

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
им. Р.Е. Алексеева

На правах рукописи



Осокин Владислав Юрьевич

**МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА ПОВРЕЖДЕНИЯ
ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ПРИ ЗАМЫКАНИЯХ НА ЗЕМЛЮ В
СЕТЯХ С ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ**

Специальность 2.4.2 – Электротехнические комплексы и системы

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук,
профессор Куликов А.Л.

Нижний Новгород, 2024 г.

СОДЕРЖАНИЕ

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ.....	4
ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1 АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ПОВРЕЖДЕНИЙ В СЕТЯХ С ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ И ОСНОВНЫХ МЕТОДОВ ОМП ЛЭП ПРИ ЗАМЫКАНИЯХ НА ЗЕМЛЮ	10
1.1 Виды повреждений в сетях с малым током замыкания на землю	10
1.2 Анализ основных методов определения места повреждения ЛЭП в сетях среднего напряжения	13
1.3 Дистанционные методы определения места повреждения ЛЭП по параметрам аварийного режима при замыканиях на землю в сетях с изолированной нейтралью.....	16
1.4 Выводы по главе.....	42
ГЛАВА 2 РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА ПОВРЕЖДЕНИЯ ПО ПАРАМЕТРАМ АВАРИЙНОГО РЕЖИМА ПРИ ДВОЙНЫХ ЗАМЫКАНИЯХ НА ЗЕМЛЮ	43
2.1 Определения места повреждения при двойных замыканиях на землю на одной линии	44
2.2 Определение места повреждения при двойных замыканиях на землю на разных линиях.....	48
2.3 Имитационное моделирование двойных замыканий на землю	51
2.4 Уточняющие алгоритмы определения места повреждений ЛЭП при двойных замыканиях на землю	54
2.5 Выводы по главе.....	74
ГЛАВА 3 ПРИМЕНЕНИЕ КРАТКОВРЕМЕННОГО ДВОЙНОГО ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ АЛГОРИТМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА ПОВРЕЖДЕНИЯ ЛЭП 6–35 КВ ПРИ ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЯХ НА ЗЕМЛЮ	75
3.1 Определения места повреждения при однофазном замыкании на землю на воздушной линии электропередачи	75
3.2 Имитационное моделирование однофазных замыканий на землю	83
3.3 Выводы по главе.....	85
ГЛАВА 4 ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА НАЛОЖЕНИЯ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ АЛГОРИТМОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТ ПОВРЕЖДЕНИЙ В СЕТЯХ С ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ	86
4.1 Алгоритм определения места повреждения при двойных замыканиях на землю на одной линии	88

4.2	Алгоритм определение места повреждения при двойных замыканиях на землю на разных линиях.....	95
4.3	Алгоритм определение места повреждения при однофазном замыкании на землю	101
4.4	Выводы по главе	107
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	108
	ЛИТЕРАТУРА.....	109
	ПРИЛОЖЕНИЕ А ПРИМЕР РЕАЛИЗАЦИИ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ СЕТЕВОГО РАЙОНА	127
	ПРИЛОЖЕНИЕ Б РЕЗУЛЬТАТЫ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ И АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ.....	128

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

ДвЗЗ – двойное замыкание на землю;

ДПрОЗЗ – длительно существующие дуговые прерывистые однофазные замыкания на землю;

ВЛ – воздушная линия электропередачи;

ГИС – геоинформационная система;

ИМО – имитационная модель объекта;

ИЭУ – интеллектуальное электронное устройство;

КЗ – короткое замыкание;

КЛ – кабельная линия;

КрОЗЗ – кратковременные самоустраняющиеся однофазные замыкания на землю;

ЛЭП – линия электропередачи;

МП – место повреждения;

МСС – метод симметричных составляющих;

ОЗЗ – однофазное замыкание на землю;

ОМП – определение места повреждения;

ПАР – параметры аварийного режима;

ПК – программный комплекс;

ПО – программное обеспечение;

ПС – подстанция;

ПТК – программно-технический комплекс;

РАС – регистратор аварийных событий;

РЗаА – релейная защита и автоматика;

ФП – фиксирующий прибор;

ЭТК – электротехнический комплекс.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы диссертации. Значительную часть электроэнергетической системы России занимают распределительные сети 6–35 кВ которые характеризуются большой протяженностью и разветвленностью. Высокая степень износа сетей среднего напряжения приводит к частым аварийным отключениям, вызывающим недоотпуск электроэнергии и необходимость проведения ремонтно-восстановительных работ. Локализация поврежденного участка электрической сети требует больших временных затрат, в связи с этим точное и быстрое определение места повреждения (ОМП) является актуальной задачей.

Одним из наиболее распространенных видов повреждений в распределительных электрических сетях среднего напряжения, являются однофазные замыкания на землю (ОЗЗ), при этом, возникающие при ОЗЗ перенапряжения неповрежденных фаз способствуют пробоем изоляции и возможности перехода в многофазные замыкания на землю.

Ввиду особенностей аварийных режимов в сетях среднего напряжения затруднена разработка точных алгоритмов ОМП при ОЗЗ и двойных замыканиях на землю (ДвЗЗ), возникающих вследствие перенапряжения неповрежденных фаз. Произвольная конфигурация электрических сетей, особый режим заземления нейтрали, а также отсутствие возможности осуществления многосторонних замеров аварийных величин, накладывают определенные ограничения на реализацию алгоритмов ОМП и усложняют разработку универсальных алгоритмов ОМП, причем технические решения, как правило, ограничены необходимостью применения односторонних замеров параметров аварийного режима.

Для реализации функции ОМП линий электропередачи (ЛЭП) могут применяться различные комплексы электротехнического оборудования, которые учитывают разные факторы и обеспечивают высокую точность расчета расстояния до места повреждения.

Степень разработанности. Разработке новых алгоритмов ОМП ЛЭП уделяется большое внимание. Значительный вклад в развитие методов ОМП внесли российские и зарубежные ученые и специалисты: Арцишевский Я.Л., Аржанников Е.А., Беляков Ю.С., Борухман В.А., Вайнштейн Р. А., Висящев А.Н., Гловацкий В. Г., Козлов В.Н., Куликов А.Л., Кудрявцев А.А., Кузнецов А.П., Лачугин В.Ф., Лямец Ю.Я., Малый А.С., Минуллин Р.Г., Мисриханов М.Ш., Нагай В.И., Нудельман Г.С., Петрухин А.А., Федотов А.И., Филатова Г.А., Чекарьков Д. М., Шалыт Г.М., Шуин В.А., Agarval R.A., Blackburn J.L, Christopoulous C., Gale P.F., Gilbert J.G., Girgis A.A, Kohlas J., Morrison I.F., Izykowski J., Johns A.T., Rockefeller G.D., Takagi T. и другие. Несмотря на значительный объем проводимых исследований, научный поиск точных алгоритмов оценки расстояния до повреждения ЛЭП продолжает оставаться актуальным. Это связано, прежде всего, с множеством влияющих на точность случайных и неслучайных факторов и необходимостью адаптации к ним различных методов ОМП ЛЭП.

Следует отметить отсутствие в настоящее время в эксплуатации, на предприятии электрических сетей, устройств для реализации ОМП при однофазных и двойных замыканиях на землю.

Целью работы является повышение точности определения места повреждения ЛЭП при однофазных и двойных замыканиях на землю путем разработки новых алгоритмов на основе имитационных моделей электротехнических комплексов.

Объектом исследования являются электротехнические комплексы, включающие одну или две линии электропередачи, в сетях напряжением 6-35 кВ с изолированной нейтралью.

Предметом исследования являются методы повышения точности определения места повреждения ЛЭП при однофазных и двойных замыканиях на землю.

Основные задачи исследования. Для достижения поставленной цели в диссертации реализован следующий комплекс задач:

1. Проведение сопоставительного анализа существующих алгоритмов локализации замыканий на землю в сетях 6–35 кВ.
2. Разработка статистических имитационных моделей электротехнических комплексов для имитации ОЗЗ и ДвЗЗ в распределительных сетях с изолированной нейтралью.
3. Разработка новых алгоритмов ОМП ЛЭП при ДвЗЗ на основе данных имитационного моделирования электротехнических комплексов.
4. Разработка новых алгоритмов ОМП ЛЭП при ОЗЗ за счет применения кратковременных ДвЗЗ.
5. Анализ возможностей повышения точности алгоритмов ОМП ЛЭП при замыканиях на землю путем использования параметров аварийного и нормального режимов, а также метода наложения.

Представленные в диссертационной работе результаты, отвечают следующим пунктам направлений исследований паспорта научной специальности 2.4.2 – «Электротехнические комплексы и системы»:

- п.1. Развитие общей теории электротехнических комплексов и систем, анализ системных свойств и связей, физическое, математическое, имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем, включая электромеханические, электромагнитные преобразователи энергии и электрические аппараты, системы электропривода, электроснабжения и электрооборудования.

– п.4. Исследование работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов, систем и их компонентов в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях, диагностика электротехнических комплексов.

Методы исследований. Разработанные в диссертации научные положения основываются на комплексе теоретических и экспериментальных достижений в области теоретических основ электротехники, теории электромагнитных и электромеханических переходных процессов, имитационного моделирования и математической статистики.

Научная новизна

1. Предложены алгоритмы ОМП воздушных ЛЭП 6–35 кВ при ДвЗЗ как на одной, так и на разных линиях с использованием фазных координат, отличающиеся до трех раз более высокой точностью в сравнении с существующими расчетными методами.

2. Разработаны методы повышения точности ОМП воздушных ЛЭП в сетях с изолированной нейтралью, отличающиеся применением итерационных расчетов и имитационного моделирования.

3. Разработаны новые алгоритмы ОМП при ОЗЗ в сетях с изолированной нейтралью, отличающиеся использованием балластного сопротивления и кратковременного введения ДвЗЗ.

4. Для алгоритмов ОМП при ДвЗЗ и ОЗЗ воздушных ЛЭП предложено использование метода наложения, позволяющего повысить точность и обеспечить применимость алгоритмов в сетях произвольной конфигурации.

Теоретическая и практическая значимость работы

Материалы исследований используются в учебном процессе Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, реализованы в фундаментальном научном исследовании «Разработка и опытно-промышленное внедрение программно-аппаратного комплекса определения мест повреждений в распределительных сетях при однофазных и двойных замыканиях на землю» (договор № 19-38-90144 о предоставлении гранта от 27.08.2019 г.), а также в прикладных научных исследованиях «Разработка интеллектуальной релейной защиты с характеристиками, не зависящими от режимов работы активно-адаптивной электрической сети» (соглашение № 14.577.21.0124 о предоставлении субсидии от 20.10.2014 г.) и «Разработка технических решений программно-аппаратного комплекса цифровой подстанции с использованием отечественной элементной базы и операционных систем в составе устройств уровня присоединения и среднего уровня» (соглашение № 14.577.21.0244 о предоставлении субсидии от 26.09.2017 г.). Предложения и выводы диссертационной работы использованы при разработке терминалов защит линий производства АО «НИПОМ» (г. Дзержинск, Нижегородская область), терминалов релейной защиты отходящих присоединений 6–35 кВ ООО НПП «АЛИМП» (г. Нижний Новгород), а также могут быть реализованы в устройствах любого производителя путем обновления программного обеспечения.

Степень достоверности результатов. Достоверность полученных результатов подтверждается корректностью разработанных математических моделей, сходимостью их результатов с результатами, полученными в других прикладных пакетах для имитационного моделирования, а также сопоставление полученных результатов с исследованиями других авторов.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Методы повышения точности ОМП воздушных ЛЭП 6–35 кВ, основанные на применении имитационного моделирования и итерационных расчетов.

2. Новые алгоритмы одностороннего ОМП воздушных ЛЭП повышенной точности при ДвЗЗ в сетях с изолированной нейтралью.

3. Новые алгоритмы одностороннего ОМП воздушных ЛЭП 6–35 кВ повышенной точности при ОЗЗ с использованием кратковременных ДвЗЗ.

4. Результаты применения метода наложения для повышения точности ОМП воздушных ЛЭП при ОЗЗ и ДвЗЗ в сетях с изолированной нейтралью.

Личный вклад аспиранта

Постановка и формализация задач, разработка теоретических и методических положений, математических моделей и методов, проведение имитационного моделирования, анализ полученных результатов.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались на научно-технических конференциях: IV Всероссийской (XXXVII региональной) научно-технической конференции «Актуальные проблемы электроэнергетики» (г. Нижний Новгород, НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2018 г.), Международный научный семинар им. Ю.Н.Руденко, 90-е заседание семинара на тему «Надежность развивающихся систем энергетики» (г. Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2018 г.), Международный научный семинар им. Ю.Н.Руденко, 91-е заседание семинара на тему «Методические и практические проблемы надежности систем энергетики» (г. Ташкент, ИСЭМ СО РАН, 2019 г.), Пятнадцатая всероссийская (седьмая международная) научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2020» (г. Иваново, ИГЭУ, 2020г.), Международный научный семинар им. Ю.Н.Руденко, 92-е заседание семинара на тему «Надежность энергоснабжения потребителей в условиях их цифровизации» (г. Казань, ИСЭМ СО РАН, 2020 г.).

Опубликованные работы

По теме диссертации опубликовано 33 работы. Среди них 9 статей в изданиях, входящих в перечень рекомендованных ВАК, 7 статей в изданиях, индексируемых в международной реферативной базе данных *Scopus*, а также 8 патентов на изобретение.

Структура и объем работы.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы из 205 наименований. Работа изложена на 138 страницах основного текста, иллюстрирована 63 рисунками и 16 таблицами.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-38-90144 «Разработка и опытно-промышленное внедрение программно-аппаратного комплекса определения мест повреждений в распределительных сетях при однофазных и двойных замыканиях на землю».

ГЛАВА 1 АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ПОВРЕЖДЕНИЙ В СЕТЯХ С ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ И ОСНОВНЫХ МЕТОДОВ ОМП ЛЭП ПРИ ЗАМЫКАНИЯХ НА ЗЕМЛЮ

Электрические сети среднего напряжения имеют различную конфигурацию и предусматривают работу как с изолированной нейтралью, так и с нейтралью заземленной через дугогасящий реактор или резистор. Режим заземления нейтрали в распределительных сетях обуславливает характер коротких замыканий на землю и величину протекающего тока. Замыкание фазы на землю в данных сетях не является аварийным и не требует немедленного отключения, однако, существует опасность попадания людей и животных под шаговое напряжение, а вследствие возникающих перенапряжений может произойти пробой неповрежденной фазы и развиться более серьезное повреждение.

1.1 Виды повреждений в сетях с малым током замыкания на землю

Однофазные замыкания на землю ($K^{(1)}$) являются преобладающим видом повреждений в распределительных сетях и составляют не менее 75% от общего их числа [1]. Данный вид замыкания возникает вследствие пробоя, перекрытия изоляции или обрыве провода. В сетях с заземленной нейтралью подобные замыкания вызывают отключение от релейной защиты поврежденной линии, однако в сетях, не имеющих глухого заземления, не являются аварийными и допускают работу в данном режиме в течение длительного времени.

С точки зрения характера повреждения, ОЗЗ можно разделить на следующие категории [2, 3]: *устойчивые замыкания*, характеризующиеся наличием в сигнале только периодической составляющей промышленной частоты и высших гармоник и *неустойчивые замыкания*, характеризующиеся преобладанием свободной составляющей переходного процесса с частотами от десятков герц до сотен килогерц.

Устойчивые замыкания характеризуются незначительным током в месте повреждения и не представляют опасности для поврежденной сети [5] поэтому, как правило, не отключаются устройствами релейной защиты, а сеть продолжает работу в таком режиме длительное время.

Неустойчивые замыкания принято подразделять на 2 разновидности: кратковременные самоустраняющиеся ($KpO33$) и длительно существующие дуговые прерывистые замыкания ($ДPrO33$). $KpO33$ сопровождаются пробоями изоляции, длительными бестоковыми паузами и в большинстве случаев предшествуют устойчивым замыканиям. Дуговые прерывистые замыкания характеризуются повторными зажиганиями дуги через небольшие интервалы времени при этом ОЗЗ сопровождается накоплением дополнительных зарядов на фазах и смещением нейтрали сети перед повторным зажиганием заземляющей дуги, так, что при каждом гашении дуги добавочный потенциал, накладывающийся на сеть, будет уменьшаться, уменьшая амплитуды бросков переходного тока. Такое дуговое ОЗЗ приобретает относительно

безопасный для сети и поврежденного элемента характер [6]. Наиболее опасными среди дуговых прерывистых замыканий (ДПрОЗЗ) являются дуговые перемежающиеся ОЗЗ (ДПОЗЗ), сопровождающиеся прерывистой формой кривой тока в дуге, накоплением дополнительного заряда на фазах сети и ростом перенапряжений на неповрежденных фазах при повторных замыканиях дуги.

Однофазные замыкания в сетях с изолированной нейтралью не вызывают искажения треугольника линейных напряжений, благодаря этому электроприемники не испытывают нарушения нормальной работы, поэтому функционирование элементов сети в данном режиме допускается (если отключение ОЗЗ не диктуется требованиями техники безопасности). Однако, выявление повреждения и его отключение необходимо, потому что потенциал неповрежденных фаз относительно земли возрастает до линейного значения, увеличивая перенапряжение неповрежденных фаз, вследствие смещения напряжения нейтрали на величину фазного напряжения (рисунок 1.1).

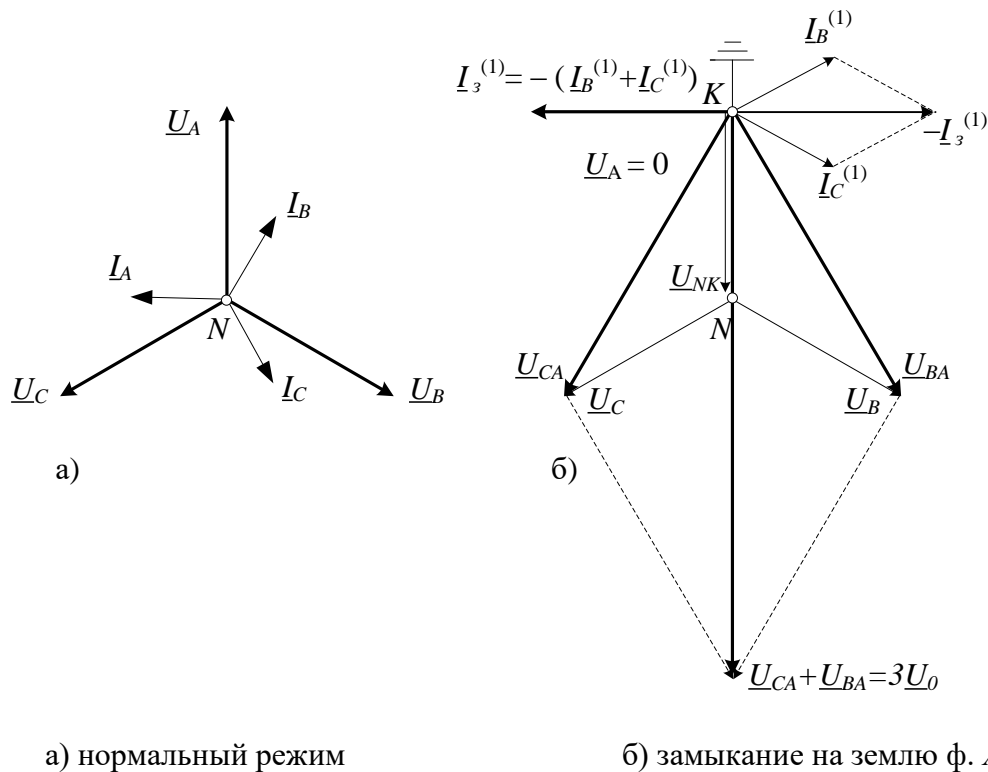


Рисунок 1.1 – Векторная диаграмма токов и напряжений при ОЗЗ в сети с изолированной нейтралью

В таком режиме к неповрежденным фазам приложено не только увеличенное напряжение, но и импульсные воздействия, связанные с неустойчивым горением дуги в месте замыкания. Амплитуда этих перенапряжений может превышать амплитуду рабочего напряжения в 2 – 3 раза. Вследствие перенапряжений, возникающих в местах с ослабленной изоляцией, однофазные замыкания способны перейти в двухфазные или двойные замыкания на землю.

