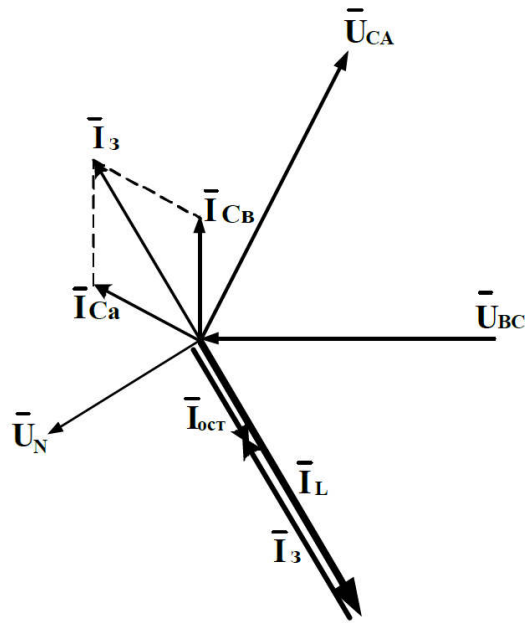


Рисунок 4.9 – Векторная диаграмма напряжений и ёмкостных токов при замыкании фазы «С» на землю

4.3 Проведение стендовых испытаний дугогасящего реактора с системой управления

В приложении Д на рисунке Д.1 представлена экспериментальная установка, на которой проводились стендовые испытания макета ДГР на напряжение 35 кВ и его системы управления в соответствии с разработанной программой и методикой испытаний [80].

Место проведения испытаний: открытое распределительное устройство трансформаторной подстанции 110/35/10 кВ «Щербакульская» ОАО «МРСК Сибири» Филиал «Омскэнерго» (далее - подстанция).

Установка макета ДГР осуществлена на бетонных блоках. На корпус ДГР установлены дополнительно: опорный изолятор на штанге (для подключения к сети) и защитный предохранитель.

Подключение макета ДГР выполнено в соответствии со схемой проведения испытаний (рисунок Д.1). Установка и подключение ДГР на подстанции представлено на рисунке 4.10.



Рисунок 4.10 – Установка ДГР на подстанции

Замыкание фазы на землю в ходе эксперимента выполнялось с помощью переносного заземления ЗПЛ-35М-3 (рисунок 4.11).



Рисунок 4.11 – Установка и подключение переносного заземления

Переходное сопротивление в месте ОЗЗ выполнялось устройством, представленном на рисунке 4.12.



Рисунок 4.12 – Внешний вид переходного сопротивления

Это устройство по конструкции представляет бак, внутрь которого заливается жидкость и имеются контакты. Сопротивление между контактами изменяется путем изменения расстояния между нижней пластиной и верхнем контактом, а также изменением характеристик залитой в бак жидкости. При испытаниях один контакт замыкается на землю, а другой соединяется с одной из фаз сети.

Блок имитации дуги (рисунок 4.13) выполнен в виде конструкции, применяемой в лаборатории ОмГТУ «Техника высоких напряжений», которая представляет опорные изоляторы, расположенные на основании. Для создания дугового замыкания на землю на изоляторах расположены элементы, с помощью которых регулируется расстояние между контактами. Один из контактов присоединяется к фазе линии, а другой заземляется с помощью переносного заземления.

Выбор конденсаторов. Для моделирования емкости линии необходимы конденсаторы со следующими характеристиками: номинальное напряжение $35/\sqrt{3}$ кВ, частота 50 Гц, диапазон изменения емкостей 0,1-1,5 мкФ для моделирования разных длин линий. Кроме того, конденсаторы должны иметь внутренние разрядные резисторы.



Рисунок 4.13 – Внешний вид блока имитации дуги

С учетом этих требований для установки выбраны конденсаторы марки КЭП, напряжением 10,5 кВ, установлены по два конденсатора на фазу. Схема подключения конденсаторов приведена на рисунке 4.14.

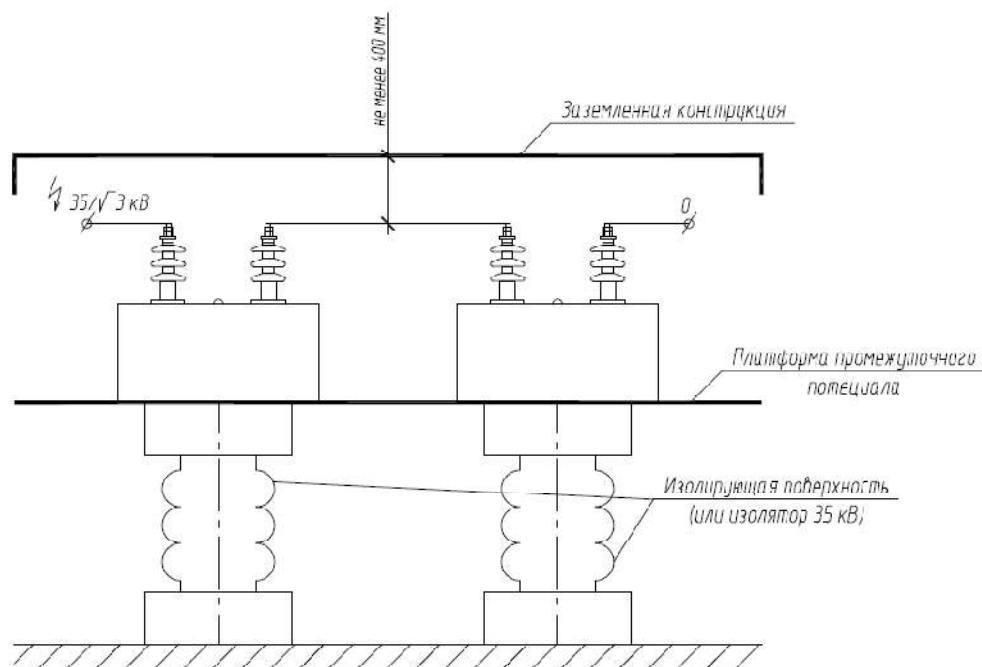


Рисунок 4.14 – Схема подключения конденсаторов на напряжение 35 кВ

Для реализации требуемого диапазона изменения емкости в пределах 0,1-1,5 мкФ определены номинальные величины емкостей конденсаторов. При этом выполнено условие:

$$\frac{1}{C_{\text{послед}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}, \quad (4.26)$$

или, для двух последовательно соединенных конденсаторов (рисунок 4.15)

$$C = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}. \quad (4.27)$$



Рисунок 4.15 – Последовательное соединение конденсаторов

Для выполнения условия по емкости равной 0,1 мкФ принята емкость конденсатора 0,2021 мкФ.

$$C = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2} = \frac{0,2021 \cdot 0,2021}{0,2021 + 0,2021} \approx 0,1 \text{ мкФ}.$$

Для обеспечения требования по емкости в 1,5 мкФ определена емкость конденсатора 3,25 мкФ (с запасом в большую сторону)

$$C = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2} = \frac{3,25 \cdot 3,25}{3,25 + 3,25} \approx 1,6 \text{ мкФ}.$$

Таким образом, выбраны к установке конденсаторы типа КЭП0-10,5-7-2У1 (2 конденсатора на фазу) с емкостью $C=0,2021$ мкФ и КЭП1-10,5-112,5-2У1 (2 конденсатора на фазу) с емкостью $C=3,25$ мкФ.

При выполнении испытаний разряд емкости выполняется элементами конструкции. Разрядные резисторы, имеющиеся в корпусе конденсаторов, после отключения конденсаторов уменьшают амплитудное значение номинального

напряжения до величины менее 0,05 кВ за время 5 мин. для однофазных конденсаторов мощностью до 300 квар на напряжение свыше 0,66 кВ.

На подстанции конденсаторы смонтированы на специальной металлической конструкции, установлены по 2 конденсатора на фазу, соединение произведено проводом АС-35 (рисунок 4.15). Подключение выполнено следующим образом: первый конденсатор соединен одним контактом с фазой сети вторым контактом с другим конденсатором, второй контакт которого заземлен.

Перед проведением стендовых испытаний устанавливаемое оборудование проверено электротехнической лабораторией.



Рисунок 4.15 – Установка конденсаторов на подстанции при испытаниях

Предварительно выполнены проверка изоляторов конструкции, испытания конденсаторов на номинальное и повышенное напряжение, проверка сопротивления изоляции ДГР.

Установка системы управления ДГР.

Внешний вид и конструктивные размеры системы управления ДГР представлены на рисунке 4.16.