Двойные короткие замыкания ($K_{дв}^{(1,1)}$) возникают в режиме ОЗЗ вследствие пробоя и перекрытия изоляции во второй точке, находящейся на некотором удалении от ОЗЗ. Второе повреждение может находиться в любой точке сети, в том числе и на другой линии электропередачи, находящейся под повышенным напряжением. В зависимости от взаимного расположения повреждений, можно выделить два типа двойных замыканий на землю.

В первом случае, замыкания на землю происходят на разных линиях, место первого находится на защищаемой линии, место второго – «за спиной». Во втором случае, оба повреждения находятся на одной линии.

Наличие второй точки замыкания позволяет определить контур для прохождения тока, который ограничен сопротивлением источника, участками линий, сопротивлением земли и переходным сопротивлением в месте КЗ. Значение тока при данном повреждении существенно превышает рабочие токи и с целью минимизации его воздействия, стремятся отключить одну из двух поврежденных линий и перейти в режим однофазного замыкания.

В случае возникновения **двух и трехфазных замыканий**, сопротивление контура протекания тока слишком мало и такие повреждения сопровождаются протеканием аварийных токов, требующих немедленного отключения.

Трехфазные замыкания ($K^{(3)}$) являются достаточно редким видом повреждений, однако, обладая большой величиной тока, являются расчетными для выбора выключателей по отключающей способности, а также для проверки коммутационных аппаратов и токопроводов по электродинамической и термической стойкости. Трехфазное КЗ обычно происходит вследствие падения опор ВЛ, обрывов провода ВЛ и его попадания на провода другой линии при их пересечении, а также не редки случаи включения линии с забытой после окончания ремонтных работ ремонтной закороткой.

Более частыми являются **двухфазные замыкания ($K^{(2)}$)**, которые возникают по причине схлестывания проводов, сбросе гололеда, набросов на ВЛ, пробоев изоляторов, повреждения изоляции двигателей и т.д. Данный вид замыканий приводит к нарушению симметрии сигнала, поэтому сопровождается наличием прямой и обратной последовательностей, при этом, значение токов двухфазных замыканий существенно превышает ток нагрузки. Разновидностью **двухфазного замыкания** является замыкание на землю ($K^{(1,1)}$), при этом, в сигнале появляется нулевая последовательность.

Обрывы являются весьма опасным видом повреждения и могут произойти как на воздушных, так и на кабельных линиях в сетях с малым током замыкания на землю. Причинами данных повреждений могут быть различные дефекты монтажа, климатические воздействия, производимые тяжелой техникой работы и т.д. При обрывах нарушается симметрия сигнала, что приводит к недопустимому нагреву, сохранивших крутящий момент, двигателей.

Таким образом, можно выделить следующую классификацию всех разновидностей повреждений, возникающих в сетях с малым током замыкания на землю 1.2.

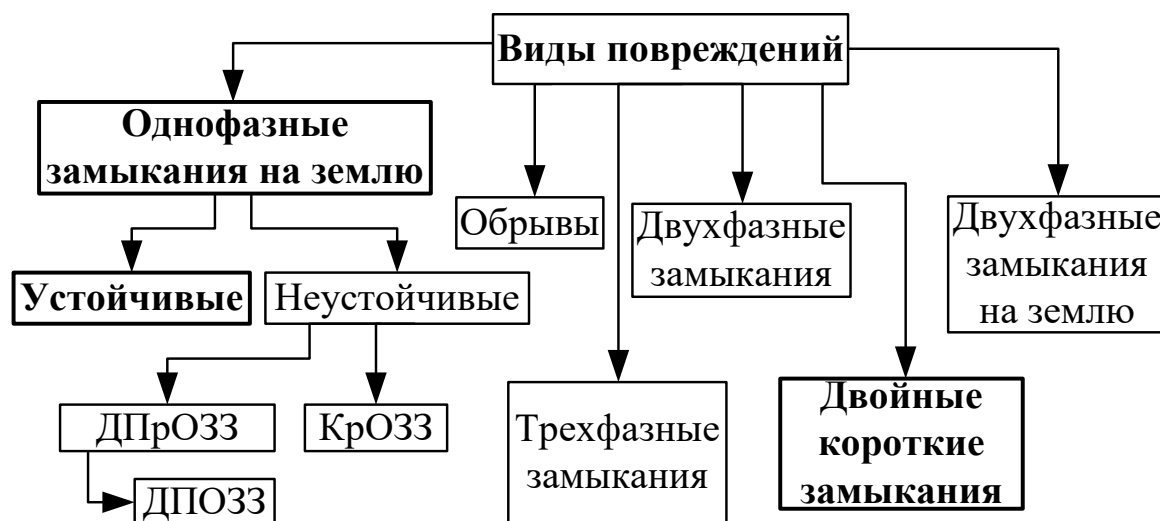


Рисунок 1.2 – Виды повреждений в сетях с малым током замыкания на землю

1.2 Анализ основных методов определения места повреждения ЛЭП в сетях среднего напряжения

Методы определения места повреждения на воздушных линиях могут существенно отличаться от методов, применяемых в кабельных сетях. Данные различия обусловлены особенностями конструктивного исполнения ЛЭП, что в свою очередь влияет на характер протекания замыканий.

Применяемые в России методы ОМП ЛЭП принято подразделять на две группы: дистанционные, подразумевающие использование устройств, указывающих расстояние до повреждения, и топографические, предполагающие непосредственный обход бригадой трассы ЛЭП [7 – 14]. Используется также другая классификация методов ОМП ЛЭП, в зависимости от частотного диапазона, применяемого в приборах (рисунок 1.3): низкочастотные (контроль частот от нуля до нескольких герц) и высокочастотные (десятки кГц и более).

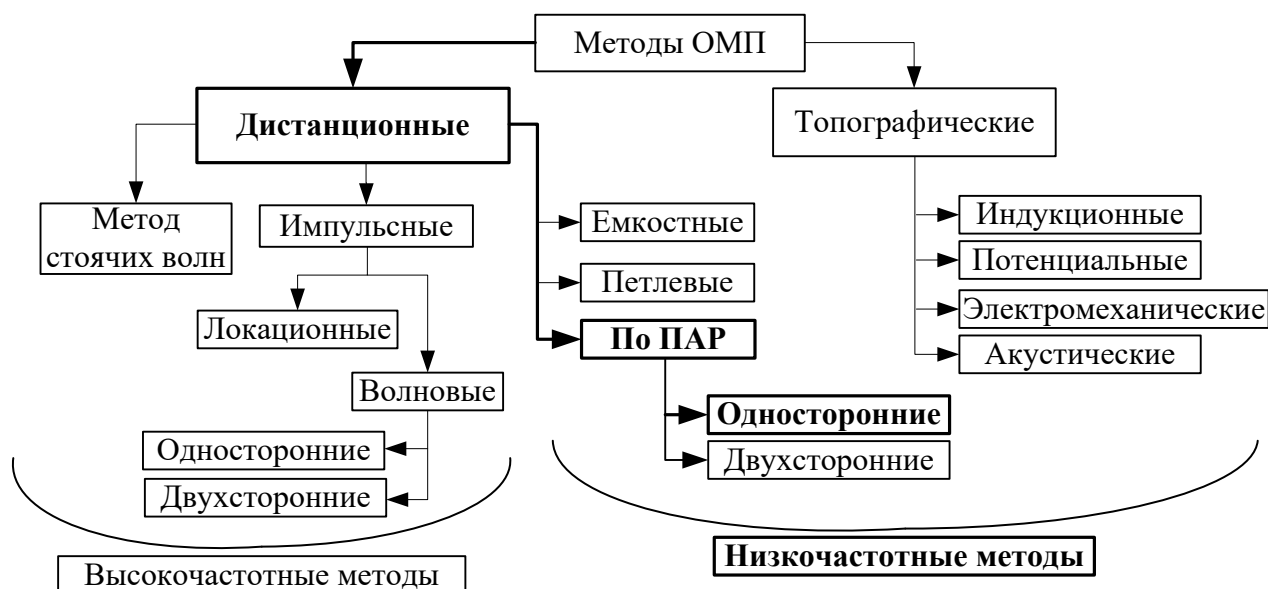


Рисунок 1.3 – Классификация методов ОМП ЛЭП сетей 6–35 кВ

Топографические методы ОМП применяются в устройствах, устанавливаемых на проводах или опорах ВЛ, относятся к низкочастотным методам идентификации и имеют следующую классификацию: *индукционные методы, потенциальные методы, электромеханические и акустические методы*. Топографические методы имеют высокую точность, однако подразумевают непосредственный обход трассы ЛЭП, с чем связаны большие временные затраты.

Индукционные методы обладают высокой точностью и применяются при поиске повреждения кабельных и воздушных линий. Принцип действия заключается в индикации специальным устройством характера изменения параметров магнитного поля, создаваемого протекающим по линии током. Для кабельных линий определение места повреждения производится с помощью специального генератора повышенной частоты, подключаемого после выделения и отключения поврежденного участка.

Потенциальные методы относятся к группе контактных методов и применяются для ОМП кабельных линий. Потенциальные методы являются вспомогательным средством для поиска повреждения на кабелях с металлической защитной оболочкой и основным для линий с пластмассовой защитной оболочкой. Принцип действия потенциальных методов следующий: заранее отключенный поврежденный кабель подключается к аккумулятору или выпрямительной установке, бригада перемещается по трассе кабельной линии с двумя контактными стержнями, в месте повреждения ток переходит с жилы на оболочку и начинает растекаться в земле, создавая разность потенциалов в месте повреждения, на которую реагирует устройство.

Электромеханические методы применяются на воздушных линиях сельскохозяйственного назначения 6–35 кВ, совместно с дистанционными методами,

определяющими зону обхода. Принцип их действия основывается на регистрации механических усилий, создаваемых за счет энергии тока коротких замыканий. На опорах воздушных линий устанавливаются специальные указатели, реагирующие на протекание аварийного тока выпадением блинкеров, состояние которых проверяется при обходе поврежденной линии.

Акустические методы относятся к группе контактных и применяются для ОМП кабельных сетей. Акустические методы практически универсальны и позволяют определять повреждения различного характера, их сущность заключается в улавливании акустических колебаний, появляющихся на поверхности грунта над механическими повреждениями, вызванными искровыми разрядами в канале. Искровой разряд в месте повреждения создается посредством специальных устройств, подключаемых к линии после ее отключения.

Дистанционные методы могут быть реализованы в качестве дополнительных функций в устройствах микропроцессорной релейной защиты линий, в регистраторах аварийных событий, а также как программные средства, работающие с аварийными осциллограммами.

Как видно из схемы классификации (рисунок 1.3), к высокочастотным методам относятся только часть дистанционных методов (*импульсный метод, метод стоячих волн, емкостный метод, петлевой метод и методы, основанные на параметрах аварийного режима*).

Метод стоячих волн основан на присоединении к отключенной поврежденной линии источника синусоидального сигнала высокой частоты. При достаточно высоких частотах линию электропередачи рассматривают как длинную линию, с распределенными параметрами. Метод предполагает измерение полного входного сопротивления поврежденной линии в широком диапазоне частот.

Принцип действия *импульсных методов* основан на измерении интервалов времени распространения электромагнитных волн по участкам линии. Импульсные методы применяются как на кабельных, так и на воздушных линиях, подразделяются на *волновые* и *локационные*.

Локационные методы основаны на замере времени прохождения зондирующего сигнала от начала до конца линии и обратно. Локационные методы подразделяются на автоматические и неавтоматические.

Волновые методы подразделяются на два вида: метод односторонних измерений и метод двухсторонних измерений. Метод односторонних измерений осуществляет замер времени между приходами волн первого и второго отражения от места повреждений, либо их одновременность. Метод двухсторонних измерений осуществляет замер времени между приходами волн на концы линий от места повреждения, для реализации данного метода

необходимо осуществить синхронизацию по времени между двумя концами линии с определенной точностью.

Емкостные методы применяются для определения обрыва кабельных линий. В основе методов лежит зависимость емкости кабеля от его длины. Оборванную жилу заряжают как конденсатор и осуществляют замер ее емкости по отношению к экрану. Измерение параметров осуществляется при помощи моста переменного тока или баллистического гальванометра.

Методы ОМП по параметрам аварийного режима (ПАР) используются в основном для определения повреждения на ВЛ. Данные методы основаны на измерениях параметров режима в момент возникновения КЗ, а также использовании и учете постоянной неизменяющейся информации о параметрах сети. В зависимости от установки устройств, методы ОМП подразделяются на односторонние и двухсторонние.

Короткие замыкания в электрических сетях редко являются металлическими и, как правило, сопровождаются переходным сопротивлением. Поэтому, расчет расстояния до места повреждения требует составления уравнений, содержащих как минимум два неизвестных параметра. В связи с этим, методы и устройства определения места повреждения, основанные на одностороннем замере, получили меньшее распространение, чем устройства, базирующиеся на многосторонних замерах.

Существенным преимуществом односторонних методов ОМП является возможность непосредственного получения результатов до повреждения без передачи информации с другого конца линии.

Разнообразный характер повреждений, а также структура и условия функционирования распределительных сетей 6–35 кВ, не позволяют создать универсальные методов ОМП, а из-за большого объема распределительных сетей и наличия разнородных потребителей, реализация двухсторонних замеров является затруднительной.

В диссертационной работе исследуются дистанционные методы ОМП, основанные на одностороннем замере параметров аварийных величин в распределительных сетях с изолированной нейтралью.

1.3 Дистанционные методы определения места повреждения ЛЭП по параметрам аварийного режима при замыканиях на землю в сетях с изолированной нейтралью

Современное развитие вычислительных систем позволяет отказаться от методов ОМП, основанных на полном обходе линии электропередачи и осуществлять расчет расстояния до места повреждения, опираясь на дистанционные замеры аварийных величин.

В соответствии с концепцией развития релейной защиты и автоматики электросетевого комплекса, предложенной ПАО «Россети» в 2015 году [15], определены требования к

современным устройствам РЗА и порядку их применения. В концепции сказано, что техническая политика в области РЗА должна базироваться на применении микропроцессорных устройств, при этом, в технических требованиях ПАО «ФСК ЕЭС» к микропроцессорным устройствам [17] сказано, что микропроцессорные терминалы, применяемые для защиты линии, должны иметь логические узлы, содержащие алгоритмы определения места повреждения для всех разновидностей замыканий на землю.

В связи с этим, наибольший интерес вызывает возможность использования алгоритмов ОМП ЛЭП совместно с функциями релейной защит и сетевой автоматики в микропроцессорных устройствах РЗА.

Данная реализация в сетях среднего напряжения возможна лишь в случае использования методов, основанных на одностороннем замере параметров аварийных величин.

Различные методы ОМП, применяемые в сетях высокого и сверхвысокого напряжения, оказываются малоприменимыми для сетей с изолированной нейтралью при определении ОЗЗ, однако могут быть применимы для поиска междуфазных и двойных замыканий на землю [7, 8, 18–21].

Так как целью диссертационной работы является повышение точности определения места повреждения ЛЭП при однофазных и двойных замыканиях на землю путем разработки новых алгоритмов на основе имитационных моделей электротехнических комплексов, то актуальной задачей является определение классификации всех видов замыканий для данного режима работы сети.

Рассмотрим более подробно дистанционные методы ОМП по параметрам аварийного режима, применяемые на ВЛ для определения замыканий на землю.

1.3.1 Методы определения места повреждения ЛЭП 6-35 кВ, применяемые для междуфазных и двойных замыканий на землю

В настоящее время существует несколько классификаций известных методов ОМП ЛЭП, основанных на одностороннем замере параметров аварийных величин, которые можно применить для поиска междуфазных и двойных замыканий на землю. Например, [22] выделяет всего две категории методов одностороннего ОМП «Расчетные методы» и «Дистанционные методы», в работе [23] также выделяется две крупные группы методов «Методы, использующие действующие значения параметров аварийных величин» и «Методы, использующие мгновенные значения параметров аварийных величин», при этом, в работах [24, 27] все известные методы классифицируют на «Методы, основанные на перетоках мощности», «Методы, использующие действующие (интегральные) ПАР» и «Методы, использующие мгновенные значения ПАР», а в работе [28] известные способы ОМП ЛЭП предлагается

классифицировать на «Методы основанные на дистанционном подходе», «Методы основанные на замере реактивной мощности» и «Методы основанные на итерационном пересчете параметров аварийного режима вдоль линии до срабатывания критериев целевой функции».

Представленная ниже классификация методов одностороннего ОМП, по мнению автора, позволяет получить более точное разделение существующих **методов ОМП ЛЭП для поиска междуфазных и двойных замыканий на землю**, в зависимости от используемых параметров:

1. Методы, основанные на использовании мгновенных значений параметров аварийных величин [28 – 33].
2. Методы, основанные на замере реактивной мощности вдоль поврежденной линии [33, 37 – 42].
3. Методы, основанные на использовании действующих значений параметров аварийных величин [7,8, 43–53].
4. Методы, основанные на итерационном уточнении рассчитываемых параметров, до достижения требуемой точности расчета [19, 54 – 59].

Принцип действия **методов, использующих мгновенные значения параметров аварийных величин**, заключается в решении уравнения петли короткого замыкания, составленного по мгновенным значениям параметров аварийного режима, относительно расстояния до места повреждения. Рассмотрим часть методов, относящихся к данной группе.

Авторы алгоритма [29] предлагают, имея мгновенные значения сигналов тока i и напряжения u , использовать второй Закон Кирхгофа в дифференциальной форме для контура фаза-земля для двух моментов времени t_1 и t_2 .

$$u = l \cdot L \cdot \frac{di}{dt} + l \cdot r \cdot i + k \cdot R_{\pi} \cdot i, \quad 1.1$$

где L – индуктивность единицы длины линии Гн/км; r – удельное активное сопротивление линии Ом/км; k – коэффициент токораспределения; R_{π} – переходное сопротивление в месте повреждения, l – предполагаемое место КЗ, Ом.

Полученная система системы из двух нелинейных уравнений, относительно неизвестной величины позволяет получить следующую формулу для расчета расстояния до повреждения:

$$l = \frac{u_{t1} \cdot i_{t2} - u_{t2} \cdot i_{t1}}{L \cdot \left[\frac{di_{t1}}{dt} - \frac{di_{t2}}{dt} \right]}. \quad 1.2$$

Команда ВНИИ доработала представленный ранее алгоритм [29], с учетом известных характеристик дуги [32]. Известно, что падение напряжения дуги U_d большую часть периода неизменно и составляет 4–5% амплитуды линейного напряжения и изменяется лишь вблизи перехода тока через ноль, при этом градиент дуги независимо от величины тока КЗ составляет 1,5 кВ/м, а длина дуги между проводами не превышает 10 м, при $t \leq 0,1$ с. При принятии малой

вероятности случайного попадания измерений в интервал вблизи перехода тока i через ноль, справедливо следующее соотношение:

$$u = l \cdot L \cdot \frac{di}{dt} + l \cdot r \cdot i + u_0. \quad 1.3$$

Направление падения напряжения дуги в разные рассматриваемые моменты времени может как совпадать, так и быть противоположной фазному напряжению.

Тогда при проведении измерений напряжения и тока для разных моментов времени получается два решения системы уравнений:

$$l = \frac{u_{t1} - u_{t2}}{L \cdot \left[\frac{di_{t1}}{dt} - \frac{di_{t2}}{dt} \right] + r \cdot (i_{t1} - i_{t2})}, \quad 1.4$$

$$l = \frac{u_{t1} + u_{t2}}{L \cdot \left[\frac{di_{t1}}{dt} + \frac{di_{t2}}{dt} \right] + r \cdot (i_{t1} + i_{t2})}. \quad 1.5$$

Выражение, рассчитанное по формуле 1.4, получается в случае одинаковой полярности напряжения дуги, а выражение 1.5 – разной.

Принцип действия **методов, основанных на замере реактивной мощности** вдоль поврежденной линии, опирается на оценку потоков мощности различных последовательностей, а также на представлении узла несимметрии в виде генератора обратной и нулевой последовательностей. В основе методов лежит предположение о том, что сопротивление в месте повреждения носит чисто активный характер, вследствие этого реактивная мощность в месте повреждения равна нулю.

Авторы [33], проведя анализ распределения токов и напряжения вдоль линии при коротких замыкания определяют, что мощности обратной и нулевой последовательностей всегда направлены от места повреждения и принимают там максимальное значение. В дальнейшем, выбирая положительное направление для токов всех последовательностей одинаковым, направленным к месту повреждения, получают соотношение, которое удовлетворяется только в месте повреждения [34]:

$$\underline{U}_1 \cdot \dot{\underline{I}}_1 = -(\underline{U}_2 \cdot \dot{\underline{I}}_2 + \underline{U}_0 \cdot \dot{\underline{I}}_0), \quad 1.6$$

где U_i, I_i – значения токов и напряжений в месте повреждений и их комплексно сопряженные. Знак минус показывает, что мощности обратной и нулевой последовательности направлены противоположно прямой последовательности.

Полагая, что напряжения и ток в узле измерения известны, определяют мощности прямой, обратной и нулевой последовательностей в месте повреждения:

$$\underline{S}_1 = \underline{U}_1 \cdot \dot{\underline{I}}_1 = \underline{U}'_{r1} \cdot \dot{\underline{I}}_1 - \underline{I}_{r1} \cdot \underline{Z}'_1 \cdot \dot{\underline{I}}_1 - \underline{R}_{п1} \cdot |\underline{I}_1|^2, \quad 1.7$$

$$\underline{S}_2 = \underline{U}_2 \cdot \dot{\underline{I}}_2 = \underline{U}'_{r2} \cdot \dot{\underline{I}}_2 - \underline{I}_{r2} \cdot \underline{Z}'_2 \cdot \dot{\underline{I}}_2 - \underline{R}_{п2} \cdot |\underline{I}_2|^2, \quad 1.8$$

$$\underline{S}_0 = \underline{U}_0 \cdot \dot{\underline{I}}_0 = \underline{U}'_{r0} \cdot \dot{\underline{I}}_0 - \underline{I}_{r0} \cdot \underline{Z}'_0 \cdot \dot{\underline{I}}_0 - \underline{R}_{п0} \cdot |\underline{I}_0|^2, \quad 1.9$$

где $U'_{r1}, U'_{r2}, U'_{r0}, I'_{r1}, I'_{r2}, I'_{r0}$ – измеряемые напряжения и токи.

Суммируя 1.7 – 1.9 и выделяя мнимую часть суммы – реактивную мощность, получают в соответствии с выражением 1.6 исходное соотношение для определения места повреждения, при этом точка, в которой данное соотношение принимает нулевое значение, и будет являться местом аварии:

$$\text{Im} \left\{ \frac{\underline{U}'_{r1} \cdot \left(\underline{I}'_{r1} - \underline{I}'_n \right) - |\underline{I}'_{r1}|^2 \cdot \underline{Z}'_1 + \underline{I}'_{r1} \cdot \underline{I}'_n \cdot \underline{Z}'_1}{\underline{C}'_{p1}} + \frac{\underline{U}'_{r2} \cdot \underline{I}'_{r2} - |\underline{I}'_{r2}|^2 \cdot \underline{Z}'_2}{\underline{C}'_{p2}} + \frac{\underline{U}'_{r0} \cdot \underline{I}'_{r0} - |\underline{I}'_{r0}|^2 \cdot \underline{Z}'_0}{\underline{C}'_{p0}} \right\} = 0, \quad 1.10$$

где $\underline{C}'_{p2} = \frac{\underline{z}''_{\Sigma i}}{\underline{z}'_{\Sigma i} + \underline{z}''_{\Sigma i}}$ – коэффициент токораспределения в точке КЗ,

$\underline{Z}'_{\Sigma i} = L_{кз} \cdot \underline{Z}_{iyд} + \underline{Z}'_{ci}$, $\underline{Z}''_{\Sigma i} = (L - L_{кз}) \cdot \underline{Z}_{iyд} + \underline{Z}''_{ci}$, L – полная длина линии, $L_{кз}$ – расстояние до места повреждения; $\underline{Z}_{iyд}$ – удельное сопротивление линии для различных последовательностей.

В работах [35, 36] поиск места двойных замыканий в распределительных сетях выполняется с использованием алгоритмического моделирования, по методу «локализации» за счет поэтапного и постепенного исключения неповрежденных частей и укорачивания модели сети. Авторами вводится понятие «локальные токи фидера», которые определяются как разности фазных токов, полученных для этого места, и составляющих нормальных токов. Сравниваются уровни локальных токов фаз фидера, две фазы с более высокими уровнями локальных токов идентифицируют как поврежденные.

В дальнейшем, определяются токи в поврежденных фазах как разности локального тока поврежденных фаз и локального тока неповрежденной фазы в месте предполагаемого замыкания и преобразуются фазные напряжения и токи поврежденных фаз в два информационных параметра места предполагаемого замыкания.

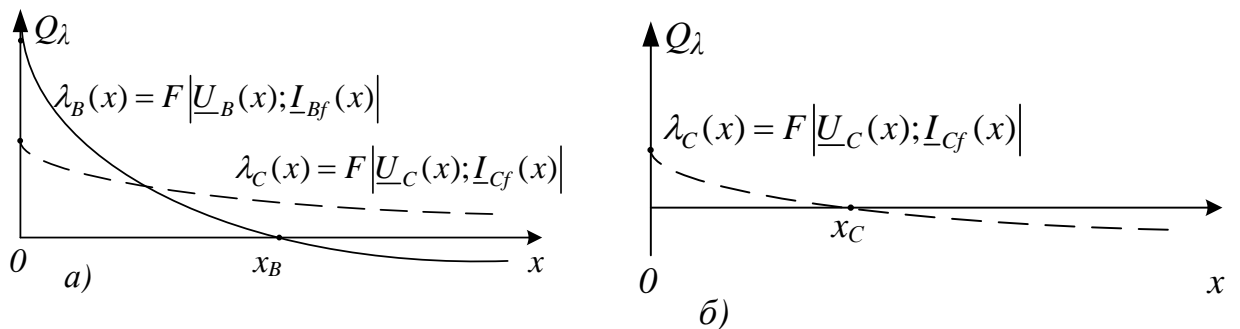


Рисунок 1.4 – Целевые функции зависимости информационных параметров от координаты точки повреждения

Ближайшее к началу фидера место перехода одного из информационных параметров через нулевое значение идентифицируется как первое место замыкания (рисунок 1.4 а). После этого, модель фидера укорачивается на длину неповрежденной части от входа фидера до места первого замыкания и рассматривается модель с повреждением в одной фазе, где в качестве входных напряжений принимаются фазные напряжения в месте первого замыкания. В качестве входных токов неповрежденных фаз укороченной модели принимают фазные токи в месте первого замыкания, а в качестве входного тока поврежденной фазы принимают разность между соответствующим фазным током и током замыкания. В укороченной модели преобразуются напряжение и ток поврежденной фазы в информационные параметры места предполагаемого повреждения и определяют координату второго замыкания на землю (рисунок 1.4 б)

Похожий алгоритм предлагают авторы [37, 38]. В нем двойные замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью предлагается определять за счет использования алгоритмической модели сети, представляя ветви с переходными сопротивлениями в месте предполагаемого КЗ в виде источников тока, при этом предполагается, что сопротивление цепи замыкания имеет активный характер.

По параметрам нормального (предшествующего) режима определяют нагрузку рассматриваемой линии электропередачи. Далее вычитая из измеренных токов аварийного режима величины токов предшествующего режима, определяют чисто аварийный ток для каждой фазы. Авторы алгоритма вводят понятие «разностный ток», который получают, вычитая из чисто аварийного тока неповрежденной фазы чисто аварийный ток поврежденной фазы. Полученный разностный ток считают пропорциональным току короткого замыкания.

Для поврежденных фаз формируют целевые функции, зависящие от координаты точки КЗ на линии электропередачи, и принимают за первое место замыкания точку на одной из поврежденных фаз, в которой целевая функция переходит через ноль и координата которой ближе к месту измерения (рисунок 1.5 а).

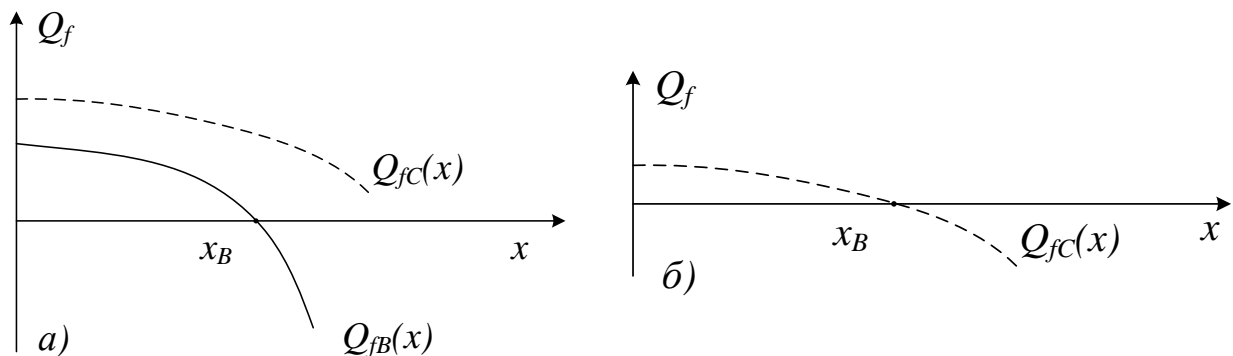


Рисунок 1.5 – Целевые функции, зависящие от координаты точки повреждения

Аналогично предыдущему методу собирается новая модель, не содержащая первого замыкания. В качестве входных токов неповрежденных фаз принимают фазные токи в месте

первого замыкания, а в качестве входного тока поврежденной фазы принимают разность между соответствующим фазным током на входе новой модели и током замыкания. После этого определяется чисто аварийный ток для каждой фазы новой модели. Вычитая из чисто аварийного тока неповрежденной фазы чисто аварийный ток поврежденной фазы, получают «разностный ток», пропорциональный току короткого замыкания. Полученные значения поврежденной фазы преобразуются в информационные параметры места предполагаемого замыкания, и формируется целевая функция, зависящая от координаты точки на линии электропередачи. Точка перехода этой функции через ось абсцисс и будет являться вторым местом замыкания (рисунок 1.5 б).

Методы, использующие действующие значения параметров аварийного режима осуществляют интегрирование параметров мгновенных величин и позволяют учесть несимметрию сети, а также переходное сопротивление в месте повреждения [7, 8]. Методы подразделяются на следующие категории:

- использующие для расчета сопротивление петли КЗ;
- ОМП по кривым спада тока нулевой последовательности;
- ОМП по отношению тока/напряжения нулевой последовательности к обратной.

Известные способы ОМП, использующие сопротивление петли КЗ требуют учета в уравнении таких параметров как переходное сопротивление, расхождения ЭДС генератора по фазе, а также наличие на отдельных участках сети нагрузок или источников.

Среди *алгоритмов*, использующих *аналитическое решение уравнения петли КЗ*, известен способ [43 – 45], позволяющий осуществить расчет расстояния до мест однофазного и двухфазных коротких замыканий в сети с глухо-заземленной нейтралью, путем одностороннего измерения и запоминания электрических величин промышленной частоты.

При возникновении однофазного замыкания, избиратель определяет поврежденную фазу и осуществляет запоминание токов и напряжений в течении 1,5–2 периодов. Далее, по формуле 1.11 определяют расстояние до места повреждения:

$$l = \frac{|U_{\phi}|}{|U_Z| \cdot (\cos \alpha + \sin \alpha + ctg \varphi)}, \quad 1.11$$

где $|U_Z| = I_A \cdot Z_A + I_B \cdot Z_{AB} + I_C \cdot Z_{AC}$; $|U_{\phi}|$ – модуль напряжения поврежденной фазы; α – фазовый угол между напряжениями U_{ϕ} и U_z ; φ – фазовый угол между напряжением и током поврежденной фазы.

Способ [46], предполагает определять расстояние до места двухфазного короткого замыкания на ВЛ в сетях с изолированной нейтралью. По измеренным напряжениям и токам прямой последовательности неповрежденной фазы в предаварийном и аварийном режимах

определяют сопротивления активной и реактивной составляющих предаварийного нагрузочного режима прямой последовательности.

Учет полученных величин позволяет определить расстояние до места повреждения, которое пропорционально сопротивлению цепи короткого замыкания:

$$X = \frac{(U_{ai} \cdot R_{1H} - U_{pi} \cdot X_{1H}) \cdot (I_{1a} \cdot R_{1H} - U_{1a} - I_{1p} \cdot X_{1H}) - (U_{ai} \cdot R_{1H} - U_{pi} \cdot X_{1H}) \cdot (I_{1a} \cdot X_{1H} - U_{1p} + I_{1p} \cdot R_{1H})}{2 \cdot (I_{1a} \cdot R_{1H} - U_{1a} - I_{1p}^{ab} \cdot X_{1H})^2 + 2 \cdot (I_{1a} \cdot X_{1H} - U_{1p} - I_{1p} \cdot R_{1H})^2}, \quad 1.12$$

где i – индекс поврежденной фазы; U_{ai} и U_{pi} – активная и реактивная составляющие фазного напряжения в аварийном режиме; I_{1a}, I_{1p} и U_{1a}, U_{1p} – активная и реактивная составляющие фазного тока и напряжения прямой последовательности в аварийном режиме.

Среди методов определения расстояния до двойных замыканий на землю известен алгоритм [47], согласно которому, после возникновения повреждения определяют замкнутые на землю фазы, а также величину напряжения и тока нулевой последовательности. Далее вычисляются абсолютные значения индуктивного сопротивления $X_{\phi 1}$ и $X_{\phi 2}$ контуров поврежденных разных фаз по следующему выражению:

$$X_{\phi 1(2)} = \frac{\text{Im}(U_{\phi 1(2)}) \cdot \text{Re}(3I_{01(2)}) - \text{Im}(3I_{01(2)}) \cdot \text{Re}(U_{\phi 1(2)})}{\text{Re}^2(3I_{01(2)}) + \text{Im}^2(3I_{01(2)})} \quad 1.13$$

После вычисляют расстояние до места повреждения l_{1k} на первой линии и расстояние до места повреждения l_{2k} на второй линии по формулам:

$$l_{1k} = \frac{3 \cdot X_{\phi 1}}{X_{0\text{луд}} + 2 \cdot X_{1\text{луд}}};$$

$$l_{2k} = \frac{3 \cdot X_{\phi 2}}{X_{0\text{луд}} + 2 \cdot X_{1\text{луд}}} \quad 1.14$$

Авторы алгоритма [48] для определения двойных замыканий на землю привлекают информацию о текущем и предшествующем режимах работы сети. В основе метода лежит общепринятый критерий ОМП о резистивном характере дуги и математическое отображение этого факта в равенстве нулю реактивной мощности повреждения.

В соответствии с замеренными параметрами строят модель линии электропередачи и моделируются двойные замыкания на разных удаленностях. По результатам имитационного моделирования определяется зависимость реактивного сопротивления от места предполагаемого повреждения (рисунок 1.6).

Для определения чисто аварийной схемы, получают составляющие токов и напряжений в начале контролируемой линии электропередачи как разность величин аварийного режима и величин предшествующего (нормального) режима.

Входные величины преобразуются в реактивные параметры двух предполагаемых мест повреждений. Замыкания принимаются в тех местах, где реактивные параметры переходят через нулевые значения.

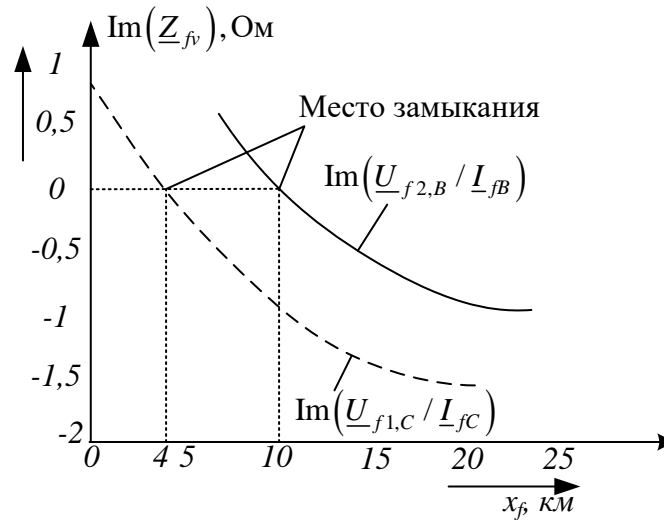


Рисунок 1.6 – Зависимость реактивного сопротивления от мест предполагаемого повреждения

Способы, использующие отношение тока нулевой последовательности к обратной [49, 50] пригодны только для ВЛ без обходных связей и несвязанных взаимной индукцией линий. Принимается тот факт, что в месте повреждения токи нулевой и обратной последовательности равны, но при этом, в схемах замещения распределяются по-разному. Если сопротивления примыкающей сети с противоположного от места измерения конца линии известны, то расстояние до места повреждения определяется по следующему выражению:

$$L_{кз} = 1 - \frac{X_{т2} \cdot X''_{c0} - \varepsilon \cdot X_{т0} \cdot X''_{c2}}{\varepsilon \cdot X_{т0} \cdot X_{л2} - X_{л0} \cdot X_{т2}}, \quad 1.15$$

где $X_{л0} = x_0 \cdot L$; $X_{л2} = x_2 \cdot L$; $X_{т0} = X_{л0} + X'_{c0} + X''_{c0}$; $X_{т2} = X_{л2} + X'_{c2} + X''_{c2}$; X''_{c0} и X''_{c2} – сопротивления примыкающей сети с противоположного от места измерения конца линии; $\varepsilon = \frac{I'_0}{I'_2} = \frac{U'_0 \cdot X'_{c2}}{U'_2 \cdot X'_{c0}}$.

Использование выражения 1.15 сопровождается сложностью учета сопротивления X''_{c2} , которое зависит от нагрузки системы и числа работающих генераторов. При этом в сетях с изолированной нейтралью, выражение 1.15 преобразуется в следующий вид:

$$L_{кз} = \frac{U_\phi - 2 \cdot U'_2}{2 \cdot I'_2 \cdot x_1}, \quad 1.16$$

где \underline{U}_ϕ – фазное напряжение сети, $x_1=x_2$ – удельное индуктивное сопротивление прямой (обратной) последовательности ВЛ. На точности результатов существенное влияние оказывает нагрузка сети, при этом погрешность результатов может составлять десятки процентов [51].