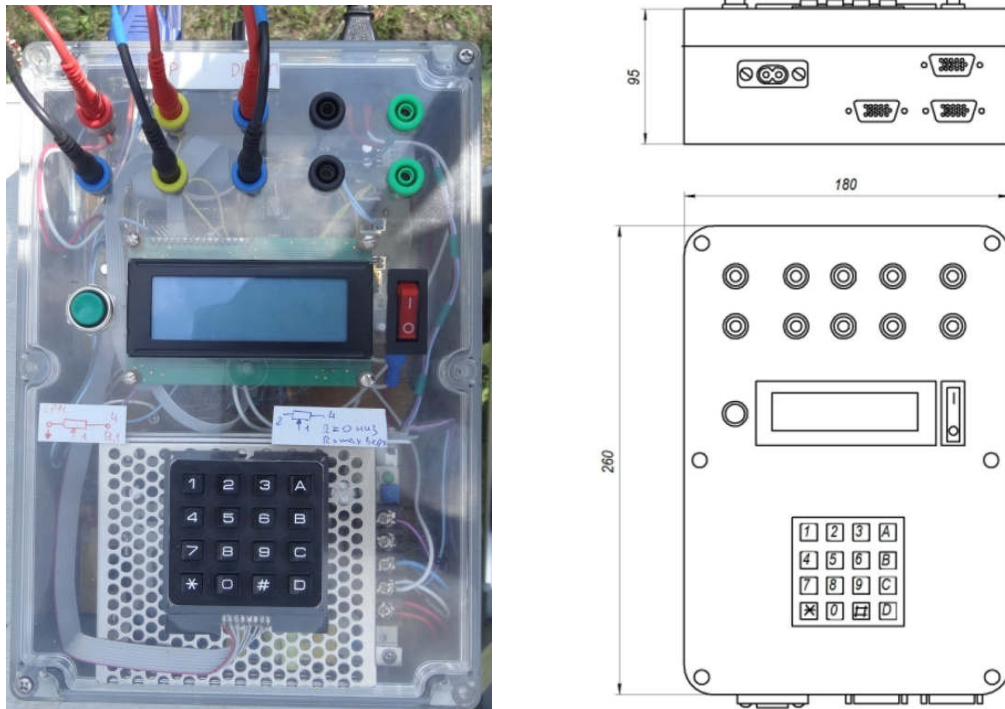


Рисунок 4.16 – Устройство системы управления ДГР

При проведении испытаний система управления была расположена на уровне макета ДГР за пределами подстанции (рисунок 4.17), схема ее подключения представлена на рисунке Д.1 (Приложение Д).



Рисунок 4.17 – Установка системы управления при испытаниях

На рисунке 4.18 представлено подключение индуктора.



Рисунок 4.18 – Подключение индуктора

4.4 Выводы по четвертой главе

В ходе разработки макета ДГР напряжением 35 кВ произведены расчеты магнитной части и обмоток ДГР. Для изготовления магнитопровода выбрана электротехническая сталь марки 3407 толщиной 0,3 мм с покрытием листов термостойкой изоляцией. При проектировании снижены потери холостого хода благодаря низкой величине индукции $B_{ст}=1$ Тл.

Выполнены расчеты индуктивности на основе теории поля, а также при моделировании в программе ELCUT. Получены зависимости индуктивности ДГР от величины зазора, кратность изменения индуктивности получена равной 5.

Результаты расчетов, выбора и обоснования материалов и конструкции были использованы при изготовлении макета ДГР, который прошел испытания на стендовой установке на действующей подстанции.

При проведении эксперимента получена кратность изменения индуктивности равная 4, что практически подтверждает теоретические расчеты.

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.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Автоматически регулируемые дугогасящие реакторы серии РУОМ / Базылев Б.И., Брянцев А.М., Долгополов А.Г. и др. // Электротехника 2010 / V симпозиум. «Перспективные направления в развитии энергетики и электротехнического оборудования в 2000-2010 годах». Сборник докладов, том 1 – М., 1999 г. С. 10–103.
2. Автоматический регулятор настройки дугогасящих реакторов АРК-2М. Техническое описание. – Киев, 1986.
3. Алексеев, В. П. Цифровая фильтрация сигналов на основе быстрого вейвлет преобразования / В. П. Алексеев, К. В. Аксёнов // Вестник Поморского университета. Серия: Естественные науки. – 2011. – № 2. – С. 84–89.
4. Анализ выражения для определения удельной емкостной проводимости линии электропередачи / В. В. Барсков [и др.] // Науч. проблемы трансп. Сибири и Дал. Востока. – 2009. - №2. – С. 282 – 285. – [55]
5. Анализ режима однофазного замыкания на землю в сетях с комбинированным заземлением нейтрали с помощью вейвлет преобразования / Д. С. Осипов [и др.] // Омский научный вестник. – 2018. – № 5 (161). – С. 76–81.
6. Бессолицын, А. В. Разработка методики численного расчета продольных параметров воздушной линии на основе трехмерной краевой задачи / А. В. Бессолицын, О. А. Новоселова, М. Г. Попов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2010. – № 2. – С. 50–55.
7. Бессолицын, А.В. Использование численного расчета трехмерного электростатического поля для определения собственных и взаимных емкостей проводов воздушной линии / А. В. Бессолицын, М. Г. Попов, Е.Н. Хорошина // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2010. – № 2. – С. 55–59.
8. Бессонов, Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: Учебник. – 10-е изд. – М. : Гардарики, 2000. – 638 с.
9. Блаттер, К. Вейвлет-анализ. Основы теории. / К. Блаттер; пер. с нем. Т.Э. Кренкеля под ред. А. Г. Кюркчана. – М.: Техносфера, 2004. – 280 с.

10. Боева Л. В., Имитационная модель однофазного замыкания на землю в сетях с изолированной и компенсированной нейтралью /Л.В. Боева, Г. Ю. Киселёв // Молодой ученый. – 2017. – №22. – С. 26-30.
11. Булгаков, А.А. Новая теория управляемых выпрямителей. – М.: Наука, 1970. – 320 с.
12. Буль, О.Б. Методы расчета магнитных систем электрических аппаратов: Магнитные цепи, поля и программа FEMM: Учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / О.Б. Буль. М.: Издательский центр «Академия», 2005. —336 с.
13. Бурак, Н.В. Обзор регулируемых заземляющих дугогасящих реакторов и основные требования к ним/ Н.В. Бурак, В.Д. Головчан // Электроснабжение и автоматизация промышленных предприятий. – Чебоксары: Чебокс. ун-т. – 1976. – С. 3–11.
14. Бухтояров, В.Ф. Защита от замыканий на землю электроустановок карьеров / Под ред. В.Ф. Бухтоярова, А.М. Маврицин. – М.: Недра, 1986. – 184 с.
15. Вайнштейн, Р.А. Режимы работы нейтрали в электрических системах / Р.А. Вайнштейн, С.И. Головкин, Н.В. Коломиец – Томск: Томский политехн. ин-т, 1981. – 79 с.
16. Вайнштейн, Р.А. Режимы заземления нейтрали в электрических системах: учебное пособие/ Коломиец Н.В., Шестакова В.В. – Томск: Изд-во ТПУ, 2006. – 118с.
17. Вейвлет-анализ в примерах: учеб. пособие / О.В. Нагорнов, [и др.]. – М.: НИЯУ МИФИ, 2010. – 120 с.
18. Всережимный регулятор автоматической настройки дугогасящих катушек в кабельных сетях 6–35 кВ / Д.Н. Степанчук [и др.] // Электрические станции. – 1978 – № 9. – С. 65–68.
19. Гиря, В.И. Автоматическая настройка емкостных токов. Электрическая настройка емкостных токов/ В.И. Гиря, О.А. Петров // Электрические станции. – 1977. – № 3. – С. 80–83.
20. Гиря, В.И. Классификация систем автоматического регулирования настройки дугогасящих реакторов/ В.И. Гиря, О.А. Петров // Автоматизация

энергосистем энергосистем и энергоустановок промышленных предприятий: тематич. сб. / Челябин. политехн. ин-т. – 1977. – №196. – С. 189.

21. Головкин, С.И. Селективная сигнализация однофазных замыканий и измерение расстройки компенсации в сетях 10, 35 кВ / С.И. Головкин, Р.А. Вайнштейн, С.М. Юдин // Электрические станции. – 2000. – № 7.

22. Горева, Т. С. Метод анализа импульсных помех в системах электроснабжения с идентификацией структурных компонент в ортогональном вейвлет-базисе / Т. С. Горева, С. Е. Кузнецов, Н. Н. Портнягин // Вестник КРАУНЦ. Физико-математические науки. – 2011. – № 2 (3). – С. 50-57.

23. Диагностика распределительных электрических сетей при однофазном замыкании на землю / Л.В. Владимиров [и др.] // Динамика систем, механизмов и машин: VII Междунар. науч.-техн. конф. – Омск, 2014. – С. 236–239.

24. Добеши, И. Десять лекций по вейвлетам / И. Добеши. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. – 464 с.

25. Дубкова, А. Д. Методы спектрального анализа в системе управления дугогасящего реактора / А. Д. Дубкова, С. Ю. Долингер, Д. С. Осипов // Омский научный вестник. – 2018. – №3 (159). – С. 43-47.

26. Дугогасящие реакторы ZTC и ASR. – Режим доступа: <http://ege-energan.ru>.

27. Дугогасящие реакторы с автоматической компенсацией емкостного тока замыкания на землю / Б.И. Базылев [и др.] // СПб.: Изд. ПЭИПК, 1999, 184 с.

28. Дьяконов, В. П. Вейвлеты. От теории к практике / В. П. Дьяконов. – М.: СОЛОН-Пресс, 2010. – 400 с.

29. Зацепин, Е. П. Компенсация ёмкостных токов в распределительных электрических сетях / Е.П. Зацепин, Е.В. Калинин // Вести высших учебных заведений Черноземья. – 2010. – №3(21). -С.17-22.

30. Зацепина, В. И. Апробация использования вейвлет-преобразования при выявлении негативных факторов в системах электроснабжения с резкопеременными нагрузками / В. И. Зацепина, Е. П. Зацепин, О. Я. Шачнев // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2015. – № 1. – С. 186-188.