Способы, основанные на использовании кривых спада тока нулевой последовательности, осуществляют сопоставление измеренного тока/напряжения нулевой последовательности с графиками, рассчитанным для КЗ вдоль линии через наиболее вероятные значения переходного сопротивления, с учетом режимов работы сети [52, 53]. Ошибка расчета расстояния в данном методе пропорциональна значению переходного сопротивления и зависит от типа линий и характера повреждения. В случае использования такого метода возникает вероятность совпадения невозможности распознавания замыкания на землю от замыкания на заземляющие контуры опор, также данный способ неприменим при удаленных повреждениях на длинных линиях, т.к. в данном случае крутизна спада тока становится незначительной.

Методы, основанные на итерационном пересчете рассчитываемых параметров осуществляют поэтапное уточнение интересующих величин до достижения требуемой точности расчета [54 – 59]. Суть данной группы алгоритмов заключается в постепенном приближении к искомой точке повреждения от некоторой начальной точки, полученной в первом приближении по известным формулам. При формировании расчетного соотношения на первом шаге расчета применяется, как правило, упрощенная модель линии электропередачи, не содержащая ни емкостных проводимостей, ни переходного сопротивления. Далее по предварительно рассчитанному расстоянию до места повреждения, посредством итерационного процесса, изменяя переходное сопротивление и учитывая емкостные проводимости линии, производится уточнение расчетного расстояния. В той или иной степени, пошаговое уточнение присутствует во многих алгоритмах ОМП.

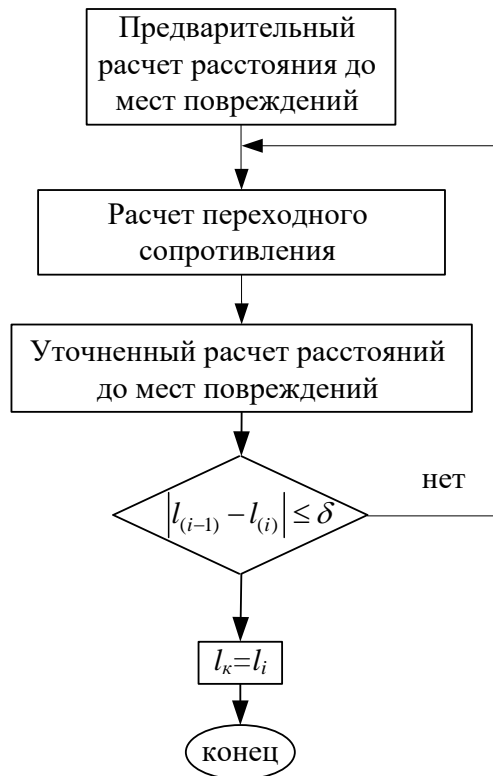


Рисунок 1.7 – Структурная схема алгоритма уточнения, основанного на использовании итерационных процедур

1.3.2 Методы определения места повреждения ЛЭП 6-35 кВ, применяемые для однофазных замыканий на землю

Описанные выше дистанционные методы ОМП по параметрам аварийного режима оказываются непригодны для **ОМП ЛЭП при однофазных замыканиях на землю**. Анализ известных алгоритмов ОМП при ОЗЗ, основанных на дистанционном замере позволил дать им следующую классификацию:

1. Методы, основанные на анализе величин переходного процесса [60 – 64].
2. Методы, основанные на предварительном моделировании защищаемой сети [65 – 68].
3. Методы, основанные на анализе электрических величин промышленной частоты [69 – 77].

Из существующей группы методов, основанных на **анализе переходных процессов**, наиболее интересными являются следующие:

Алгоритм определения места повреждения при ОЗЗ ЛЭП по параметрам переходного процесса [60], осуществляет замер переходного напряжения $u(t)$ поврежденной фазы на шинах контролируемого объекта и переходного тока нулевой последовательности $3i_0(t)$ поврежденной линии, дополнительно регистрируя скорость изменения переходного тока $\frac{d3i_0(t)}{dt}$, фиксируя все моменты t_{0k} переходов тока $3i_0(t)$ через нулевое значение, где k – порядковый номер

перехода тока через нулевое значение, при этом определяют и фиксируют соответствующие моментам времени t_{0k} мгновенные значения напряжения на поврежденной фазе $u(t_{0k})$, скорости изменения тока $\frac{d3i_0(t_{0k})}{dt}$, а затем по зафиксированным значениям напряжения на поврежденной фазе $u(t_{0k})$, скорости изменения тока и справочному значению погонной индуктивности для поврежденной линии $L_{\text{п}}$ определяют расстояние l_3 до места однофазного замыкания на землю в соответствии с выражением:

$$l_{3k} = \frac{u(t_{0k})}{\frac{d3i_0(t_{0k})}{dt} \cdot L_n} \quad 1.17$$

В случае наличия нескольких переходов тока нулевой последовательности поврежденной линии через нулевое значение расстояние до места однофазного замыкания на землю расстояние до места повреждения определяют как среднее из нескольких значений l_{3k} .

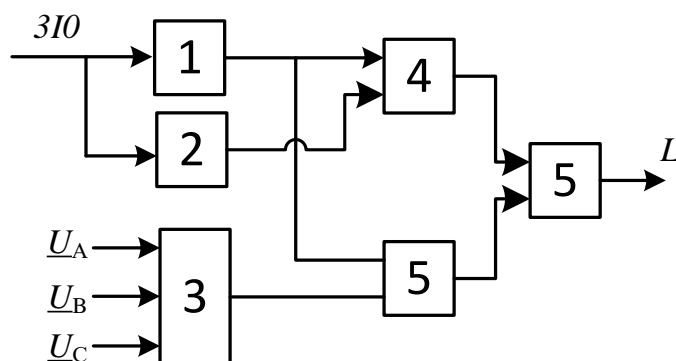


Рисунок 1.8 – Структурная схема устройства для определения места повреждения

На рисунке 1.8 изображена структурная схема способа, в которой 1 – блок, формирующий на выходе кратковременный единичный сигнал в момент перехода сигнала входного тока через нулевое значение; 2 – блок, формирующий на выходе сигнал, пропорциональный скорости изменения входного переходного тока; 3 – избиратель напряжения поврежденной фазы; 4, 5 – элементы памяти, запоминаящие мгновенные значения входного сигнала в заданные моменты времени, соответствующие появлению сигнала на выходе блока 1; 6 – вычислитель значения расстояния до места ОЗЗ в соответствии с выражением (1.17).

Известен способ определения места ОЗЗ по параметрам переходного процесса [62], заключающийся в измерении максимальной амплитуды тока нулевой последовательности $I_{0\text{max}}$ на поврежденной линии после возникновения однофазного замыкания на землю, измерении мгновенного значения напряжения U_c на поврежденной фазе в момент возникновения однофазного замыкания на землю. По замеренным контрольным параметрам, и известным значениям суммарной емкости нулевой последовательности линии C_0 и величины погонного индуктивного сопротивления $L_{\text{п}}$, определяют расстояние до однофазного замыкания на землю, в соответствии со следующим выражением:

$$l_k = \frac{U_c^2 \cdot C_0}{I_{0\max}^2 \cdot L_n} \quad 1.18$$

Еще один способ определения места повреждения по параметрам переходного процесса при ОЗЗ [63], основан на выявлении фазы линии с поврежденной изоляцией, замкнувшейся на землю, измерении на ней параметров переходного процесса, и вычислении расстояния от подстанции до места замыкания по следующему выражению:

$$l_k = \frac{1}{L_0} \cdot \frac{u - i \cdot \frac{U}{I_{m1}} \cdot \ln\left(\frac{I_{m1}}{I_{m2}}\right)}{I_m \cdot \omega}, \quad 1.19$$

где L_0 – погонная индуктивность поврежденной линии, постоянная величина, зависящая от материала линии, Гн; u – мгновенное значение напряжения на поврежденной фазе; i – мгновенное значение тока в поврежденной фазе линии; I_{m1}, I_{m2} амплитудные значения токов, следующих друг за другом на поврежденной линии; U – напряжение на нейтрали; ω – собственная часть переходного процесса.

На рисунке 1.9 изображена структурная схема способа, в которой 1 – фильтр токов нулевой последовательности; 2 – фильтр цепи напряжения; 3 – фильтр цепи тока; 4 – компаратор; 5 – сумматор; 6 – вычислитель значения расстояния до места ОЗЗ.

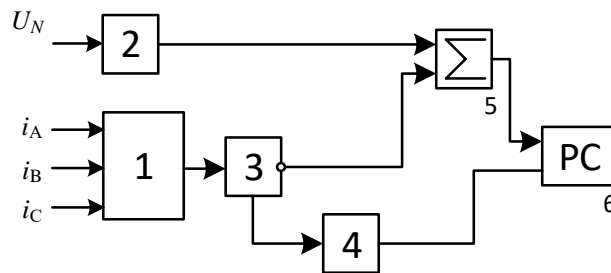


Рисунок 1.9 – Структурная схема устройства для определения места повреждения

При возникновении замыкания фазы на землю на преобразователи 1 и 2 поступают сигналы, токов и напряжения, после чего устройство производит обработку поступившей информации, на основе которой определяют расстояние до места повреждения по вышеприведенному алгоритму 1.19.

Другой способ определения места повреждения воздушной линии при ОЗЗ [64], основан на выявлении фазы линии с поврежденной изоляцией, замкнувшейся на землю и замера её параметров, на основании которых находят расстояние до места повреждения. В качестве измеряемых параметров определяют собственную частоту переходного процесса разряда емкости поврежденной фазы $\omega_{\partial n}$ и собственную частоту переходного процесса подзаряда емкости неповрежденных фаз $\omega_{\text{дн}}$, следующие друг за другом амплитуды тока I_{m1} и I_{m2} разряда поврежденной фазы, напряжение на нейтрали U , а расстояние до места повреждения определяют из соотношения

$$I_k = \frac{1}{L_0} \cdot \left(\frac{2 \cdot I_{mf}^2 - U^2 \cdot \ln \left(\frac{I_{m1}}{I_{m2}} \right)^2 \cdot C}{2 \cdot C \cdot I_{m1}^2 \cdot \omega_{\text{дн}}^2} - \frac{4 \cdot I_{mf}^2 - U^2 \cdot \ln \left(\frac{I_{m1}}{I_{m2}} \right)^2 \cdot C}{4 \cdot C \cdot I_{m1}^2 \cdot \omega_{\text{дн}}^2} \right), \quad 1.20$$

Реализация рассматриваемого метода ОМП осуществляется в соответствии со структурной схемой, показанной на рисунке 1.10. На фильтр напряжения нулевой последовательности 1 и фильтр тока нулевой последовательности 5, поступает первичная информация о фазных напряжениях $\underline{U}_a, \underline{U}_b, \underline{U}_c$ и токах i_a, i_b, i_c . Фильтры 2 и 6 подавляют величины напряжения и тока промышленной частоты и пропускают гармонические составляющие переходного процесса. Компараторы 3 и 7 производят оцифровку сигналов и определение собственной частоты переходного процесса. Фазочувствительный выпрямитель 4 определяет знак импульса тока и напряжения, а одновибратор 8 отделяет положительную полуволну для дальнейшей обработки, которую в соответствии с вышеприведенной зависимостью программно осуществляет ЭВМ 9, выдавая конечный результат на экран дисплея.

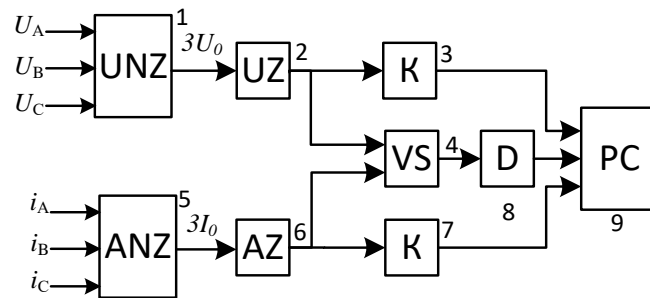


Рисунок 1.10 – Структурная схема устройства для определения места повреждения

Рассмотрим часть методов, основанных на **предварительном моделировании защищаемой сети.**

Известен способ определения места повреждения по параметрам переходного процесса при ОЗЗ [65], основанный на регистрации напряжения поврежденной фазы на шинах $u(t)$. Измеренное напряжение аппроксимируют полиномом второй степени, который в общем случае записывается как $u(t) = a_0 \cdot t^2 + a_1 \cdot t + a_2$. После чего определяют модуль максимального

значения производной в начале участка аппроксимации $\left(\frac{du}{dt} \right)_{\text{макс}}$. Полученное значение

производной нормируют по отношению к напряжению пробоя $u(t)^* = \frac{u(t)}{u_{np}(t)}$.

Для всех присоединений конкретной сети с учетом ее топологии и параметров линий, путем моделирования определяют расчетные зависимости нормированных абсолютных максимальных значений производных от расстояния до места замыкания $\left(\frac{du_*(0)}{dt}\right)_{\text{макс}} = f(t)$.

Такие зависимости получают путем моделирования начальной стадии процесса однофазного замыкания. На рисунке 1.11 а, представлен пример расчетной осциллограммы напряжения в начальный момент замыкания, полученной в результате имитационного моделирования и кривой аппроксимации напряжения. Зависимость нормированной производной в начальный момент замыкания для линии длиной 10 км приведена на рисунке 1.11 б.

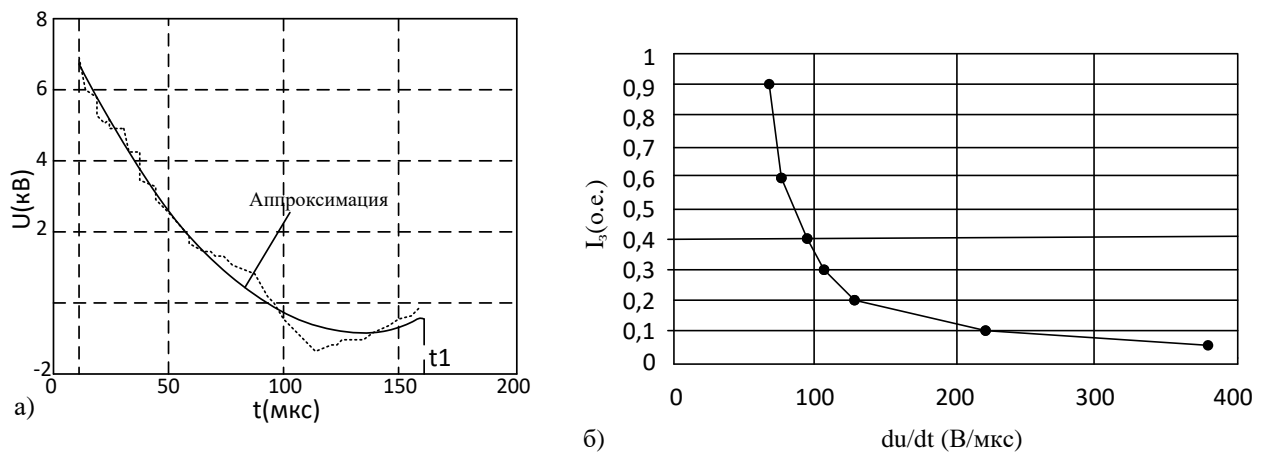


Рисунок 1.11 – Пояснение принципа работы алгоритма

Таким образом, расчёт расстояние до места замыкания осуществляется за счет аппроксимации напряжения в начальный момент замыкания полиномом второй степени, его дифференцирования и нахождения абсолютного значения максимума производной в момент замыкания. Сопоставления нормированного значения производной с соответствующей расчетной зависимостью $\left(\frac{du_*(0)}{dt}\right)_{\text{макс}} = f(t)$ позволяет определить расстояние до места повреждения.

Известен метод [66, 67] определения местоположения металлического ОЗЗ в воздушных электрических сетях 6-10 кВ с изолированной нейтралью, в котором авторы предлагают использовать замеры напряжения в начале и в конце линии в установившемся режиме, причем замеренные напряжения передавать по беспроводному каналу связи на ближайшие ПС/КТП/ТП. Разработчики предлагают осуществлять предварительное моделирование ВЛ, на которых планируется использование данного метода. Имея имитационную модель линии, предлагается построить карту зависимостей расстояний до места повреждения (1.21) от разности расстояний между напряжениями начала и конца ЛЭП.

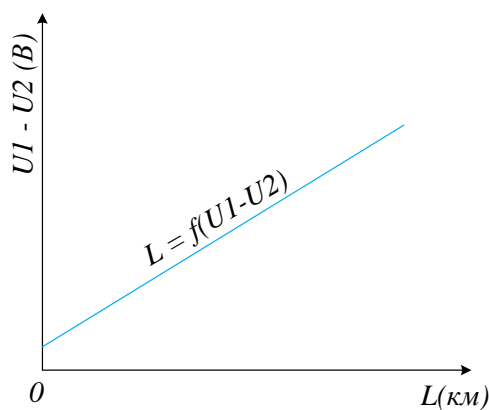


Рисунок 1.12 – Зависимость расстояния от разницы напряжения по концам линии

Замеренные напряжения авторы предлагают обрабатывать дифференциальным методом, в соответствии с (1.21) сопоставлять её с имеющимися, определяя, таким образом, наиболее подходящую.

$$l = f(\underline{U}_1 - \underline{U}_2), \quad 1.21$$

где \underline{U}_1 и \underline{U}_2 – значение напряжения поврежденной фазы, измеренное в начале и в конце ЛЭП.

Подставляя измеренные значения в уравнение, определяется, на каком ответвлении произошло замыкание и каково расстояние до него от начала линии

Известен способ определения места ОЗЗ [68] с использованием модели линий электропередачи в аварийном режиме. Для исследуемой линии электропередачи составляют схему замещения, для которой производят расчет параметров переходных процессов при ОЗЗ на различной удаленности от точки замера до конца линии, с шагом 10 метров, при различных значениях переходных сопротивлений в месте повреждения с шагом 10 Ом. Рассчитанные параметры аварийных величин, запоминаются в базу данных на ЭВМ. При возникновении повреждения на подстанции фиксируют поврежденную линию и фактическую собственную частоту переходного процесса, сравнивая с расчетными параметрами из базы, и определяют расстояние до места повреждения с точностью, определяемой шагом задания расстояния до места повреждения.

Рассмотрим методы, основанные на **анализе электрических величин промышленной частоты.**

В работе [69] для реализации алгоритма ОМП при ОЗЗ на КВЛ в сетях с резистивным заземлением нейтрали, авторами предлагается определять составляющие нулевой и прямой последовательностей в электрической сети, и имея полное сопротивление питающей линии, по выражению (1.22) вычислять падение напряжения прямой и нулевой последовательности на участке от места замера до повреждения.

$$\underline{U}_m = \underline{E}_s - \underline{I}_{m1} \cdot \underline{Z}_1 - \underline{I}_{m2} \cdot \underline{Z}_2 + \underline{I}_f \cdot 3 \cdot \underline{R}_{def} + \underline{Z}_0 \cdot \underline{I}_f, \quad 1.22$$

где \underline{E}_s – фазное напряжение в месте измерения, \underline{Z}_1 , \underline{Z}_2 , \underline{Z}_0 – полное сопротивление трансформатора тока прямой, обратной и нулевой последовательностей; R_{def} – сопротивление в точке замыкания фазы на землю; \underline{I}_{m1} , \underline{I}_{m2} , \underline{I}_{m0} – ток прямой, обратной и нулевой последовательностей, вычисляемый по фазному току, в месте измерения; \underline{I}_f – ток замыкания на землю.