31. Идельчик, В.И. Электрические системы и сети: Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 592 с.
32. Кадомская, К. П. Защита от перенапряжений в сетях различного назначения. – Новосибирск: изд. НГТУ, 2001. – 110 с.
33. Клименченко, П.В. Авторегрессионный алгоритм Берга для обнаружения целей и определения их скоростей на фоне пассивных помех, основанный на спектральных и статистических различиях целей и помех/ П.В. Клименченко, В.Н. Жураковский // Радиостроение. 2017. № 04. С. 1–15.
34. Козлов, В.Н. Дугогасящие реакторы 6–35 кВ. Реализация метода автоматического управления / В.Н. Козлов, В.А. Ильин // Новости ЭлектроТехники. – 2008. – №2(50). – С. 92 – 94.
35. Комплекс оборудования для управляемого заземления нейтрали в сетях 6-35 кВ. Научно-производственное предприятие ООО «НПП Бреслер». Официальный сайт компании: <http://www.bresler.ru>.
36. Коновалов, Е.С. Системный подход повышает эффективность заземления через ДГР // Новости ЭлектроТехники. – 2004. – № 5(29) – С. 35.
37. Корогодский, В.И. Релейная защита электродвигателей напряжением выше 1 кВ / В.И. Когородский, С.Л. Кужеков, Л.Б. Паперно. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 248 с.
38. Кренев, А.Н. Цифровой спектральный анализ: Учеб. пособие / А.Н. Кренев, Т.К. Артемова // Яросл. гос. ун-т. Ярославль, 2002. – 114 с.
39. Кривошеев В.И. Современные методы цифровой обработки сигналов (цифровой спектральный анализ). Учебно-методический материал по программе повышения квалификации «Современные системы мобильной цифровой связи, проблемы помехозащищенности и защиты информации». – Нижний Новгород, 2006, -117 с.
40. Кричко, В.А. Особенности применения дугогасящих реакторов / В.А. Кричко, И.А. Миронов // Новости электротехники. – 2007. – №1(43).

41. Кузьмин, А. А. К вопросу выбора режима заземления нейтрали в сети среднего класса напряжения городского электроснабжения / А. А. Кузьмин, А. Базаррагча // Вестник Чувашского университета. – 2015. – № 3. – С. 62-67.
42. Кучеренко, В.И. Дугогасящие реакторы в сетях 6–35 кВ. Опыт эксплуатации / В.И. Кучеренко, В.Н. Сазонов, Д.В. Багаев // Новости электротехники. – 2007. – №3(45).
43. Ларионов, В.П. Техника высоких напряжений / В.П. Ларионов, В.В. Базуткин, Ю.Г. Сергеев. – М.: Энергоиздат, 1982. – 296 с.
44. Лихачев, Ф. А. Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и компенсацией емкостных токов. М.: Энергия, 1971. 152 с. [104]
45. Лихачев, Ф.А. Защита от внутренних перенапряжений установок 3–220кВ. – М.: Энергия, 1968. – 101 с.
46. Манилов, А. ОЗЗ в сетях 6-10 кВ с комбинированным заземлением нейтрали. Способ обеспечения чувствительности защит / А.М. Манилов, А.К. Барна // Новости ЭлектроТехники. – 2012. – №6(78). Режим доступа: [<http://www.news.elteh.ru/arh/2012/78/06.php>]
47. Матвеев, Д. А. Эффективность управляемых дугогасящих реакторов в электрических сетях 6 – 35 кВ: теоретические аспекты / Д. А. Матвеев, С. И. Хренов // Электричество. – 2015. – № 1. – С. 34-39.
48. Матвеев, Д.А. Дугогасящие реакторы серии РУОМ. Преимущества очевидны, недостатки преувеличены // Новости Электро Техники. – 2012. – №5(77).
49. Методы расчета электрических и магнитных полей : учебный М74 комплект / В. Э. Фризен [и др.] // Екатеринбург : УрФУ, 2014. - 176 с. [90]
50. Миронов, И.А. Дугогасящие реакторы 6–35 кВ. Автоматическая компенсация емкостного тока / И.А. Миронов // Новости ЭлектроТехники. – 2007. – № 5(47).
51. Мисриханов, А.М. Применение методов вейвлет-преобразования в электроэнергетике / А.М. Мисриханов // Автоматика и телемеханика. – 2006. № 5. С. 5-23.

52. Моделирование двумерных полей методом конечных элементов. Версия 5.8.Руководство пользователя. СПб.: TOP, 2010. – 345с. – Режим доступа: <http://old.exponenta.ru/soft/others/elcut/Manual.pdf>, свободный. [88]
53. Нагорный, П. Д. Измерительные трансформаторы напряжения и контроль изоляции в сетях 6-35 кВ / П. Д. Нагорный // Промышленная энергетика. – 2002. – № 3 – С. 23–25.
54. Обзор режимов заземления в электрических сетях 6-35 кВ / В.А. Бурчевский [и др.] // Омский научный вестник. – 2016. – № 1 (145). С. 58–60.
55. Осипов, Д. С. Разработка алгоритма автоматической настройки компенсации емкостных токов на основе существующих методов / Д. С. Осипов, С. Ю. Долингер, Д. Г. Сафонов // Омский научный вестник. 2016. № 4 (148). С. 79–84.
56. Осипов, Д.С. Разработка критерия выбора оптимального типа материнского вейвлета в задаче расчета активной и реактивной мощности систем электроснабжения / Д. С. Осипов // Омский научный вестник. – 2018. – № 6 (162). – С. 71–75.
57. Ощепков, В. А. Определение уровня перенапряжений в сетях с компенсацией емкостных токов / В. А. Ощепков, А. О. Шепелев, Н. С. Капитонов // Омский научный вестник. – 2016. –№ 5 (151). – С. 89-93.
58. Пат. Рос. Федерация № RU 2475915 С2. Способ настройки компенсации емкостных токов замыкания на землю в электрических сетях / ООО «НПП Бреслер». Заявка № 2006145005/09 Опубликовано: 27.03.2008.
59. Пат. Рос. Федерация № RU 2508584 С1. Способ автоматической настройки дугогасящего реактора / А.Г. Долгополов. Заявка № 2012138106/07. Опубликовано: 27.02.2014.
60. Пат. Рос. Федерация № RU 2130677 С1. Способ автоматической настройки дугогасящего реактора и устройство для его осуществления / А.М. Брянцев. Заявка № 97111743/09. Опубликовано: 20.05.1999.
61. Пат. Рос. Федерация № RU 2455742 С1. Способ автоматической настройки плунжерного дугогасящего реактора и устройство для автоматической настройки

плунжерного дугогасящего реактора / ООО «ВП «Наука, техника, бизнес в энергетике», И.В. Сладков, Ю.Г. Корчмарик, С.В. Лобастов, А.А. Тимченко. Заявка № 2010152814/07. Опубликовано: 10.07.2012.

62. Пат. Рос. Федерация № RU 2170938 С1. Способ измерения емкости сети для автоматической настройки дугогасящих реакторов (варианты) / А.М. Брянцев. Заявка № 2000101918/09. Опубликовано: 20.07.2001.

63. Пат. Рос. Федерация № RU 2321132 С1. Способ настройки компенсации емкостных токов замыкания на землю в электрических сетях / ООО «НПП Бреслер». Заявка № 2006145005/07. Опубликовано: 20.02.2013.

64. Пат. Рос. Федерация № RU 2270456 С2. Способ определения максимального емкостного тока однофазного замыкания на землю в трехфазной кабельной электрической сети с компенсированной заземляющим дугогасящим ступенчато регулируемым реактором нейтралью / ГОУ КурскГТУ. Заявка № 2004104493/28. Опубликовано: 20.02.2006.

65. Пат. Рос. Федерация № RU 2404501 С1. Устройство автоматической настройки дугогасящего реактора / ООО «НПП Бреслер». Заявка № 2009143308/07. Опубликовано: 20.11.2010.

66. Пат. Рос. Федерация № 2148833. Устройство быстродействующей селективной защиты от однофазных замыканий на землю в распределительных сетях с возможностью безаварийного ввода резерва /П.А. рогов, О.Б. Шонин. Заявлено 10.03.09. Опубликовано 27.01.11.

67. Петров, О.А. Система настройки дугогасящих реакторов по максимуму напряжения смещения нейтрали / О.А. Петров, А.М. Ершов, В.И. Гиря // Электрические станции – 1978. – № 2. – С. 23 – 31.

68. Петров, О.А. Система автоматической настройки дугогасящей катушки / О.А. Петров // Электрические станции. – 1973. – № 1. С. 12 – 16.

69. Петров, М.И. Система автоматической настройки дугогасящих реакторов с контролем параметров сети / М.И. Петров М.И., В.Ф. Ильин, Е.М. Петров. Режим доступа: <https://docplayer.ru/56028081-Sistema-avtomaticheskoy-nastroyki->

dugogasyashchih-reaktorov-s-kontrolem-parametrov-seti.html (дата обращения 05.09.2018).

70. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации / Госэнергонадзор Минэнерго России. – М.: ЗАО «Энергосервис», 2003. – 342 с.
71. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей/ Госэнергонадзор Минэнерго России. – М.: ЗАО «Энергосервис», 2003. – 392 с.
72. Правила устройства электроустановок: 6-е и 7-е изд. с изм. и доп. – М.: КНОРУС, 2007. – 487 с.
73. Расчет магнитных полей электрических машин методом конечных элементов / А.Л. Кислицин [и др.] // Изд-во Саратовского ун-та, 1980. 166 с.
74. РД 34.20.179. Типовая инструкция по компенсации емкостного тока замыкания на землю в электрических сетях 6-35 кВ. – 26 с. http://snipov.net/c_4691_snip_115002.html.
75. Регулятор настройки дугогасящей катушки РНДК-1. Техническое описание. – М.: ОЗАП «Мосэнерго», 1982.
76. Розин Л.А. Метод конечных элементов/ Л.А. Розин. – СПб: Изд-во Соросовский образовательный журнал. 2000. Т. 6, №4. С. 120–127.
77. Сафонов Д. Г. Имитационное моделирование функционирования распределительной сети с дугогасящим реактором / Д.Г. Сафонов // Омский научный вестник. – 2018. – № 6 (162). – С. 98–102.
78. 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.
79. 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.