Авторы, принимая во внимание тот факт, что полное сопротивление до предполагаемого КЗ имеет только действительную часть, вычисляют расстояние до повреждения в соответствии со следующим выражением:

$$\text{Im} \left(\frac{\underline{U}_m - \underline{z}_1 \cdot l \cdot x \cdot \underline{I}_{m1} - \underline{z}_2 \cdot l \cdot x \cdot \underline{I}_{m2}}{\underline{I}_f} \right) = \text{Im}(\underline{z}_0 \cdot x), \quad 1.23$$

где \underline{z}_1 , \underline{z}_2 , \underline{z}_0 – удельные сопротивления питающей линии прямой, обратной и нулевой последовательностей; \underline{U}_m – падение напряжения на участке повреждения, в соответствии с выражением 1.22; \underline{I}_{m1} , \underline{I}_{m2} , \underline{I}_{m0} – ток прямой, обратной и нулевой последовательностей, в месте измерения.

В работе [70], представлен способ ОМП и места ОЗЗ в сети с изолированной нейтралью, в котором для определения поврежденной линии использует информация о величине тока нулевой последовательности предшествующего режима. Полученный ток запоминают для каждой линии и определяют его изменение в течение периода промышленной частоты, сравнивая с уставкой. Если на одном из присоединений ток не поменял своего направления, то делается вывод о повреждении на данном присоединении, при этом расчет расстояния осуществляют по следующему выражению:

$$I_k = \frac{I_{3П} - \sum I_{НП}}{I_{3Д}}, \quad 1.24$$

где $I_{3П}$ – аварийный ток нулевой последовательности поврежденной линии, $I_{НП}$ – суммарный ток нулевой последовательности неповрежденных линий, $I_{3Д}$ – доаварийный ток нулевой последовательности поврежденной линии.

Известен способ определения места ОЗЗ фидера на землю [71], в котором составляются модели двух частей фидера, от места установки защиты до места предполагаемого повреждения и от места замыкания до конца фидера.

Регистрируются токи и напряжения в месте установки устройства. Из трехфазной системы величин выделяются составляющие нулевой и прямой последовательностей $3i_{0s}(t)$, $3u_{0s}(t)$, после чего выделяют безнулевые составляющие $i'_{vs}(t)$, $u'_{vs}(t)$:

Первая модель составляется по прямой и нулевой последовательности, а вторая только по нулевой. В модели прямой и нулевой последовательностей преобразуют безнулевые

составляющие в безнулевые составляющие в месте предполагаемого замыкания $\hat{i}_{0g}(t)$, $\hat{u}_{0f}(t)$, $\hat{u}'_{Af}(t)$, рисунок 1.13а,б. Суммируя полученные напряжения формируют напряжением и ток поврежденной фазы в месте предполагаемого замыкания $\hat{u}'_{Af}(t)$ рисунок 1.13в.

Подав напряжение нулевой последовательности в месте предполагаемого замыкания на вход модели нулевой последовательности второй части фидера, фиксируют ток на ее входе, который вычитают из тока нулевой последовательности до этого места, формируя таким образом ток предполагаемого замыкания $\hat{i}'_{Af}(t)$. Перемножая напряжение и ток в месте предполагаемого замыкания, формируют сигнал мгновенной мощности предполагаемого места замыкания $\hat{p}'_f(t)$, определяя знак этого сигнала и фиксируя реальное замыкание в том месте x_f , где упомянутый сигнал в процессе своего изменения остается неотрицательным рисунок 1.13г..

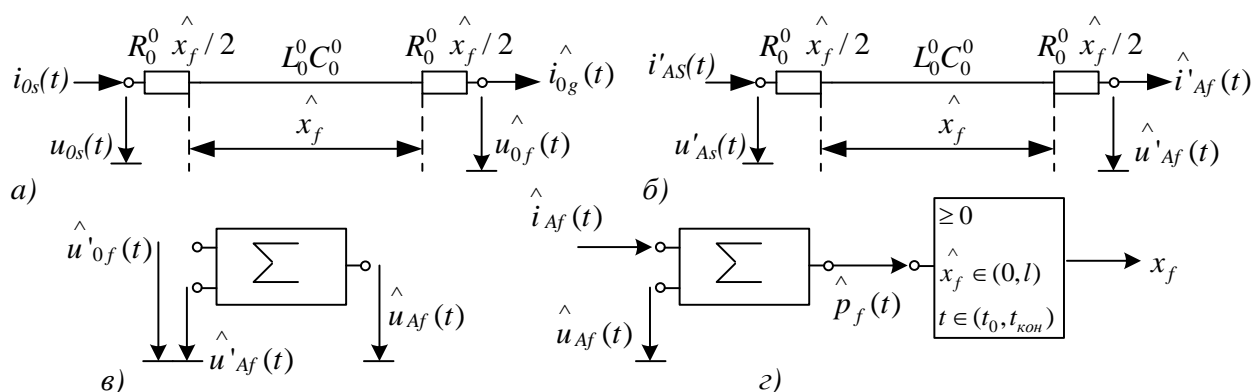


Рисунок 1.13 – Принцип работы алгоритма ОМП при ОЗЗ на основе разделения фидера на 2 модели

Известна группа алгоритмов, в которой, для решения задач ОМП при ОЗЗ осуществляется *кратковременный переход из однофазного замыкания в двойное замыкание на землю* замыканием на шинах подстанции одной из здоровых фаз и применение критериев поиска мест двойных замыканий, рисунок 1.14.

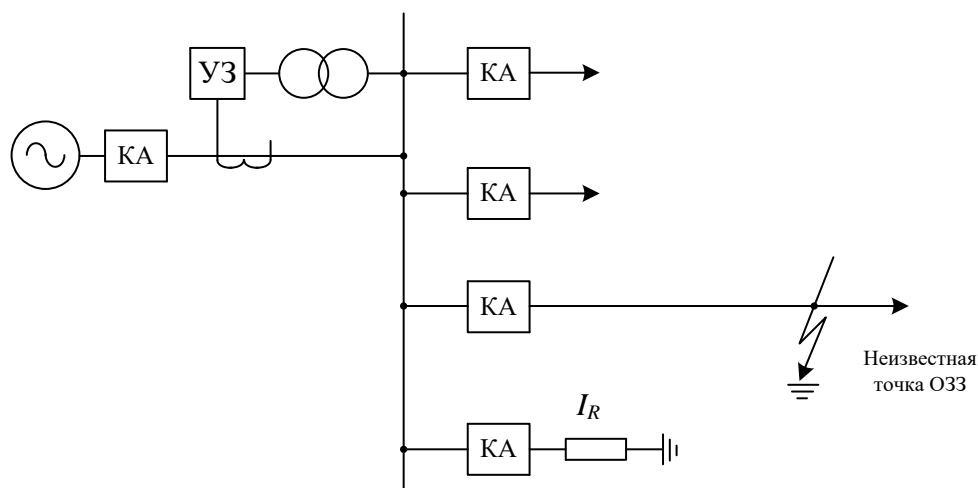


Рисунок 1.14 – Принцип работы алгоритма ОМП при ОЗЗ на основе кратковременного перевода в двойное замыкание на землю

Например, алгоритм [72, 73] основан на периодическом переводе линии из режима однофазного замыкания в двойное или двухфазное за счет замыкания соседней, неповрежденной фазы с землей через токоограничивающий резистор, по команде оперативно выездной бригады посредством передаче сигнала через GSM. Контролю подвергается импульсный ток нулевой последовательности, наложенный на емкостной ток ВЛ. Искомое замыкание фиксируется на границе между зоной наличия скачков импульсного тока и зоной их отсутствия.

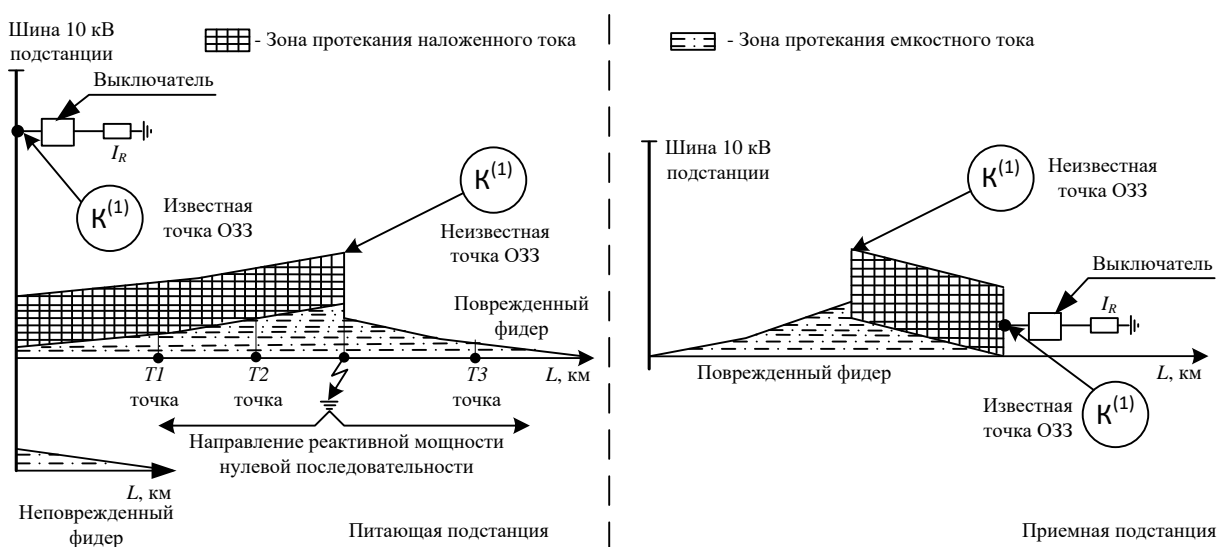


Рисунок 1.15 – Способ поиска места замыкания на землю посредством наложения импульсного тока на емкостной ток ВЛ

На рисунке 1.15 приведены диаграммы формирования зоны с наложением импульсного тока на емкостной. Распределение емкостных токов в элементах модели измеряется и фиксируется в протоколе. В процессе поиска осуществляется импульсный периодический

перевод в двойное замыкание. Импульсный, наложенный ток протекает по контуру, представленному штрихпунктирной линией, под действием напряжения через шину с вывода фазы A силового трансформатора до точки повреждения. Далее он распределяется через заземляющий контур питающей подстанции и концентрируется через заземляющий контур, выключателя и токоограничивающего резистора на шину и вывод фазы силового трансформатора. При этом между точками заземления и по трассе ВЛ возникает зона протекания импульсного наложенного тока.

В патенте [74] оценку расстояния до мест ОЗЗ осуществляют за счет создания искусственного двойного замыкания на землю одной из неповрежденных фаз. По измеренным параметрам аварийного режима фазного напряжения и фазных токов при ДвЗЗ, оценивают расстояние до места повреждения, по следующему выражению:

$$l_k = \frac{X_Z - R_Z \cdot \operatorname{tg}(\alpha - \beta)}{X_{л1} - R_{л1} \cdot \operatorname{tg}(\alpha - \beta)}, \quad 1.25$$

где X_Z и R_Z – мнимое и действительное сопротивление линии;

$$\alpha = \operatorname{arg} \left(\frac{I_0}{I_\phi - K \cdot I_0} \right), \quad \beta = \operatorname{arg} \left(-\frac{I_{0N}}{I_0} \right), \quad 1.26$$

где I_{0N} – итерационное приближение тока нулевой последовательности в месте однофазного замыкания, рассчитанное с учетом запоминаемой величины емкостной проводимости; U_ϕ и I_ϕ – напряжение и ток поврежденной фазы; I_0 – ток нулевой последовательности; K – коэффициент определяемый выражением:

$$K = \frac{(Z_0 - Z_1)}{Z_1}. \quad 1.27$$

Другой алгоритм [75] подразумевает подключение балластного сопротивления к резервной ячейки секции шин распределительного устройства, в котором есть замыкание на землю, для обеспечения протекания через балластное сопротивление ограниченного по величине и времени тока короткого замыкания. Во время подключения осуществляют фиксацию броска тока, и по его наличию или отсутствию судят о месте замыкания. Отсутствие бросков свидетельствует о том, что замыкание на землю находится в зоне от силового трансформатора, питающего данную секцию шин, до трансформаторов тока вводной ячейки. Наличие броска тока говорит о том, что замыкание находится в зоне действия защиты. По показаниям устройства, установленного в резервной ячейке, расчетным способом определяется расстояние до места однофазного замыкания на землю, по известным методам расчета.

Еще в одном патенте [76], основанном на искусственном введении двойного замыкания предполагает оценку расстояния до места повреждения пропорционально индуктивному сопротивлению, определяемому по следующей формуле:

$$I_k = \left| \frac{(U_{ai} \cdot R_{1H} - U_{pi} \cdot X_{1H}) \cdot (I_{1a} \cdot R_{1H} - U_{1a} - I_{1p} \cdot X_{1H}) + (U_{ai} \cdot X_{1H} - U_{pi} \cdot R_{1H}) \cdot (I_{1a} \cdot X_{1H} - U_{1p} - I_{1p} \cdot R_{1H})}{(\sqrt{3} - K / \sqrt{3}) \cdot (I_{1a} \cdot R_{1H} - U_{1a} - I_{1p} \cdot X_{1H}) + (\sqrt{3} + K / \sqrt{3}) \cdot (I_{1a} \cdot X_{1H} - U_{1p} - I_{1p} \cdot R_{1H})} \right|, \quad 1.28$$

где i – индекс поврежденной фазы; U_{ai} и U_{pi} – активная и реактивная составляющие фазного напряжения в аварийном режиме; I_{1a}, I_{1p} и U_{1a}, U_{1p} – активная и реактивная составляющие фазного тока и напряжения прямой последовательности в аварийном режиме; K – коэффициент компенсации, определяемый по следующему соотношению:

$$K = \frac{X_0 - X_1}{X_1}. \quad 1.29$$

Автор алгоритма [77] рассматривает возможность учета конструктивных особенностей и природно-климатических факторов в процессе определения повреждения, а также установку на каждой трансформаторной подстанции 6(10)/0,4 кВ средств регистрации аварийных сигналов с последующей их передачей в систему определения места повреждения. Автор предлагает строить математическую модель воздушной линии электропередачи, корректируя ее параметры зарегистрированными аварийными сигналами и сигналами, полученными с применением средств мониторинга температуры и удельного сопротивления грунта. Анализируя полученные параметры, автор предлагает вычислять резонансную частоту $f_{озз}$ ВЛ в момент повреждения, и $f_{норм}$ в нормальном режиме (на основании математической модели сети с учетом конструктивных особенностей и природно-климатических факторов). Используя полученные резонансные частоты вычисляется расстояние до места ОЗЗ, используя соотношение 1.30:

$$x = \frac{f_{норм}}{f_{озз}} \cdot l, \quad 1.30$$

где $f_{норм}$ – резонансная частота одной из неповрежденных фаз линии в нормальном режиме; $f_{озз}$ – частота, определенная для поврежденной фазы линии; l – длина неповрежденной фазы отходящей линии электропередачи.

На основании анализа дистанционных алгоритмов ОМП для всех видов замыканий на землю, в зависимости от типа замыкания можно выделить следующую классификацию:

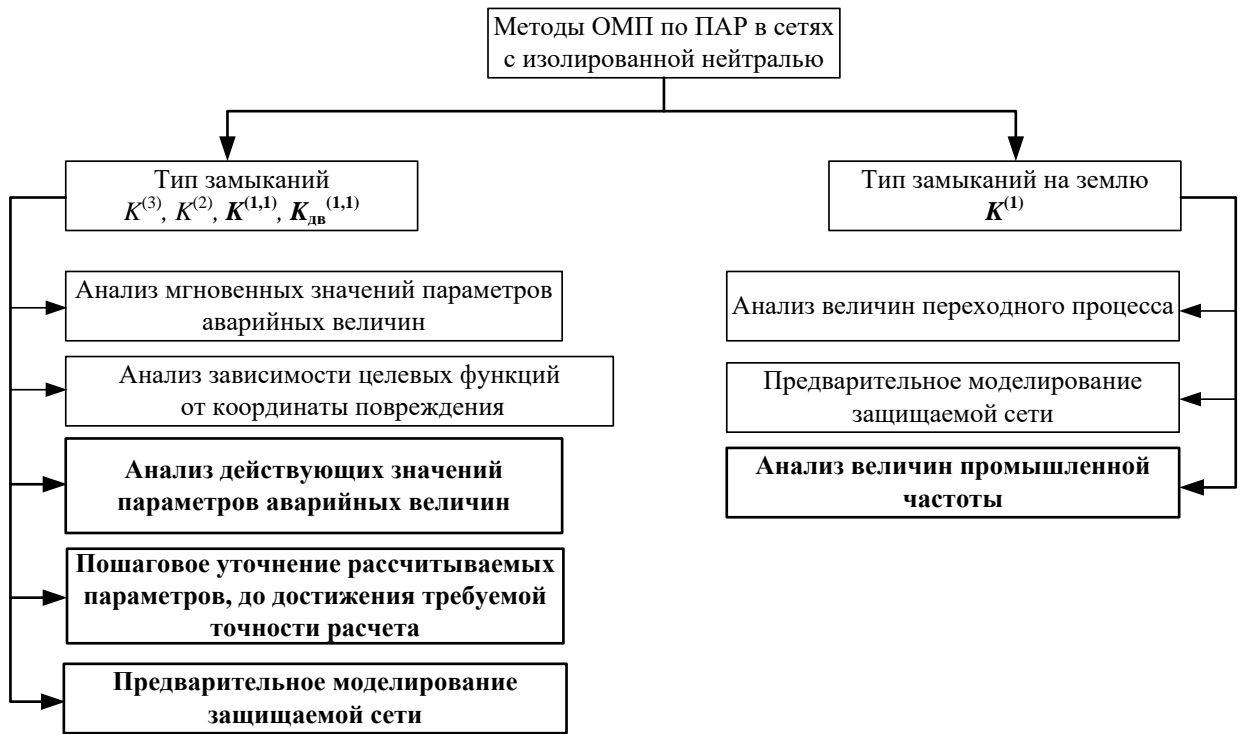


Рисунок 1.16 – Классификация методов одностороннего ОМП по ПАР в сетях с изолированной нейтралью при замыканиях на землю

Однофазные замыкания являются наиболее распространенным видом повреждений в распределительных сетях, они не приводят к появлению несимметрии линейных напряжений, однако могут привести к наиболее опасным замыканиям к двухфазные или двойным, причем последние являются наименее чувствительными для органов релейной защиты, в связи с чем быстрое их устранения является актуальной задачей.

Анализ результатов патентного поиска показал, что научная активность в части разработок новых и совершенствования существующих алгоритмов ОМП при ДвЗЗ на землю относительно невелика, а существующие методы, базирующиеся на применении метода симметричных составляющих, не позволяют учесть топологию линии электропередачи.

1.3.3 Погрешности одностороннего определения места повреждения ЛЭП 6-35 кВ

Односторонние алгоритмы ОМП ЛЭП, основанные на анализе параметров аварийного режима, в силу своей специфики, имеют ряд источников погрешностей [78, 79], связанных с неточностью работы ТТ и ТН, влиянием свободных составляющих переходного процесса, непостоянством величины переходного сопротивления, отсутствием возможности учета ответвлений на линиях электропередачи, невозможностью учета взаимоиндуктивных связей между параллельными и пересекаемыми линиями, а также невозможностью учета неоднородностей сопротивления на всей протяженности линии, связанной с разными типами опор и вставками проводов разного сечения.

Устройства ОМП ЛЭП, основанные на одностороннем замере параметров аварийных величин, имеют определенные погрешности, причины, появления которых можно условно разделить на [80, 81, 82]: погрешности замера, алгоритмические погрешности и погрешности моделирования.