80. 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.
81. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов: учеб. пособие / А.Б. Сергиенко. СПб. : Питер, 2002. – 608 с.
82. Сирота, И.М. Защита от замыканий на землю в электрических системах. – Киев: Изд. АН УССР, 1955. – 208 с.
83. Сирота, И.М. Режимы нейтрали электрических сетей / И.М. Сирота, С.Н. Кисленко, А.М. Михайлов. – Киев: Наук. Думка, 1985. – 264 с.
84. Смоленцев, Н. К. Основы теории вейвлетов. Вейвлеты в MATLAB / Н.К. Смоленцев. – М.: ДМК Пресс, 2014. – 628 с.
85. Теоретические основы электротехники: В 3-х т. Учебник для вузов. Том 1. – 4 –е изд. / К. С. Демирчян [и др.] // СПб.: Питер, 2006. – 463 с.
86. Теоретические основы электротехники: В 3-х т. Учебник для вузов. Том 3 / К.С. Демирчян [и др.] – СПб.: Питер, 2006. – 377 с.
87. Титенков, С.С. Замыкания на землю в сетях 6–35 кВ. Достоинства и недостатки различных защит. Экспертное мнение /С.С. Титенков // Новости Электротехники. – 2005. – № 3 (33). Режим доступа: <http://news.elteh.ru/arh/2005/33/13.php>.
88. Титенков, С.С. Режимы заземления нейтрали в сетях 6–35 кВ и организация релейной защиты от однофазных замыканий на землю / С.С. Титенков, А.А. Пугачев // Энергоэксперт. 2010. № 2. С. 18-25.
89. Титенков, С.С. 4 режима заземления нейтрали в сетях 6–35 кВ. Изолированную нейтраль объявим вне закона / С.С. Титенков // Новости ЭлектроТехники. – 2003. – № 5(23) – С. 42. Режим доступа: <http://uran.donntu.org/~masters/2015/etf/yermolaev/library/article8.htm>.

90. Торосян, А. С. Перенапряжения при дуговых замыканиях на землю в сетях 6-10 кВ с токоограничивающими реакторами / А.С. Торосян // Электрические станции. – 1995. – № 4. – С.34–42.
91. Федотов, А. И. Распределение токов и напряжений вдоль воздушных линий электропередачи 6–35 кВ на «резонансных» частотах при ОЗЗ / А. И. Федотов, Г. В. Вагапов, Н. В. Чернова // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2017. – т. 19, № 5-6. – С. 69-78.
92. Цапенко, Е.Ф. Замыкания на землю в сетях 6–35 кВ / Е.Ф. Цапенко. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 128 с.
93. Черников, А.А. Компенсация емкостных токов в сетях с незаземленной нейтралью / А.А. Черников // М.: Энергия, 1974. 96 с.
94. Черных, И. В. Моделирование устройств индукционного нагрева с помощью пакета ELCUT / И.В. Черных // Exponenta Pro. Математика в приложениях. – 2003. №2. – С. 4 – 8.
95. Черных, И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink / И.В. Черных. – СПб.: Питер, 2008. – 288 с.
96. Шабад, М. А. Защита от однофазных замыканий на землю в сетях 6–35 кВ / М.А. Шабад. – М.: Энергопрогресс, 2007. – 64 с.
97. Шахтарин, Б.И. Методы спектрального оценивания случайных процессов / Б.И. Шахтарин, В.А. Ковригин – М.: Гелиос АРВ, 2005. – 248 с.
98. Штарк, Г.Г. Применение вейвлетов для ЦОС / Г.Г. Штарк. – М.: Техносфера, 2007. – 192 с.
99. Электротехнический справочник. В 4 томах. Том 1. Общие вопросы. Электротехнические материалы / Под общ. ред. профессоров МЭИ В.Г. Герасимова [и др.] – М.: Издательство МЭИ, 1995. – 440 с.
100. Электротехнический справочник. В 4 томах. Том 3. Производство, передача и распределение электрической энергии / Под общ. ред. профессоров МЭИ В. Г. Герасимова [и др.] – М.: Издательство МЭИ, 2004. – 964 с.
101. Яковлев, А.Н. Введение в вейвлет-преобразования: учеб. пособие / А.Н. Яковлев // Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. – 104 с.

102. Analysis of Asymmetrical Modes in Medium Voltage Electrical Grids with Compensated Neutral / Girshin S. S. [et al.] // 2016 the 3rd International Conference on Manufacturing and Industrial Technologies. Istanbul, May 25–27. 2016. Vol. 70. DOI: 10.1051/mateconf/20167010008.
103. Continuous-wavelet transform for fault location in distribution power networks: definition of mother wavelets inferred from fault originated transients / A. Borghetti [et al.] // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2008. – vol. 23, issue 2. – pp. 380-388. DOI: 10.1109/TPWRS.2008.919249
104. Dolinger, S.Y. Basic Approaches to the Implementation of Petersen Coil Control System / S.Y. Dolinger, A.G. Lyutarevich, D.S. Osipov // 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). Proceedings. – Omsk: Omsk State Technical University. Russia, Omsk, May 21–23, 2015. ISBN: 978-1-4799-7102-2.
105. Druml, G. Дугогасящие реакторы 6–35 кВ. Повышение точности настройки / G. Druml, A. Kugi, B. Parr // Новости ЭлектроТехники. – 2007. – № 1(43). Режим доступа: <http://news.elteh.ru/arh/2007/43/08.php>.
106. Druml, G. Дугогасящие реакторы 6–35 кВ. Новый метод определения параметров сети / G. Druml, O. Seiferd // Новости ЭлектроТехники. – 2007. – № 2(44). Режим доступа: <http://news.elteh.ru/arh/2007/44/07.php>.
107. Elements of wavelets for engineers and scientists / Dwight F. Mix [et al.] // Inc. New York, NY, USA. – 2003 ISBN:0471466174
108. Guo, M.-F. Wavelet-transform based early detection method for short-circuit faults in power distribution networks / M. –F. Guo, N.-C. Yang, L.-X. You // International journal of electric power and energy systems. – 2018. – vol. 99, July. – pp. 706-721. DOI: 10.1016/j.ijepes.2018.01.013
109. Simulation of Electrical Loads in Problems of Arc Extinguish Reactor Controlling / Girshin S.S. [et al.] // 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). Proceedings. – Omsk: Omsk State Technical University. Russia, Omsk, May 21–23, 2015. ISBN: 978-1-4799-7102-2

110. Sokansky, K. Possibilities of Identification of earth faults in 22 kV Distribution Networks, Short-circuit currents in powersystems / K. Sokansky, J. Gavlas, P. Valek // 9 th International Symposium, Cracow. – October 11 – 13. – 2000. – C. 157–163.
111. The Calculation of Steady-State Mode of 35 KW Radial System with Arc Suppression Coils Considering Asymmetry of Power Lines / Girshin S. S. [et al.] // 2016 IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering. Florence, June 07–10. 2016. P. 1–5. DOI: 10.1109/EEEIC.2016.7555455.
112. Xinzhou, Dong. Identifying Single-Phase-to-Ground Fault Feeder in Neutral Noneffectively Grounded Distribution System Using Wavelet Transform / Dong Xinzhou, Shi Shenxing // Power Delivery, IEEE Transactions on. – 2008. – C.1829–1837.

Приложение А. Акты внедрения

УТВЕРЖДАЮ:

Генеральный директор

ООО «Объединенная сетевая компания»



А.В. Воробьев

" " 2018 г.

АКТ



об использовании результатов диссертационной работы

Сафонова Дмитрия Геннадьевича,

представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 05.14.02

Настоящим актом подтверждается, что результаты диссертационной работы, полученные Сафоновым Дмитрием Геннадьевичем, использованы ООО «Объединенная сетевая компания» при разработке проектно-сметной документации в виде практических рекомендаций по модернизации электрооборудования в распределительных сетях 10-35 кВ, а также при разработке плана мероприятий по оптимизации работы электрических сетей среднего напряжения:

- алгоритм и программа по расчету установившегося режима позволили определить токи и напряжения в требуемых точках сети, а также потери мощности в электрооборудовании с целью расчета нормативных технологических потерь электроэнергии.

- имитационная модель распределительной сети позволила оценить уровень перенапряжений в электрических сетях организации, а также степень настройки дугогасящего реактора при однофазном замыкании на землю.

Инженер-энергетик



Литвиненко Т.С.

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по учебной работе
Омского государственного
технического университета

А. В. Мышлявцев

«__» _____ 20__ г.

АКТ

использования в учебном процессе
материалов диссертационной работы
старшего преподавателя кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий»
Сафонова Дмитрия Геннадьевича

В Омском государственном техническом университете на кафедре «Электроснабжение промышленных предприятий» в учебном процессе используются результаты научных исследований, полученные Сафоновым Дмитрием Геннадьевичем, а именно:

1. Разработанный алгоритм настройки дугогасящего реактора, положенного в основу работы системы управления дугогасящим реактором с регулируемым воздушным зазором, с целью компенсации емкостных токов и защиты от однофазных замыканий на землю используется в лекционных курсах и практических занятиях по дисциплинам «Электрические системы и сети» (лектор – доцент Гиршин С.С.), «Электроснабжение городов и промышленных предприятий» (лектор – доцент Рысев П.В.).

2. Уточненная математическая модель режима однофазного замыкания на землю в сети 35 кВ, учитывающая естественную несимметрию воздушных линий и положение точки замыкания, используется в лекционных курсах и практических занятиях по дисциплинам «Методы расчета и оптимизация режимов электроэнергетических систем» (лектор – доцент Гиршин С.С.).

3. Материалы научных исследований Д.Г. Сафонова нашли отражения в следующих учебных пособиях:

1) Режимы работы нейтралей систем электроснабжения объектов : учеб. пособие / [В. А. Ощепков и др.] ; под общ. ред. В. А. Ощепкова ; Минобрнауки России, ОмГТУ. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2017.

2) Основы проектирования систем электроснабжения городов : учеб. пособие / [В. К. Грунин и др.] под общ. ред. В. К. Грунина ; Омск: Изд-во ОмГТУ, 2014. – 164 с.

3) Основы электроснабжения городов учеб. пособие / [В. К. Грунин и др.] под общ. ред. В. К. Грунина ; Омск: Изд-во ОмГТУ, 2012. – 141 с.

Результаты внедрения способствуют улучшению качества подготовки специалистов по электрическим станциям и электроэнергетическим системам по указанным дисциплинам.

Зав. кафедрой «Электроснабжение
промышленных предприятий»,
д.т.н., профессор

В.Н. Горюнов

Приложение Б. Программа для расчета напряжения смещения нейтрали в среде DELPHI при полной схеме замещения электрической сети

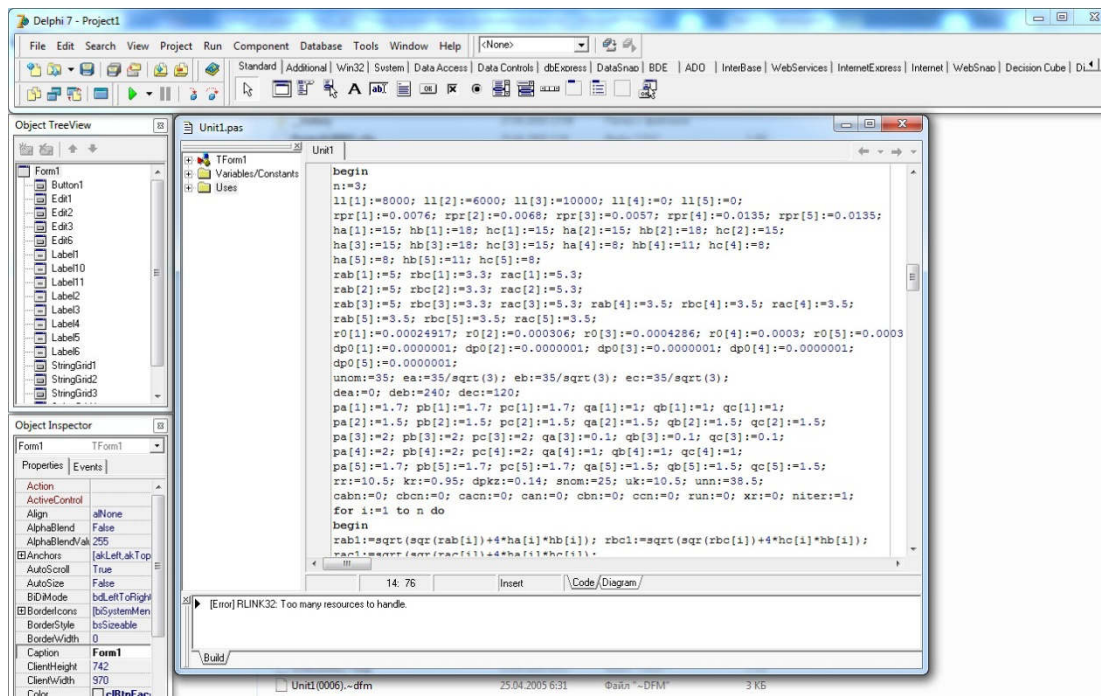


Рисунок Б.1 – Программа для расчета установившегося режима сети с компенсированной нейтралью с учетом полной схемы замещения

РАСЧЕТ

МОДУЛИ И ФАЗЫ ТОКОВ НАГРУЗКИ

№	Ia, кА	Ia, град	Ib, кА	Ib, град	Ic, кА	Ic, град
1	0,122062031383708	334,815221905057	0,122062025410383	214,815306521322	0,122062184511222	94,8152666414101

МОДУЛИ И ФАЗЫ ТОКОВ В НАЧАЛЕ ЛИНИЙ

№ линии	Iал, кА	Iал, град	Ibl, кА	Ibl, град	Icl, кА	Icl, град
1	0,121989798083238	334,908816196873	0,121979282444873	214,911538203367	0,121999838022999	94,9165469871863

МОДУЛИ И ФАЗЫ НАПРЯЖЕНИЙ В КОНЦЕ ЛИНИЙ

№ линии	Ua, кВ	Ua, град	Ub, кВ	Ub, град	Uc, кВ	Uc, град
1	19,7917695482376	359,238469828899	19,7804612373699	239,30065396399	19,8223698896283	119,238591193781

НАПРЯЖЕНИЯ В НАЧАЛЕ ЛИНИЙ И ТОКИ В ТРАНСФОРМАТОРЕ

	IaT/Uaн, кА/кВ	IaT/Uaн, град	IbT/Uбн, кА/кВ	IbT/Uбн, град	IcT/Ucн, кА/кВ	IcT/Ucн, град
токи	0,121913625919223	335,003922337537	0,121892597279276	215,009361392025	0,121933770688292	95,0194158809353
напряжения	20,1890315408524	0,023675947762276	20,1890447986609	240,024838828206	20,1886740007935	120,0242786963

ПОТЕРИ МОЩНОСТИ, кВт

нагрузочные потери в порядке нумерации линий	89,0031090529641
суммарные нагрузочные потери в линиях	89,0031090529641
потери от токов утечки	2,3497314798417
общие потери в линиях	91,3528405328058
потери в реакторе	5,36691646870993E-6

Напряжение нейтрали, кВ

0,000238514809955955

Ток в реакторе, кА

2,25013971656561E-5

Число итераций

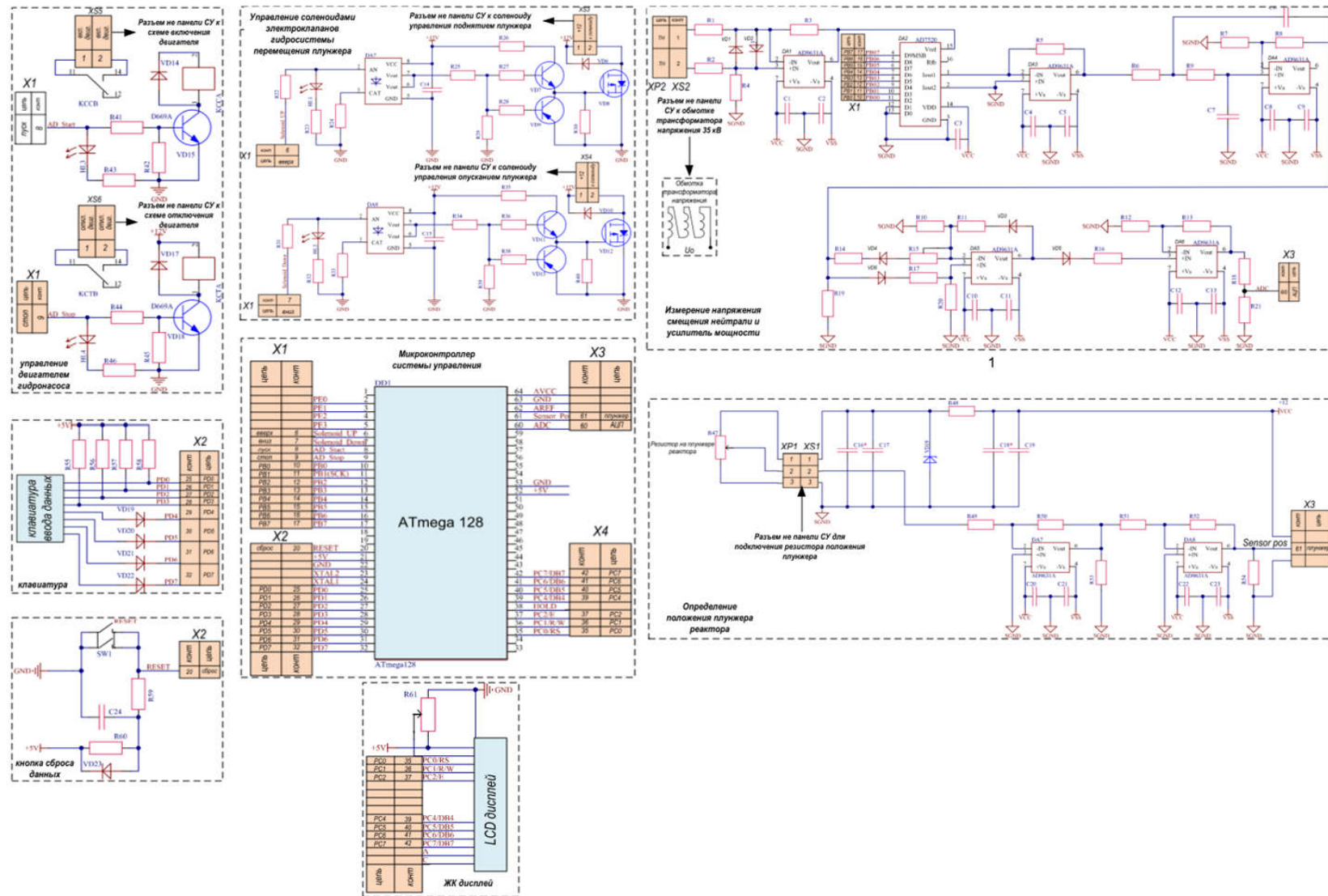
5

Рисунок Б.2 – Результаты расчетов установившегося режима сети с компенсированной нейтралью с учетом полной схемы замещения

Приложение В. Свидетельства о регистрации электронного ресурса



Приложение Г. Схема электрических соединений системы управления дугогасящим реактором



**Приложение Д. Программа и методика стендовых испытаний макета
дугогасящего реактора и системы управления**

СОГЛАСОВАНО

Директор ООО «Энерготехнология»

_____ В.А. Ощепков

« _____ » _____ 2016 г.