Погрешности замера обусловлены неточностью измерений, проводимых трансформаторами тока и трансформаторами напряжения, и проявляются в искажении входного сигнала. Для устранения данного рода погрешностей в алгоритм вводится необходимая корректировка входного сигнала.

Алгоритмические погрешности связаны с несовершенством алгоритмов, использующихся при расчете места повреждения разными устройствами, ниже представлены основные из них:

- неточность учета взаимной индукции линии. Многие линии имеют неоднородную взаимоиндукцию, в том числе возникающую вдали от источника замера: как в середине линии, так и у ПС, противоположной месту установки устройства. Погрешность при этом пропорциональна отношению дополнительного падения напряжения, вызванного током взаимной индукции от каждой параллельной линии, к падению напряжения от собственного тока линии;

- погрешности от неточного учета ответвлений линий, которые могут приводить к полной неработоспособности алгоритма расчета;

- погрешности, вносимые наличием переходного сопротивления. Существует несколько способов устранения погрешности от влияния переходного сопротивления, все они предполагают использование параметров системы противоположного конца линии, благодаря этому удается оценить влияние токораспределения и ввести соответствующие поправки.

- погрешности, вызываемые особенностями токораспределения сети, вызванные продольной неоднородностью параметров линии, а также неучетом поперечных параметров линии. Продольные неоднородные участки линии встречаются, как правило, из-за применения на линии проводов разного сечения. В таких случаях удельные настроечные параметры применяются усредненными, что обуславливает появление данного вида погрешности. С определенной длины линии начинает проявляться влияние проводимости линии. Для отстройки от такого вида несимметрии приводят схемы замещения в виде четырёхполюсников.

Представленные выше погрешности не позволяют однозначно решить задачу определения места повреждения по данным одностороннего замера, а большинство представленных алгоритмов, рассчитанных по параметрам аварийного режима, являются скорее предположениями о месте повреждения, нежели реальными расчётными расстояниями до повреждения. Хотелось бы отметить, что вполне приемлемые результаты ОМП можно

получить за счет применения статистических методов, которые позволяют учесть множества влияющих факторов, или же, например, использовать рассчитанный по результатам моделирования закон распределения зависимости расстояний до мест повреждения от статистически значимой величины, например переходного сопротивления в месте повреждения.

1.3.4 Аппаратура дистанционного определения места повреждения ЛЭП применяемая в эксплуатации

Как было упомянуто в разделе 1.2 при описании известных алгоритмов, дистанционные способы ОМП ЛЭП могут быть реализованы в качестве дополнительных функций в устройствах РЗА, в регистраторах аварийных событий, а также как программные средства, работающие с записанными осциллограммами или в режиме реального времени.

В настоящее время идет активное развитие электротехнических комплексов определения места повреждения, для которых разработано большое количество методов, позволяющих снизить погрешности расчета.

Впервые фиксирующие приборы были разработаны в началах 90-х годов в Рижском политехническом институте, выпускаемые под название микропроцессорные фиксирующие импульсные приборы (МФИ) [8]. В настоящее время они выпускаются под названиями МИР, ФПМ и ИМФ и практически не отличаются технически.

Структурная схема принципа работы устройств представлена на рисунке 1.17. На входной блок подаются фазные токи и напряжения поврежденной линии, а также ток нулевой последовательности одной из неповрежденных параллельных линий. Входной блок выполняет роль промежуточных трансформаторов тока и напряжения, а также является фильтром высших гармоник. После выделения промышленной частоты, со входного блока, по команде ЭВМ сигналы подаются на мультиплексор, который поочередно подключает к АЦП нужный канал. Блок управления обеспечивает вывод результатов на цифровое табло блока индикации, а блок задания уставок передает информацию о параметрах линии в ЭВМ, на которой и проводятся все вычисления [83, 84].

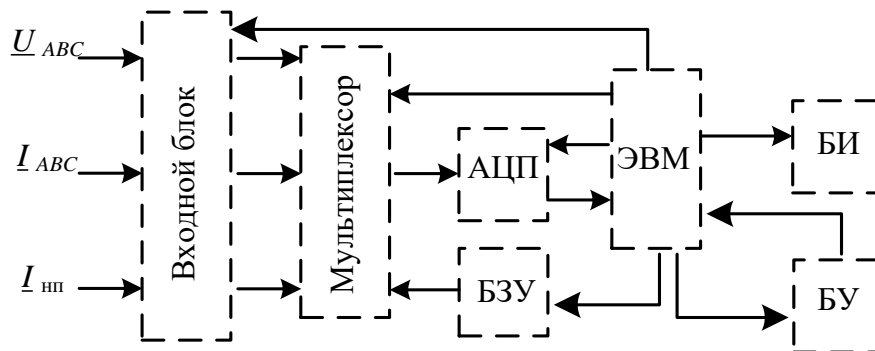


Рисунок 1.17 – Структурная схема работы МФИ

Определение поврежденных фаз осуществляется по соотношению векторов симметричных составляющих токов рассматриваемых линий, далее определяется расстояние до повреждения по решению уравнения петли короткого замыкания, относительно расстояния до места повреждения в действующих значениях сигналов.

Наиболее технически совершенными являются микропроцессорные приборы типов МИР, ИФМ, ФПМ, они имеют удобный интерфейс для оператора и позволяют также автоматизировать систему сбора показаний, через последовательный порт в персональный компьютер, однако, как и фиксирующие приборы типа МФИ, они имеют недостаточно совершенные алгоритмы определения вида КЗ, а также осуществляют упрощенный учет ответвлений.

В последнее время широкое распространение получили устройства определения места повреждения на базе микропроцессорных терминалов [85], структурная схема устройств представлена на рисунке 1.18. Поступающие на входы измерительных трансформаторов сигналы, проходят преобразование из аналоговых величин в цифровые значения с помощью многоканального АЦП. Полученные после АЦП значения проходят через цифровой фильтр (МФП), где производится выделение основной гармоники промышленной частоты и вычисление комплексных значений соответствующих аналоговых величин. Фильтрация отсекает постоянную составляющую сигналов, высшие гармоники, а также ослабляет экспоненциальную составляющую при переходных процессах при авариях на линии. Полученные на первом микропроцессоре комплексные значения поступают на главный микропроцессор с ПЗУ, ОЗУ таймером, контроллером прерываний КП и энергонезависимой памятью, в котором реализована вся вычислительно-логическая функциональная часть и программно выполнены все функции интегрированной релейной защиты и автоматики. Главный микропроцессор с помощью устройств ввода/вывода обеспечивает диалоговый режим с оператором.

Дискретные входные сигнала (D/I) выполнены с помощью элементов гальванической развязки и обеспечивают электрическое разделение входных дискретных сигналов от сигнальных контактов выключателей, автоматики частотной разгрузки и другой автоматики.

Комплект выходных реле (D/O) с герметизированными контактами осуществляет выдачу управляющих воздействий на выключатели электроэнергетических объектов и центральную сигнализацию подстанции. Благодаря реализации алгоритмов ОМП в микропроцессорные устройства, появилась возможность осуществления взаимодействия устройств с АРМ посредством SCADA системы и возможности применения различных протоколов взаимодействия устройств, в том числе и МЭК 61850.

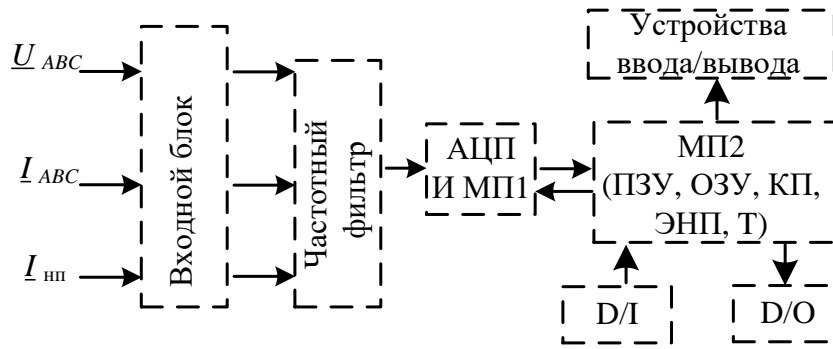


Рисунок 1.18 – Структурная схема микропроцессорных устройств релейной защиты

Современное развитие вычислительной техники затрагивает все стратегически важные отрасли и энергетика не является исключением. В последнее время большую популярность стала набирать компьютерная релейная защита [86]. Компьютерные системы релейной защиты состоят из подсистем с четко разграниченными функциями, центральное место в которой занимает процессор, отвечающий за выполнение алгоритмов релейной защиты и автоматики и поддержку различных функции распределения времени и связи с периферийным оборудованием (рисунок 1.19).

Оперативное запоминающее устройство (ОЗУ) содержит дискретизированные входные данные, а также используется в качестве буфера для данных и временного хранения результатов вычислений во время выполнения алгоритмов релейной защиты. Постоянное запоминающее устройство (ПЗУ) используется для постоянного хранения программ

В качестве энергонезависимой памяти, для хранения состояния программных накладок, значений уставок и состояний выходных реле используется запоминающее устройство на ферритовых сердечниках. СППЗУ большой емкости является полезной особенностью, такую память можно использовать как среду для хранения архивных данных, таблиц о сбоях, журналов событий с метками времени и т.д. В случае использования цифровых трансформаторов тока и напряжения или преобразователей аналоговых (ПАС) и дискретных (ПДС) сигналов, то входные каскады могут в виде SV потоков направляются непосредственно в процессор, минуя частотные фильтры и АЦП.

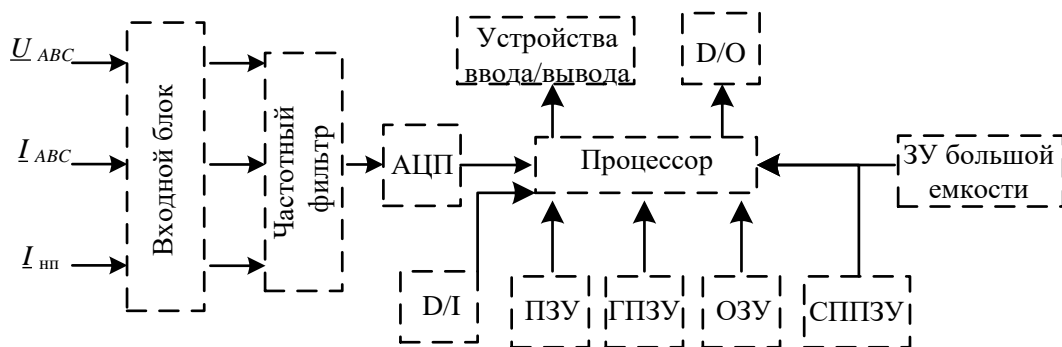


Рисунок 1.19 – Структурная схема компьютерной релейной защиты

Применение данной технологии является перспективной в связи с возможностью проведения анализа данных, накопления информации о режимах работы сети и дальнейшее ее использование в интеллектуальной релейной защите, предполагающей процедуру обучения [87, 104], проведения мониторинга и управления энергосистемами в реальном времени.

1.4 Выводы по главе

1. Разнообразный характер повреждений, а также структура и условия функционирования распределительных сетей 6–35 кВ, не дают возможности для создания универсального метода ОМП ЛЭП.

2. Наибольший интерес вызывает возможность совместной установки в микропроцессорные устройства алгоритмов ОМП ЛЭП и функций защиты и автоматики. Данная реализация возможна в случае использования дистанционных алгоритмов ОМП ЛЭП, основанных на одностороннем замере параметров аварийных величин.

3. Однофазные замыкания на землю (ОЗЗ) являются преобладающим видом повреждений в распределительных сетях и составляют не менее 75% от общего числа повреждений. Возникающие при ОЗЗ перенапряжения неповрежденных фаз способствуют пробое изоляции и возможности перехода в многофазные замыкания на землю.

4. Ввиду особенностей аварийных режимов, в сетях среднего напряжения затруднена разработка точных алгоритмов ОМП ЛЭП при однофазных и двойных замыканиях на землю, возникающих вследствие перенапряжения неповрежденных фаз

5. Проведенный патентный поиск показал о недостаточном исследовании в области ОМП ЛЭП при ДвЗЗ с использованием односторонних замеров аварийных величин. Широкое распространение технических решений выявления поврежденного фидера при ОЗЗ с помощью кратковременного заземления нейтрали сети, переводя сеть в режим ДвЗЗ с увеличением аварийных токов в линии, а также возможность встраивания алгоритмов ОМП ЛЭП в микропроцессорные устройства делает задачу определения места ДвЗЗ еще более интересной и актуальной.

6. Вариантный анализ различных методов определения места повреждения с использованием отечественных и зарубежных источников показал перспективность применения множественного имитационного моделирования с последующей статистической обработкой результатов расчета расстояния до места повреждения воздушных ЛЭП 6–35 кВ.

ГЛАВА 2 РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА ПОВРЕЖДЕНИЯ ПО ПАРАМЕТРАМ АВАРИЙНОГО РЕЖИМА ПРИ ДВОЙНЫХ ЗАМЫКАНИЯХ НА ЗЕМЛЮ

Существующие методы ОМП при двойных замыканиях на землю на воздушных линиях основываются на использовании параметров аварийного режима, а расчет расстояния до точки повреждения производится за счет использования метода симметричных составляющих тока и напряжения [37 – 36, 47, 48, 73 – 76], однако, использование данных методов не позволяет учитывать несимметрию и возможную неоднородность элементов сети, что в свою очередь приводит к существенному искажению результатов расчета. В связи с ограниченностью вычислительных ресурсов, метод симметричных составляющих получил широкое распространение [92 – 99], однако, из-за не учёта несимметрии сети в расчеты вносятся погрешности, которые приводят к существенным искажениям результатов, причем решение схем с большим числом несимметрий становится невозможным.

Современное развитие вычислительных мощностей позволяет уйти от использования метода симметричных составляющих и решать схемы в тех величинах, которые соответствует физическим параметра электроэнергетической системы. Для решения задачи определения места повреждения целесообразно использование фазных координат [101 – 103], данный способ обладает большой универсальностью и простотой реализации.

В основе организации поиска места повреждения лежит фундаментальное понятие о зоне обхода. При решении задачи ОМП ЛЭП не так важно определить место замыкания, как важно определить зону обхода поврежденной линии, именно от данного критерия напрямую зависит время, необходимо для проведения восстановительных работ. Приближение расчетной точки к действительному месту повреждения лишь сместит зону обхода, однако не сократит время поиска повреждения [105].

Согласно действующей типовой инструкции по организациям работ на воздушных линиях электропередач [106], для определения зоны осмотра (обхода) ВЛ после ее аварийного отключения по данным расчета на основе показаний устройств ОМП необходимо исходить из того, что максимальное значение зоны осмотра, для линий протяженностью до 50 км, не должно превышать $\pm 15\%$ от общей протяженности линии, и должна быть просмотрена полностью, однако допускается принимать значение зоны обхода согласно статистическим данным, полученным по результатам ОМП в данной энергосистеме.

При наличии достаточно большого объема статистически значимых результатов расчета, можно построить график плотности распределения ошибок и в дальнейшем [107, 108], задав доверительный интервал нахождения места повреждения, сформировать зону обхода

поврежденной линии. Анализ полученной зоны обхода позволит судить об эффективности разрабатываемых методов и целесообразности их применения в эксплуатации.

Глава посвящена разработке методов определения места повреждения при двойных замыканиях на землю в сетях с изолированной нейтралью с использованием параметров аварийного режима. Предложенные алгоритмы реализованы в фазных координатах. Проверка предлагаемых способов осуществлялась за счет использования имитационного моделирования с последующей статистической обработкой результатов. Множественное имитационное моделирование проводилось, путем набора конфигураций замыканий в программном комплексе *Matlab* с использованием среды моделирования *Simulink* [109 – 112].

Имитация двойных замыканий на землю проводилась как на одной раздел 2.1, так и на разных раздел 2.2 линиях. В процессе расчета принимались следующие допущения:

- 1) трехфазные элементы системы, принимались симметричными;
- 2) не учитывалась емкостная проводимость ЛЭП;
- 3) переходное сопротивление принималось чисто активным;
- 4) не учитывалась подпитка точки короткого замыкания током нагрузки.

2.1 Определения места повреждения при двойных замыканиях на землю на одной линии

Для решения задачи определения местоположения двойного замыкания на землю, когда оба повреждения находятся на одной линии, рассматривается упрощенная схема замещения, не имеющая ответвлений (рисунок 2.1), где \underline{E}_{c1} , \underline{E}_{c2} , \underline{E}_{c3} – эквивалентные ЭДС системы; \underline{Z}_c – эквивалентное сопротивление системы; \underline{z}_l – удельное сопротивление линии; \underline{k}_m – коэффициент взаимной индукции; \underline{Z}_n – эквивалентное сопротивления нагрузки; $\underline{R}_{n.1}$, $\underline{R}_{n.2}$ – переходные сопротивления в местах замыканий; l_1 , l_2 – фактические расстояния до мест ближнего и дальнего замыканий на землю; $\underline{U}_{пов.х.з.кз}$ – напряжение поврежденной фазы на шинах, в зависимости от расположенности повреждения; $\underline{U}_{неп.з.кз}$ – напряжение неповрежденной фазы на шинах; $\underline{I}_{пов.х.з.кз}$ – ток, протекающий в месте установки защиты; $\underline{I}_{пов.х.п.кз}$ – ток, протекающий в месте повреждения; индекс «х» обозначает точку повреждения (1 соответствует ближней точке, 2 – дальней точки повреждения).

Под переходным сопротивлением \underline{R}_n принимается суммарное сопротивление элементов, при протекании тока от поврежденной фазы до места замыкания (сопротивление дуги, сопротивление посторонних предметов между проводом и землей или опорой, сопротивление заземления опоры [114, 115].), а также сопротивлением грунта между точками повреждения.

Для возможности решения представленной схемы замещения, относительно неизвестных расстояний до мест повреждений, необходимо, чтобы в разрабатываемый алгоритм ОМП были введены параметры токов и напряжения поврежденной линии,

измеренные с ТТ и ТН, включенных на фазные измерения. В таком случае, полученные расчетные сопротивления будут пропорциональны расстояниям до мест замыканий.

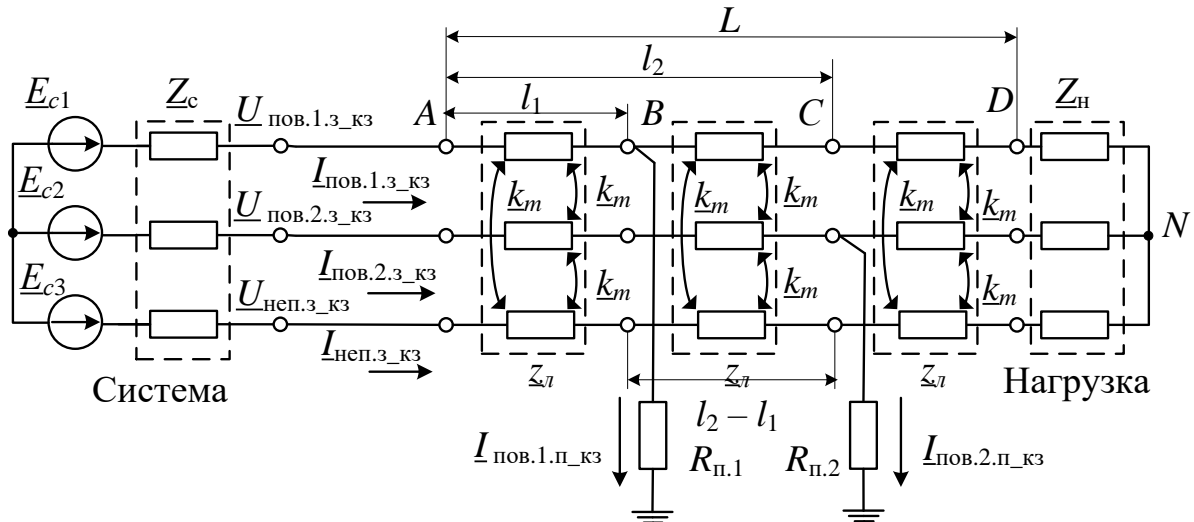


Рисунок 2.1 – Схема замещения сети в режиме двойного замыкания на землю на расстоянии l_1 и расстоянии l_2

Решение схемы, представленной на рисунке 2.1 в фазных координатах, позволяет получить выражения для определения расстояний до ближней и дальней точки повреждения.