СОГЛАСОВАНО

Директор ООО «Энергетические системы»

_____ В.В. Тевс

« _____ » _____ 2016 г.

УТВЕРЖДАЮ

Ректор ОмГТУ



_____ А.В. Косых

« _____ » _____ 2016 г.

**ПРОГРАММА И МЕТОДИКИ
СТЕНДОВЫХ ИСПЫТАНИЙ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОБРАЗЦА
ДУГОГАСИТЕЛЬНОГО РЕАКТОРА И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ
2016020101 ПМ 1**

От Получателя субсидии:

Проректор по научной работе ОмГТУ

_____ Б.Д. Женатов

Научный руководитель работ

_____ В.Н. Горюнов

1 Общие положения

1.1 Наименование и обозначение опытного образца продукции (далее – объект испытаний).

Объект испытаний – экспериментальный образец управляемого дугогасительного реактора (п.4.4.1.1 ТЗ).

Состав объекта испытаний:

- экспериментальный образец управляемого дугогасительного реактора (ДГР);
- система управления дугогасящим реактором (СУ).

1.2.Цель испытаний

Проверка технических характеристик объекта испытаний на соответствие требованиям технического задания в составе экспериментальной (стендовой) установки.

1.3 Условия предъявления объекта испытаний на испытания

1.3.1 Количество объектов испытаний – 1 шт.

1.3.2 Порядок отбора объектов испытаний

Испытания в составе экспериментальной установки производятся с использованием изготовленного и проверенного в соответствии с программой и методикой проведения испытаний, программного обеспечения объекта испытаний.

1.3.3 Объект испытаний предъявляется на испытания в сопровождении следующих документов:

1.3.3.1 Техническое задание на выполнение прикладных научных исследований (проекта) по лоту: “Разработка научно-технических решений по селективному определению поврежденных фидеров в сетях с компенсированной нейтралью” (далее – ТЗ).

1.3.3.2 Эскизная конструкторская документация на экспериментальный образец дугогасительного реактора напряжением 35 кВ (в соответствии с п.6.1.3.2 ТЗ).

1.3.3.3 Эскизная конструкторская документация на экспериментальный образец системы управления (в соответствии с п.6.1.3.1 ТЗ).

1.3.3.4 Эскизная конструкторская документация на экспериментальную (стендовую) установку (в соответствии с п.6.1.3.3 ТЗ).

1.3.3.5 Программная документация (в соответствии с п.6.1.3.4 ТЗ).

1.4 Получатель субсидии взаимодействует с представителями других организаций, участвующих в испытаниях, в следующем порядке:

1.4.1 Получатель субсидии извещает Индустриального партнера о готовности к проведению испытаний.

1.4.2 Получатель субсидии Приказом утверждает план-график проведения испытаний и комиссию.

1.4.3 Получатель субсидии извещает организацию-соисполнителя, которая должна принять участие в испытаниях.

1.4.4 Получатель субсидии совместно с Индустриальным партнером проводят все подготовительные мероприятия для проведения испытаний, а так же проводят испытания.

1.4.5 По завершению испытаний Получатель субсидии и Индустриальный партнер подписывают Протоколы и Акты испытаний.

1.4.6 В случае расхождений в оценках результатов испытаний, для разрешения споров, получения однозначных оценок, допускается привлечение экспертов как со стороны Получателя субсидии, так и со стороны Индустриального партнера. Получатель субсидии и Индустриальный партнер совместно иницируют привлечение экспертов. По результатам проведения экспертизы формируется протокол проведения экспертизы, в котором излагаются заключения экспертов и рекомендации.

2 Общие требования к условиям, обеспечению и проведению испытаний

2.1 Место проведения испытаний

2.2.1 Испытания проводятся на стендовой установке в открытом распределительном устройстве трансформаторной подстанции на уровне напряжения 35 кВ совместно с оборудованием подстанции 110/35/10 кВ “Шербакульская” ОАО “МРСК Сибири” Филиал “Омскэнерго”.

2.2 Требования к средствам проведения испытаний

2.2.1 Перечень средств проведения испытаний приведён в таблице Д.1.

Таблица Д.1 – Перечень средств для проведения испытаний

№	Наименование средства измерения, оборудования	Краткая техническая характеристика	Количество
1	Анализатор качества электроэнергии Metrel MI 2792A	Диапазон измерения тока до 6 кА (погрешность измерения $\pm 0,25\%$); Диапазон измерения напряжения 20-1500 В (погрешность $\pm 0,1\%$ $U_{ном}$).	1
2	Секундомер СОП-пр.-2а-3	Диапазон измерения времени 30 мин, класс точности 2	1
3	Мегоомметр Ф-4103	Класс точности 1.5. Диапазон 0-50 000 МОм.	1
4	Конденсаторы КЭПО-10,5-7-2У1	$C = 0,2021$ мкФ	6

Продолжение таблицы Д.1

5	Конденсатор КЭП1-10,5-112,5-2У1	$C = 3,25 \text{ мкФ}$	6
6	Устройство для имитации дугового перемежающего замыкания	-	1
7	Устройство для имитации переходного сопротивления	Диапазон значений переходного сопротивления от 0,1 до 10 кОм	1
8	Переносное заземление	Напряжение 35 кВ	1
9	Подвесные крановые весы ВСК-В	Диапазон измерения до 5 т	1
10	Трансформатор тока ТТИ-А 30/5А	Класс точности 0.5	1
<p>Примечания</p> <p>1 Измерительные приборы и оборудование, применяемые при испытаниях, должны пройти государственную поверку.</p> <p>2 Указанные в перечне стандартные измерительные приборы и оборудование могут быть заменены аналогичными, обеспечивающими необходимую точность измерения.</p>			

2.2.2 Средства измерений, указанные в таблице Д.1, могут быть заменены другими, обеспечивающими требуемую точность измерений.

2.2.3 Средства измерений, подлежащие государственному метрологическому контролю и надзору, должны быть поверены, а не подлежащие государственному метрологическому контролю и надзору – калиброваны или поверены.

2.3 Требования к условиям проведения испытаний

Испытания проводятся в составе стендовой установки в реальных климатических условиях.

2.4 Требования к подготовке объекта испытаний

2.4.1 Перед проведением стендовых испытаний объекта должны быть проведены испытания в лаборатории ОмГТУ.

2.5 Требования к обслуживанию объекта испытаний в процессе испытаний

В процессе испытаний производится контроль схем подключения оборудования и его работоспособности.

Все работы во время испытаний производятся в соответствии с требованиями безопасности выполнения работ в составе электроустановок.

2.6 Требования к порядку работы на объекте испытаний по завершении испытаний

После окончания испытаний необходимо произвести осмотр объекта испытания и выполнить все необходимые работы по демонтажу в соответствии с требованиями безопасности выполнения работ в составе электроустановок.

2.7 Требования к персоналу, осуществляющему подготовку к испытаниям и испытания

К проведению испытаний допускается персонал, прошедший обучение и (при необходимости) аттестацию, изучивший эксплуатационную документацию объекта испытаний, подготовленный в соответствии с «Правилами технической эксплуатации электроустановок потребителей» и «Правил техники безопасности при эксплуатации электроустановок потребителей» и имеющий степень аттестации по электробезопасности не ниже III-ей группы.

При проведении работ при проверке и испытаниях персонал обязан соблюдать правила техники безопасности согласно «Правилам технической эксплуатации электроустановок потребителей» и «Правилам техники безопасности при эксплуатации электроустановок потребителей».

3 Требования безопасности

3.1 Требования безопасности при подготовке, проведении работ и выполнении работ по завершению испытаний выполнять в соответствии с правилами техники безопасности согласно «Правилам технической эксплуатации электроустановок потребителей» и «Правилам техники безопасности при эксплуатации электроустановок потребителей».