Записав второй закон Кирхгофа для контура фаза-земля при коротких замыканиях фаз «1» и «2» и допущении, что подпитка точек КЗ током нагрузки отсутствует, получаем выражения для определения напряжения на шинах подстанции:

$$\underline{U}_{\text{пов.1.3_кз}} = \underline{I}_{\text{пов.1.3_кз}} \cdot l_1 \cdot \underline{z}_l + (\underline{I}_{\text{пов.2.3_кз}} + \underline{I}_{\text{неп.3_кз}}) \cdot l_1 \cdot \underline{z}_m + R_{\text{п1}} \cdot \underline{I}_{\text{пов.1.п_кз}}, \quad 2.1$$

$$\underline{U}_{\text{пов.2.3_кз}} = \underline{I}_{\text{пов.2.3_кз}} \cdot l_2 \cdot \underline{z}_l + \underline{I}_{\text{пов.1.3_кз}} \cdot l_1 \cdot \underline{z}_m + \underline{I}_{\text{неп.3_кз}} \cdot l_2 \cdot \underline{z}_m + R_{\text{п2}} \cdot \underline{I}_{\text{пов.2.п_кз}}, \quad 2.2$$

Выразив из соотношений 2.1 и 2.2 неизвестные величины l_1 и l_2 , получаем формулы для определения расстояния до ближней и дальней точки повреждения:

$$\begin{aligned} l_1 &= \frac{\underline{U}_{\text{пов.1.3_кз}} - R_{\text{п1}} \cdot \underline{I}_{\text{пов.1.п_кз}}}{\underline{I}_{\text{пов.1.3_кз}} \cdot \underline{z}_l + (\underline{I}_{\text{пов.2.3_кз}} + \underline{I}_{\text{неп.3_кз}}) \cdot \underline{z}_m} = \\ &= \frac{\frac{\underline{U}_{\text{пов.1.3_кз}}}{\underline{I}_{\text{пов.1.3_кз}}} - \frac{\underline{I}_{\text{пов.1.п_кз}}}{\underline{I}_{\text{пов.1.3_кз}}} \cdot R_{\text{п1}}}{\frac{\underline{I}_{\text{пов.1.3_кз}}}{\underline{I}_{\text{пов.1.3_кз}}} \cdot \underline{z}_l + \left(\frac{\underline{I}_{\text{пов.2.3_кз}} + \underline{I}_{\text{неп.3_кз}}}{\underline{I}_{\text{пов.1.3_кз}}} \right) \cdot \underline{z}_m}, \end{aligned} \quad 2.3$$

где \underline{z}_l – удельное сопротивление линии; \underline{z}_m – удельное сопротивление взаимной индукции; $\underline{I}_{\text{пов.1.3_кз}}$, $\underline{U}_{\text{пов.1.3_кз}}$ – ток и напряжение поврежденной фазы, на которой находится ближняя точка повреждения; $\underline{I}_{\text{неп.3_кз}}$, $\underline{U}_{\text{неп.3_кз}}$ – ток и напряжения неповрежденной фазы.

$$l_2 = \frac{U_{\text{пов.2.з_кз}} - I_{\text{пов.1.з_кз}} \cdot l_1 \cdot z_m - R_{\text{п2}} \cdot I_{\text{пов.2.п_кз}}}{z_l \cdot I_{\text{пов.2.з_кз}} + I_{\text{неп.з_кз}} \cdot z_m} =$$

$$\frac{\frac{U_{\text{пов.2.з_кз}}}{I_{\text{пов.2.з_кз}}} - \frac{I_{\text{пов.1.з_кз}}}{I_{\text{пов.2.з_кз}}} \cdot l_1 \cdot z_m - \frac{I_{\text{пов.2.п_кз}}}{I_{\text{пов.2.з_кз}}} \cdot R_{\text{п2}}}{z_l + \frac{I_{\text{неп.з_кз}}}{I_{\text{пов.2.з_кз}}} \cdot z_m}, \quad 2.4$$

Где $I_{\text{пов.2.з_кз}}$, $U_{\text{пов.2.з_кз}}$ – ток и напряжение поврежденной фазы, на которой находится дальняя точка повреждения.

Как видно из выражений 2.3 и 2.4, расстояния до повреждений зависят от активного переходного сопротивления, значение которого неизвестно.

Важную роль в определении места замыкания играет гипотеза о допущении резистивного характера цепи замыкания на землю, тогда влияние активных переходных сопротивлений можно исключить путем выделения реактивной составляющей сопротивления. При принятом допущении об отсутствии подпитки точки короткого замыкания током нагрузки, значение тока в месте установки защиты принимается равным току в месте повреждения $I_{\text{пов.1.п_кз}} \approx I_{\text{пов.1.з_кз}}$, а $I_{\text{пов.2.п_кз}} \approx I_{\text{пов.2.з_кз}}$, тогда получаем конечные выражения для расчета расстояния до ближней и дальней точки повреждения:

$$l_1 = \frac{\text{Im} \left(\frac{U_{\text{пов.1.з_кз}}}{I_{\text{пов.1.з_кз}}} \right)}{\text{Im} \left(z_l + \frac{(I_{\text{пов.2.з_кз}} + I_{\text{неп.з_кз}}) \cdot z_m}{I_{\text{пов.1.з_кз}}} \right)}, \quad 2.5$$

$$l_2 = \frac{\text{Im} \left(\frac{U_{\text{пов.2.з_кз}}}{I_{\text{пов.2.з_кз}}} \right) - \text{Im} \left(\frac{I_{\text{пов.1.з_кз}}}{I_{\text{пов.2.з_кз}}} \cdot z_m \right) \cdot l_1}{\text{Im} \left(z_l + \frac{I_{\text{неп.з_кз}}}{I_{\text{пов.2.з_кз}}} \cdot z_m \right)}. \quad 2.6$$

Поврежденная фаза ближней точки замыкания и расстояние до нее определяются по наименьшей величине реактивного сопротивления линии. Для этого в выражение 2.5 следует подставить измеренные значения токов и напряжений поврежденных фаз. Оставшиеся параметры используются для определения расстояния до дальней точки замыкания в соответствии с выражением 2.6.

Блок схема алгоритма определения места повреждения при ДвЗЗ на одной линии представлена на рисунке 2.2. Описанный алгоритм представлен в работах [119 – 122]. Старт алгоритма расчета места повреждения происходит после срабатывания защиты от ДвЗЗ с селектором поврежденных фаз.

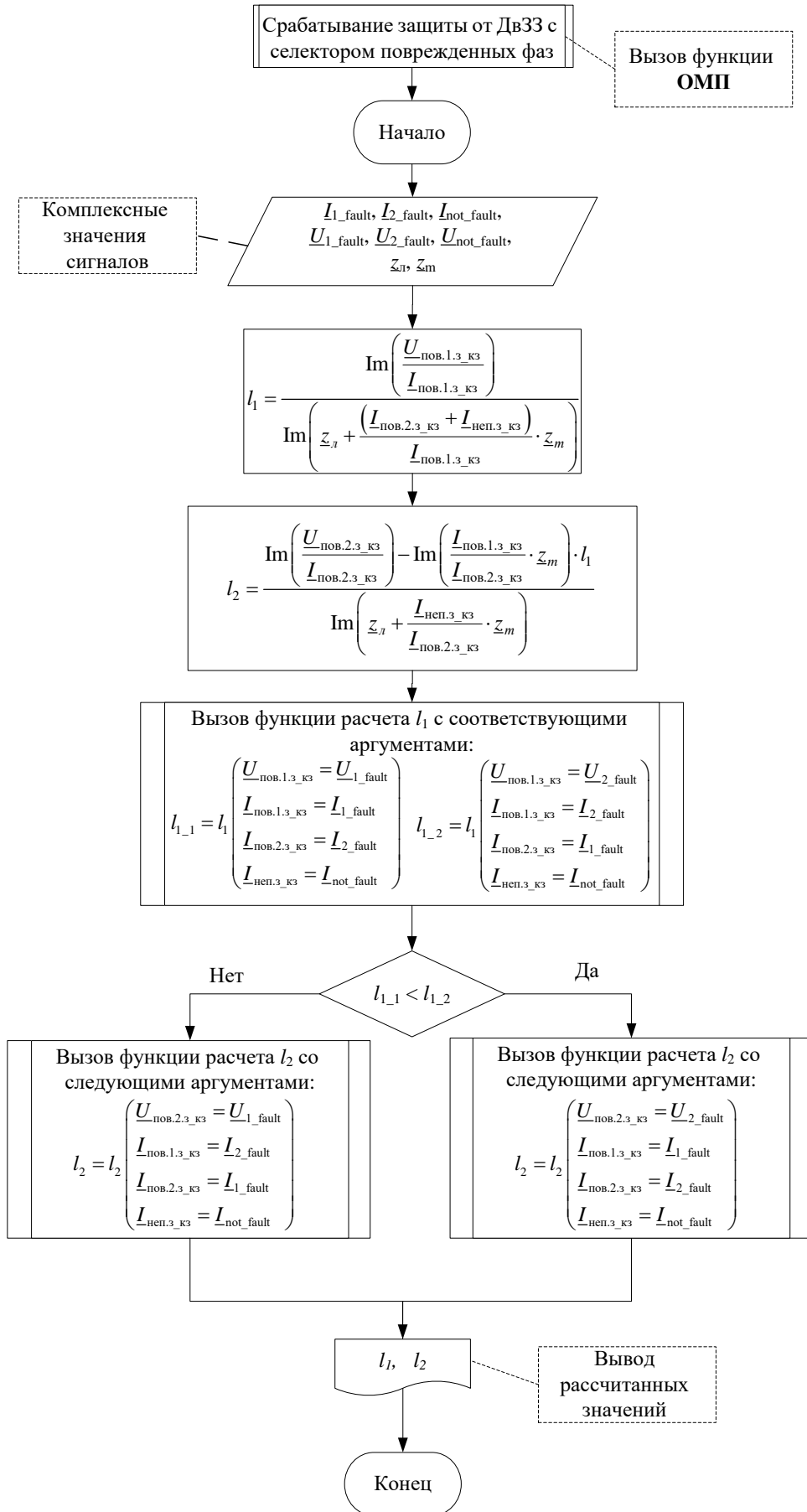


Рисунок 2.2 – Алгоритм определения места повреждения при ДвЗЗ на одной линии

2.2 Определение места повреждения при двойных замыканиях на землю на разных линиях

Для решения задачи определения места возникновения двойного замыкания на землю на разных линиях рассматривалась схема замещения распределительной сети, представленная на рисунке 2.3, в которой, $R_{п1}$, $R_{п2}$ – переходные сопротивления в местах замыканий; l_1 , l_2 – фактические расстояния до мест ближнего и дальнего замыканий на землю, $I_{x_пов.у.з_кз}$ – ток, протекающий в месте установки защиты; $I_{x_пов.у.п_кз}$ – ток, протекающий в месте повреждения; индекс «x» – обозначает анализируемую линию (1 соответствует линии L1, 2 – линии L2); индекс «у» – указывает фазу (1 – поврежденная фаза анализируемой линии, 2 – поврежденная фаза соседней линии) [124].

Для возможности решения представленной схемы, необходимо чтобы в расчетный алгоритм ОМП были заведены сигналы, полученные с ТТ, установленных на поврежденных линиях и с ТН, установленного на шинах распределительного устройства (РУ). Измерительные органы должны быть подключены на фазные измерения, благодаря этому рассчитанные сопротивления будут пропорциональны расстояниям до мест замыканий.

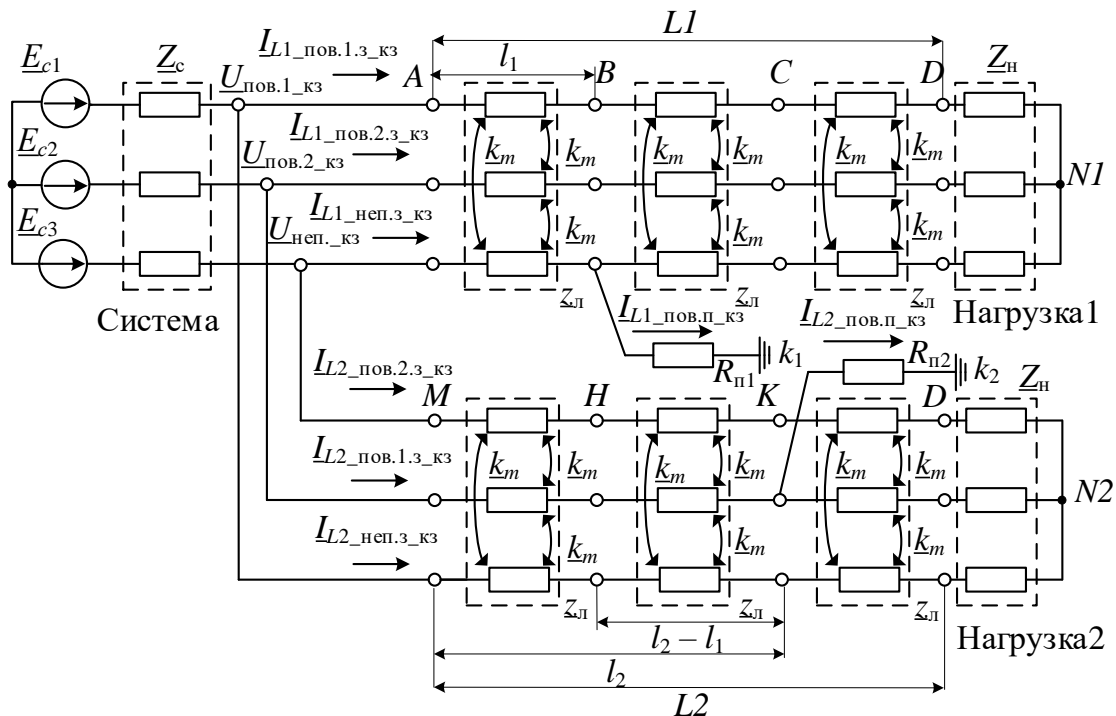


Рисунок 2.3 – Схема замещения сети в режиме двойного замыкания на землю на разных линиях на расстоянии l_1 и расстоянии l_2

Использование схемы, представленной на рисунке 2.3, в фазных координатах, позволяет получить выражения для определения расстояний до ближней и дальней точки повреждения при ДвЗЗ на разных линиях.

Напряжение поврежденных фаз на шинах подстанции определяется в соответствии со вторым законом Кирхгофа для контура фаза-земля, при допущении, что подпитка точек замыкания током нагрузки отсутствует, по следующему выражению:

$$\underline{U}_{пов.у_кз} = \underline{I}_{х_пов.1.з_кз} \cdot l_x \cdot \underline{z}_л + l_x \cdot \underline{z}_м \cdot (\underline{I}_{х_пов.2.з_кз} + \underline{I}_{х_неп.з_кз}) + \underline{I}_{х_пов.1.п_кз} R_{п_х}, \quad 2.7$$

С учетом выражения (2.7), расстояние до места повреждения l_x определяется соотношением:

$$l_x = \frac{\frac{\underline{U}_{пов.у_кз}}{\underline{I}_{х_пов.1.з_кз}} - \frac{\underline{I}_{х_пов.1.п_кз}}{\underline{I}_{х_пов.1.з_кз}} \cdot R_{п_х}}{\underline{z}_{л_х} + \underline{z}_{м_х} \cdot \frac{(\underline{I}_{х_пов.2.з_кз} + \underline{I}_{х_неп.з_кз})}{\underline{I}_{х_пов.1.з_кз}}}, \quad 2.8$$

При условии принятых в разделе 2.1 допущениях об отсутствии подпитки точки короткого замыкания током нагрузки и отсутствии влияния активных составляющих сопротивлений, расстояния до места повреждения определяется следующим соотношением:

$$l_x = \frac{\text{Im} \left(\frac{\underline{U}_{пов.у_кз}}{\underline{I}_{х_пов.1.з_кз}} \right)}{\text{Im} \left(\underline{z}_{л_х} + \underline{z}_{м_х} \cdot \frac{(\underline{I}_{х_пов.2.з_кз} + \underline{I}_{х_неп.з_кз})}{\underline{I}_{х_пов.1.з_кз}} \right)}, \quad 2.9$$

Расстояние до ближней точки повреждения определяется меньшим значением реактивного сопротивления поврежденных фаз.

Блок схема алгоритма определения места повреждения при ДвЗЗ на разных линиях представлена на рисунке 2.4. Старт алгоритма расчета места повреждения происходит после срабатывания защиты от ДвЗЗ с селектором поврежденных фаз.

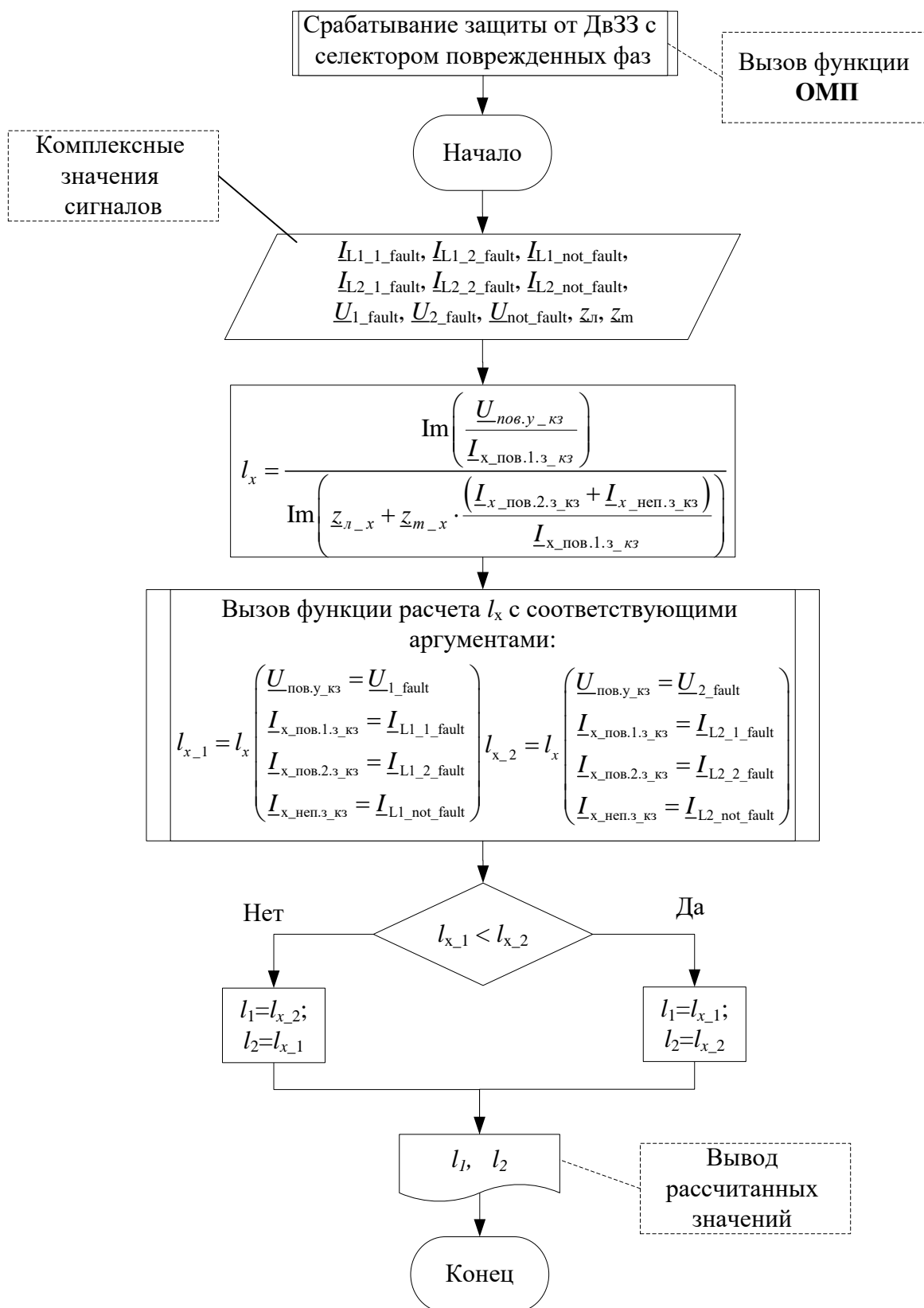


Рисунок 2.4 – Алгоритм определения места повреждения при ДвЗЗ на разных линиях

2.3 Имитационное моделирование двойных замыканий на землю

Имитационное моделирование – важнейшая составляющая проведения любого вида исследование. Поведение реальных объектов имитируется на ЭВМ в виде математических моделей, решаемых численными методами. Целью проводимых экспериментов является определение адекватности и возможности реализации предложенных методов ОМП. Проверка разработанных методов позволит сделать вывод о возможности их дальнейшего применения.