4 Программа испытаний

Таблица Д.2 – Определяемые показатели и точность их измерений:

Пункт программы испытаний	Наименование показателя	Пункт требований ТЗ	Ед. изм.	Номинальное значение	Предельные отклонения	Пункт методики
4.1	Проверка технической документации на соответствие установленной комплектности	-	-	-	-	6.1
4.2	Проверка соответствия объекта испытаний его конструкторской документации	6.1.3.1-6.1.3.4	-	-	-	6.2
4.3	Разработанные технические решения должны обеспечить ликвидацию в сети однофазного замыкания на землю в среднем в течении	4.3.1	минуты	1	-	6.3
4.4	Разработанные технические решения должны обеспечить минимальное время определения поврежденного фидера при однофазном замыкании на землю, не более	4.3.1	мс	50	-	6.4

Продолжение таблицы Д.2

Пункт программы испытаний	Наименование показателя	Пункт требований ТЗ	Ед. изм.	Номинальное значение	Предельные отклонения	Пункт методики
4.5	Разработанные технические решения должны обеспечить устойчивую работу при однофазных замыканиях на землю через большие сопротивления заземления более чем (случаев)	4.3.1	%	75	-	6.5
4.6	Разработанные технические решения должны обеспечить устойчивую работу при однофазных замыканиях на землю через сопротивления 0,1-10 кОм	4.4.2.3	-	-	-	6.6
4.7	Разработанные технические решения должны обеспечить устойчивую работу при однофазных замыканиях и емкости сети 0,1-1,5 мкФ	4.4.2.3	-	-	-	6.7
4.8	Разработанные технические решения должны обеспечить устойчивую работу при перемежающихся дуговых замыканиях более чем (случаев)	4.3.1	%	90	-	6.8
4.9	Номинальное напряжение электрической сети	4.4.3.3	кВ	35	-	6.9
4.10	Емкостный ток однофазного замыкания на землю в электрической сети	4.4.3.3	А	-	2-25	6.10
4.11	Номинальное напряжение ДГР	4.4.1.3	кВ	35	-	6.11
4.12	Диапазон непрерывного изменения значения тока ДГР	4.4.1.3	А	20	2-24	6.12
4.13	Потери в ДГР при номинальном токе напряжении и частоте, не более	4.4.1.3	кВт	10	-	6.13
4.14	Частота сети при работе ДГР	4.4.1.3	Гц	50	-	6.14
4.15	Экспериментальный образец управляемого дугогасительного реактора должен состоять из: управляемого дугогасительного реактора, обеспечивающего компенсацию емкостного тока сети в заданном диапазоне регулирования; системы управления дугогасящим реактором; программного обеспечения системы управления дугогасящим реактором	4.4.1.1	-	-	-	6.15

Пункт программы испытаний	Наименование показателя	Пункт требований ТЗ	Ед. изм.	Номинальное значение	Предельные отклонения	Пункт методики
4.16	Управляемый дугогасительный реактор должен обеспечивать возможность плавного регулирования тока компенсации	4.4.1.2	-	-	-	6.16
4.17	Система управления должна ДГР должна автоматизировать определение емкости распределительной электрической сети, подстройку ДГР, фиксацию возникновения однофазного замыкания на землю в сети, определение поврежденного фидера.	4.4.1.2	-	-	-	6.17
4.18	Программное обеспечение предназначено для согласованного взаимодействия компонентов системы управления реактором и селективного определения поврежденного фидера и автоматизацию её работы в процессе испытаний и эксплуатации.	4.4.1.2	-	-	-	6.18
4.19	Масса ДГР, не более	4.4.1.3	т	5		6.19

5 Режимы испытаний

5.1 Порядок испытаний

Для проведения испытаний приказом руководителя Получателя субсидии назначается комиссия.

Испытания проводятся в соответствии с планом-графиком, утверждаемым руководителем Получателя субсидии.

Последовательность проведения испытаний может быть изменена по решению комиссии.

5.2 Правила регулировки (настройки) в процессе подготовки объекта испытаний к испытаниям.

Испытания проводить на подготовленных и проверенных экспериментальных образцах.

5.3 Ограничения и другие указания, которые необходимо выполнять на всех или на отдельных режимах испытаний

Испытания прекращаются в случаях:

- несоответствия получаемых результатов требованиям ТЗ;

- неисправности объекта испытаний или другого оборудования, используемого во время испытаний.

5.4 Условия перерыва, аннулирования и возобновления испытаний на всех или на отдельных режимах

Необходимость, условия и порядок перерыва, аннулирования или прекращения испытаний определяется комиссией.

6 Методы испытаний

6.1 Проверка по п. 4.1 Программы выполняется следующим образом.

Проверяется соответствие технической документации на объект испытаний комплектности, приведенной в ТЗ.

Комплект технической документации считается выдержавшим испытание, если комплектность и качество соответствует требованиям, приведенным в п.6.1.3.1-6.1.3.4 ТЗ.

6.2 Проверка по п. 4.2. Программы выполняется следующим образом.

Проверяется соответствие объекта испытаний эскизной КД.

Объект испытаний считается выдержавшим проверку, если он соответствует эскизной КД.

6.3 Испытание по п. 4.3 Программы выполняется следующим образом.

6.3.1 Испытание проводить на экспериментальной (стендовой) установке.

6.3.2 Состав и описание работы экспериментальной (стендовой) установки приведены в документе: “Экспериментальная установка. Инструкция по эксплуатации”.

6.3.3 Для проведения испытаний подключить оборудование в соответствии со схемой, приведенной на рисунке Д.1. Установку оборудования проводить при отключенном напряжении в соответствии с правилами безопасности п.3.1 настоящей ПИМ испытаний. Внешний вид СУ ДГР и системы управления поврежденного фидера приведен на рисунке Д.2.

Для получения эквивалентной емкости сети 0,1 мкФ установить последовательно два конденсатора КЭПО-10,5-7-2У1 и соединить с землей.

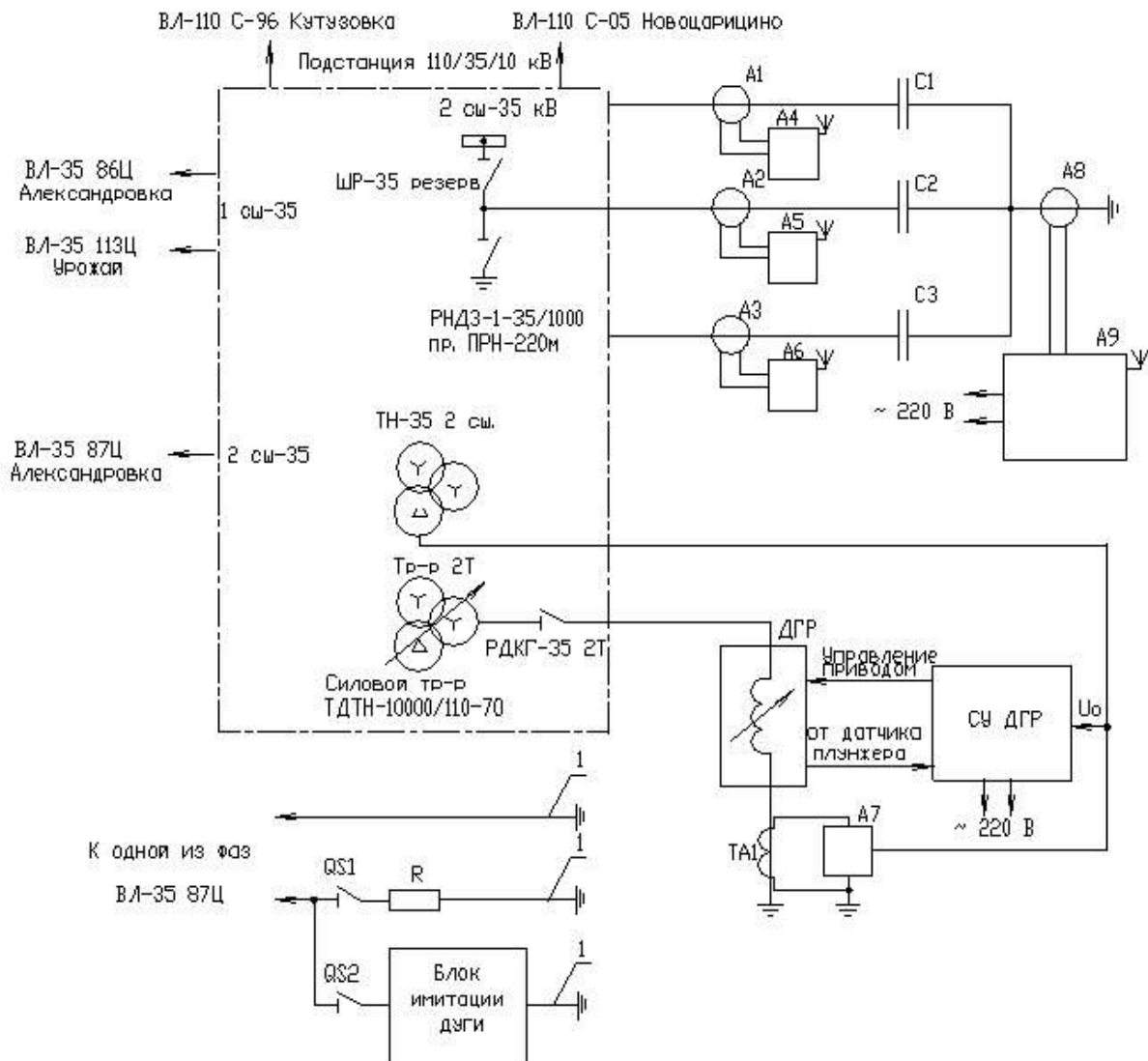
6.3.4 Подать напряжение 35 кВ на объект испытаний и блок имитации емкости и замыкания в сети (включить ШР-35 и РДКГ-35).

6.3.5 Подключить цепи питания ~ 220 В к СУ и устройству определения поврежденного фидера.

6.3.6 Проверить индикацию устройства определения поврежденного фидера. На индикаторе устройства должна присутствовать информация об отсутствии замыкания на землю в сети.

6.3.7 Проверить работу СУ. В нормальном режиме работы сети должна производиться автоматическая настройка ДГР в резонанс с емкостью сети. Контроль настройки в резонанс

осуществлять по сигналу U_o (по максимальному значению). Измерение проводить с помощью прибора А7 используя канал напряжения (рисунок Д.1).



А1-А3 – датчики тока⁽¹⁾

А4-А6 – модемы⁽¹⁾

А7 - анализатор качества электроэнергии

А8 – индуктор⁽¹⁾

А9 – устройство определения поврежденного фидера

ТА1 – трансформатор тока

1 – переносное заземление

Примечание - ⁽¹⁾ - оборудование измерительного блока системы определения поврежденного фидера

Перечень типов использованных приборов приведен в протоколах испытаний (приложение Д).

Рисунок Д.1 Установка оборудования для испытаний



Рисунок Г.2 – Внешний вид системы управления ДГР

6.3.8 Снять напряжение 35 кВ с объекта испытаний и блока имитации емкости и замыкания в сети (отключить ШР-35 и РДКГ-35).

6.3.9 Шунтировать на землю одну из фаз ВЛ-35 87Ц с помощью переносного заземления.

6.3.10 Выполнить п.6.3.4.

6.3.11 Включить секундомер.

6.3.12 Проверить индикацию устройства определения поврежденного фидера. На индикаторе устройства должна появиться информация о номере поврежденного фидера.

6.3.13 Отключить поврежденный фидер и выключить секундомер.

Технические решения считаются выдержавшими испытание, если значение времени, измеренного секундомером, не превышает указанного в п.4.3 программы испытаний.

6.4 Испытание по п. 4.4 Программы выполняют следующим образом.

6.4.1 Выполнить п.6.3.4, 6.3.6. Определить время определения поврежденного фидера, по показаниям устройства определения поврежденного фидера.

6.4.2 Технические решения считаются выдержавшими испытание, если значение времени определения поврежденного фидера не превышает 50 мс.

6.5 Испытание по п. 4.5 Программы выполняют следующим образом.

6.5.1 Выполнить п.6.3.8.

6.5.2 Снять заземление с одной из фаз линии ВЛ-35 87Ц.

6.5.3 Включить разъединитель QS1 (рисунок Д.1).

Разъединитель QS2 во время испытаний должен быть разомкнут.

Для данного испытания использовать сопротивление R из диапазона от 1 до 10 кОм.

6.5.4 Выполнить п.6.3.4.

6.5.5 Проверить индикацию устройства определения поврежденного фидера. На индикаторе устройства должна появиться информация о номере поврежденного фидера.

6.5.6 Отключить емкости (отключить ШР-35).

6.5.7 Выполнить п.6.3.6.

6.5.8 Повторить действия п.6.5.4-6.5.7 - 9 раз.

6.5.9 Зафиксировать количество верных определений поврежденного фидера после каждого выполнения п.6.5.4-6.5.7.

6.5.10 Технические решения считаются выдержавшими испытание, если верное определение поврежденного фидера было произведено не менее чем в 75 % случаев замыкания через переходное сопротивление (требование п.4.5 программы испытаний).

6.6 Испытание по п. 4.6 Программы выполняется следующим образом.

6.6.1 Выполнить п.6.3.8.

6.6.2 Повторить п.6.5.4-6.5.7 с контролем работы СУ. После выполнения п.6.4.4 проверить, что СУ производит автоматическую настройку тока ДГР, в соответствии с током замыкания на землю. Измерить значение тока ДГР по прибору А7, приведенному на рисунке Д.1. Сравнить измеренное значение с расчетным.

6.6.3 Заменить сопротивление R на сопротивление значением от 100 до 500 Ом.

6.6.4 Выполнить п.6.6.2.

6.6.5 Технические решения считаются выдержавшими испытание, если обеспечивается устойчивая работа СУ и верное определение поврежденного фидера при замыканиях через переходные сопротивления по п.4.5 программы испытаний.

6.7 Испытание по п. 4.7 Программы выполняется следующим образом.

6.7.1 Выполнить п.6.3.8.

6.7.2 Заменить конденсаторы КЭПО-10,5-112,5-2У1 (6 шт.) на КЭПО-10,5-112,5-2У1 (6 шт.) для создания емкости фазы на землю 1,5 мкФ.

6.7.3 Повторить п.6.5,6.6.

6.7.4 Технические решения считаются выдержавшими испытание, если обеспечивается устойчивая работа СУ и верное определение поврежденного фидера при однофазном замыкании на землю по п. 4.7 программы испытаний.

6.8 Испытание по п. 4.8 Программы выполняется следующим образом.

6.8.1 Выполнить п.6.3.8.

6.8.2 Отключить разъединитель QS1 (рисунок Д.1).

6.8.3 Включить разъединитель QS2.

6.8.4 Выполнить п.6.3.4, 6.5.5.

6.8.5 Повторить действия п.6.8.1-6.8.3 - 9 раз.

6.8.6 Технические решения считаются выдержавшими испытание, если обеспечивается устойчивая работа при перемежающихся дуговых замыканиях по п.4.8 программы испытаний.

6.9 Испытание по п. 4.9 Программы выполняется следующим образом.

6.9.1 Контроль напряжения электрической сети проводить по вольтметру, установленному в подстанции 110/35/10 кВ.

6.9.2 Условия испытаний соответствуют требованиям п.4.9 программы испытаний, если значение напряжения находится в диапазоне $35 \pm 1,75$ кВ.

6.10 Испытание по п. 4.10 Программы выполняется следующим образом.

6.10.1 Емкостный ток однофазного замыкания на землю во время испытаний определяется расчетным способом.

6.10.2 Условия испытаний соответствуют требованиям п. 4.10 программы испытаний, если значение емкостного тока находится в диапазоне от 2 до 25 А.

6.11 Испытание по п. 4.11 Программы выполняется следующим образом.

6.11.1 Испытания проводить аналогично п.6.9.

6.11.2 Номинальное напряжение ДГР соответствуют требованиям п.4.11 программы испытаний, если значение напряжения находится в диапазоне $35 \pm 1,75$ кВ.

6.12 Испытание по п. 4.12 Программы выполняется следующим образом.

6.12.1 При выполнении испытаний п.6.7 по прибору А7 (рисунок Д.1) контролировать значение тока в цепи ДГР.

6.12.2 Объект испытаний соответствует требованиям п.4.11 программы испытаний, если значение тока находилось в диапазоне от 2 до 24 А.

6.13 Испытание по п. 4.13 Программы выполняется следующим образом.

6.13.1 Контроль потерь в ДГР выполнять расчетным способом. Определить суммарные потери в меди и стали ДГР и сравнить с требованиями п.4.13 программы испытаний.

6.13.2 Объект испытаний соответствует требованиям п.4.13 программы испытаний, если значение потерь в ДГР не превышает 10 кВт.

6.14 Испытание по п. 4.14 Программы выполняется следующим образом.

6.14.1 Контроль частоты сети при работе ДГР проводить по прибору А7 (рисунок Д.1).

Объект испытаний соответствует требованиям п.4.14 программы испытаний, если значение частоты находилось в диапазоне $50 \pm 0,2$ Гц.

6.15 Испытание по п. 4.15 Программы выполняется следующим образом.

Объект испытаний соответствует требованиям п.4.15 если он состоит из управляемого дугогасительного реактора, системы управления дугогасящим реактором и программного обеспечения системы управления дугогасящим реактором.

6.16 Испытание по п. 4.16 Программы выполняется следующим образом.

При выполнении п.6.3-6.8 контролировать, что обеспечивается плавная настройка ДГР.

6.17 Испытание по п. 4.17 Программы выполняется следующим образом.

6.17.1 При выполнении п.6.3-6.8 контролировать, что СУ автоматически выполняют подстройку ДГР, фиксирует возникновение однофазного замыкания, а система определения поврежденного фидера автоматически определяет поврежденный фидер.

6.17.2 СУ и система определения поврежденного фидера соответствует требованиям п.4.17 программы испытаний, если производится автоматическая настройка ДГР, определяется возникновение замыкания и автоматически определяется поврежденный фидер.

6.18 Испытание по п. 4.16 Программы выполняется следующим образом.

6.18.1 Во время проведения испытаний контролируется работа программного обеспечения СУ и системы определения поврежденного фидера.

6.18.2 СУ и система определения поврежденного фидера соответствует требованиям п.4.18 программы испытаний, если во время проведения испытаний программное обеспечение выполняет свои функции и не происходили сбои и ошибки работы.

6.19 Испытание по п. 4.19 Программы выполняется следующим образом.

6.19.1 Измерить массу ДГР с помощью весов (таблица Д.1).

6.19.2 Экспериментальный образец ДГР соответствует требованиям п.4.18.2, если его масса не превышает 5 тонн.

7 Отчётность

7.1 Заданные и фактические данные, полученные при испытаниях по каждому пункту программы, оформляются протоколами, представляемыми на заседание комиссии.

В протоколы вносятся все первичные данные, получаемые в процессе испытаний, и затем – результаты расчетов или иной обработки.

7.2 По результатам испытаний составляется акт испытаний.

Акт испытаний должен содержать:

- подтверждение выполнения программы испытаний;
- оценку результатов испытаний с конкретными точными формулировками, отражающими соответствие объекта испытаний требованиям ТЗ;
- выводы по результатам испытаний;
- заключение о возможности предъявления объекта испытаний на следующий этап испытаний;

К акту прилагаются протоколы испытаний.

7.3 Первичные материалы испытаний хранятся у Получателя субсидии в течение 10 лет со дня окончания испытаний.

7.4 Отчётная документация рассылается в следующие адреса:

- Минобрнауки России;
- Индустриальному партнёру.