Современные ИЭУ обрабатывают полученные с ТТ и ТН мгновенные значения величин и благодаря алгоритмам цифровой обработки сигнала осуществляют выделение из аварийного сигнала периодическую составляющую, подавляя как высшие гармоники так и апериодическую составляющую, благодаря чему пропадает необходимость учета переходного процесса в имитационном моделировании, поэтому в рамках диссертационного исследования, имитационное моделирование основано на расчете периодических составляющих токов и напряжений установившегося режима[125].

Множественное имитационное моделирование проводилось в соответствии со схемой, представленной на рисунке 2.5 для линий электропередачи с распределенными параметрами, путем моделирования рассматриваемого набора конфигураций замыканий в программном комплексе *Matlab*, с использованием среды моделирования *Simulink*, в котором реализовано динамическое моделирование, описывающее составленные схемы замещения электрической сети в виде системы обыкновенных дифференциальных уравнений. В ходе моделирования в *Matlab* осуществляется численное решение системы уравнений состояния с постоянным либо переменным шагом по времени, результатом которой является совокупность мгновенных значений параметров режима во временном интервале [109, 112, 113]. Имитационная модель рассматриваемого участка электрической сети представлена в приложении А.

Для получения статистической зависимости исследуемых величин сигнала от места возникновения повреждений, проводилось моделирование серии экспериментов, в которых расстояния до мест повреждений, значения переходного сопротивления и сопротивления нагрузки задавались произвольным образом из указанного диапазона величин.

В процессе моделирования принимались следующие допущения: трехфазные элементы системы, принимались симметричными; переходное сопротивление выбиралось чисто активным; вид повреждения и поврежденные фазы известны.

В зависимости от взаимного расположения точек, рассматривалось два случая двойных замыканий на землю: на разных линиях, место первого повреждения находится на защищаемой линии, место второго – «за спиной»; оба повреждения находятся на одной линии.

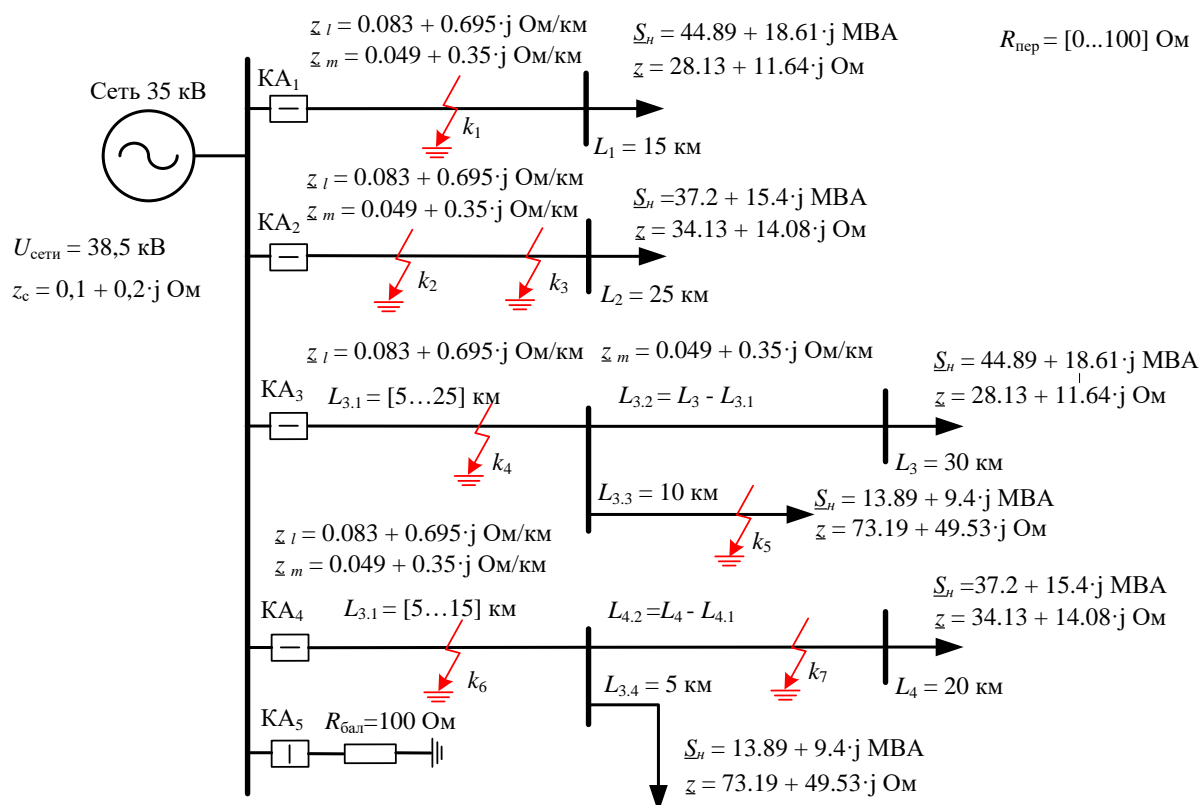


Рисунок 2.5 – Схема участка электрической сети, используемая при имитационном моделировании

Анализ полученных результатов при ДвЗЗ на одной линии показал, что расстояние до ближней точки повреждения (рисунок 2.6а) определяется с относительной погрешностью достигающей 26%, при этом, математическое ожидание полученной погрешности не превышает 7%, а среднеквадратичное отклонение не превышает 6%. Расстояние до дальней точки повреждения (рисунок 2.6б) определяется с относительной погрешностью достигающей 16%, при этом, математическое ожидание составило 4%.

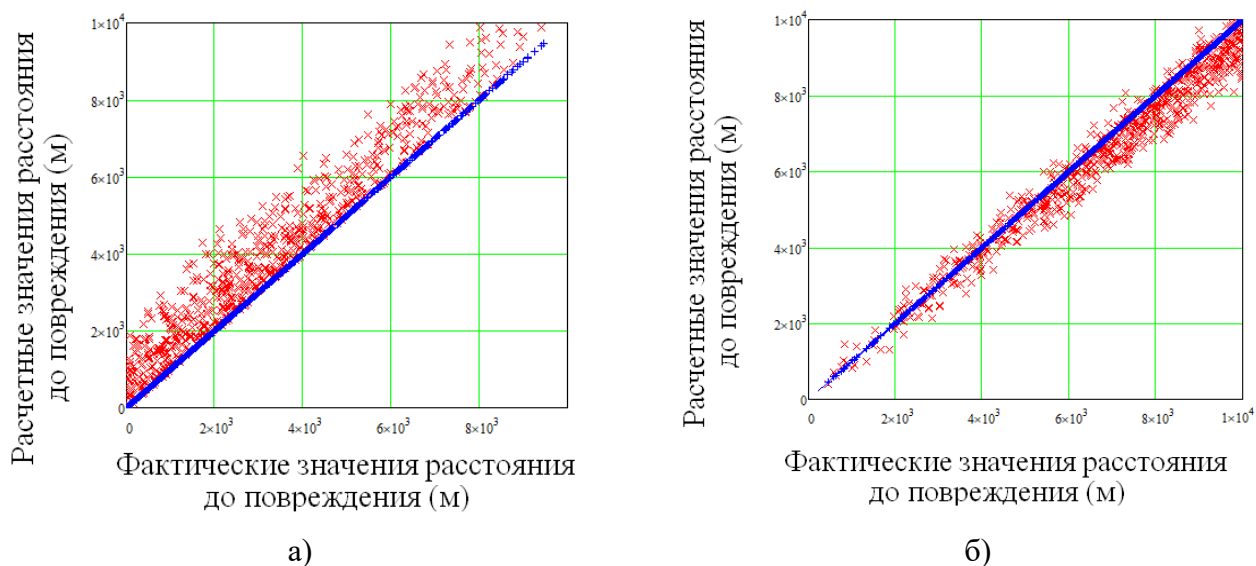


Рисунок 2.6 – Зависимость расчетных расстояний до точек повреждения от фактических, при двойных замыканиях на землю на одной линии

Анализ полученных результатов для ДвЗЗ на разных линиях показал, что расстояние до ближней и дальней точек повреждения (рисунок 2.7 а,б) определяется с относительной погрешностью, не превышающей 15%, математическим ожиданием не превышающим 5% и среднеквадратичным отклонением составляющим 3%.

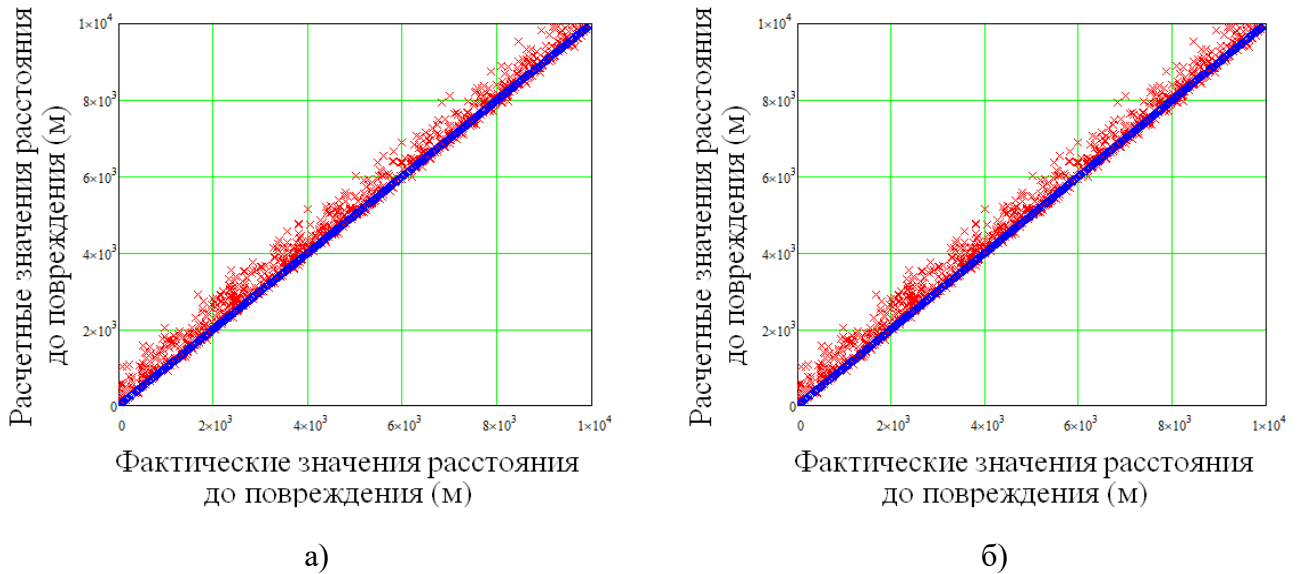


Рисунок 2.7 – Зависимость расчетных расстояний до точек повреждения от фактических, при двойных замыканиях на землю на разных линиях

Полученные результаты моделирования, схожи с известными методами ОМП ЛЭП при ДвЗЗ по параметрам аварийного режима, [116 – 118, 48, 72, 74 – 76], для сетей с симметричной конфигурацией, однако применение последних становится невозможным при наличии несимметрии сети. Таким образом, разработанные алгоритмы 2.2 и 2.4 позволяют определить область возникновения ДвЗЗ на одной и разных линиях электропередачи в сетях с разного рода несимметрией, путем установки измерительных органов на фазные измерения. Хотя представленные алгоритмы и обладают преимуществами по сравнению с известными методами, основанными на использовании метода симметричных составляющих (МСС), однако, также не позволяют с достаточной точностью определять расстояния до места повреждения.

При анализе полученных результатов имитационного моделирования, можно наблюдать положительную корреляцию между рассчитанными расстояниями и заданными, что в совокупности с незначительными значениями стандартного (среднеквадратичного) отклонения позволяют в дальнейшем произвести процедуру компенсации ошибок.

2.4 Уточняющие алгоритмы определения места повреждений ЛЭП при двойных замыканиях на землю

Современное развитие вычислительных мощностей позволяет применять различные методы компенсации расчета. В данном разделе рассмотрены два подхода к решению поставленной задачи. Первый из них подразумевает множественное имитационное моделирование, получение обучающей выборки, выделения критерия для распознавания зависимости погрешности расчета от различных величин и дальнейшее корректирование предлагаемых алгоритмов в соответствии с обучающей выборкой. Идея второго подхода заключается в итерационном уточнении интересующих параметров, с учетом предыдущих значений, до достижения требуемой точности.

2.4.1 Компенсация методической погрешности расчета разработанных методов на основании проведения статистического моделирования

Имитационное моделирование, подверженное случайному изменению интересующих параметров, проводимое в рамках диссертационной работы, принято называть статистическим моделированием. Множественное имитационное моделирование позволяет воспроизвести опыты коротких замыкания с различными параметрами исследуемой схемы замещения. В качестве изменяющихся величин особый интерес вызывают значение переходного сопротивления в месте повреждения, а также удаленность точек короткого замыкания. Многократное воспроизведение интересующих типов повреждений позволяет получить выборку измеряемых величин (напряжение на шинах, фазные токи поврежденных фидеров) в зависимости от изменяемых параметров.

Анализ серии проводимых экспериментов позволил выделить зависимость между погрешностью расчета и величиной переходного сопротивления. Расчетная погрешность легко устраняется за счет введения корректирующего коэффициента, сформированного по обучающей выборке. Структурная схема алгоритма компенсации погрешности расчета за счет использования статистического моделирования представлена на рисунке 2.8

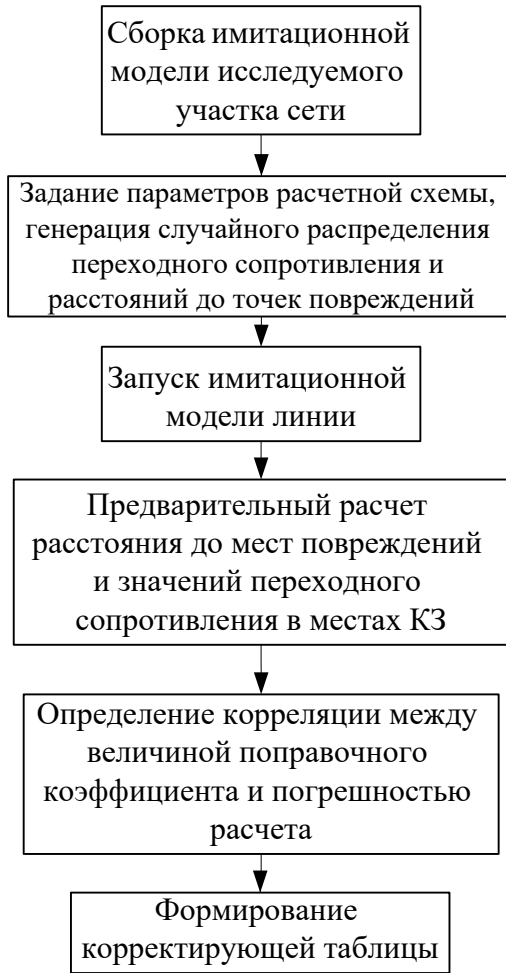


Рисунок 2.8 – Структурная схема алгоритма компенсации погрешности расчета за счет использования статистического моделирования

Получение корректирующего коэффициента, как было отмечено ранее, подразумевает предварительное имитационное моделирование повреждений исследуемого участка сети, получение информации о расчетах, а также выделение критерия зависимости погрешности расчета от влияния различных параметров. Полученная из расчетов информация об ОМП для таких видов замыканий, позволит в дальнейшем использовать ее для компенсации ошибок [126, 129].

Особенность проводимых экспериментов заключается в определении величины отклонения фактических расстояний от расчетных, при заданном значении переходного сопротивления. Исследование полученных выборок позволило установить зависимость поправочного коэффициента от величины переходного сопротивления, значение которого возможно определить в результате предварительного уточнения расстояний по представленным в разделах 2.1, 2.2 формулах. Было установлено, что величина ошибки тем больше, чем больше значение переходного сопротивления.

Зависимость поправочного коэффициента от величины переходного сопротивления для ДвЗЗ представлена в таблице 2.1.

Таблица 2.1– Зависимость поправочного коэффициента от переходного сопротивления

Величина переходного сопротивления	Величина поправочного коэффициента			
	ДвЗЗ на одной линии		ДвЗЗ на разных линиях	
	Для ближней точки повреждения	Для дальней точки повреждения	Для ближней точки повреждения	Для дальней точки повреждения
0,5	5,75	7,15	22,4	48,88
1,0	6,64	31,86	36,5	104,78
1,5	36,42	68,25	44,9	163,24
2,00	81,64	103,09	50,5	230,99
2,5	144,80	132,42	56,0	315,25
3,00	215,60	168,76	67,0	391,82
3,5	304,29	196,53	78,6	476,03
4,0	405,53	222,73	100,3	563,16
4,50	518,03	247,37	130,6	659,56
5,0	643,71	266,63	171,4	742,34
5,50	774,07	293,52	213,3	863,90
6,0	914,73	317,45	263,8	978,87
6,5	1072,47	326,25	347,1	1071,54
7,00	1230,64	346,98	408,6	1195,94
7,5	1396,88	365,65	485,1	1307,88
8,00	1566,93	388,85	567,1	1423,96
8,5	1754,11	392,92	657,6	1565,51
9,0	1935,86	415,75	768,7	1668,50
9,50	2139,91	408,73	860,2	1789,59
10,0	2336,65	427,85	949,32	1949,09

2.4.1.1 Определение переходного сопротивления для двойных замыканий на землю на одной линии.

Для определения переходного сопротивления предлагается задействовать неповрежденный контур, содержащий сопротивление нагрузки (рисунок 2.9). Учет нагрузочной составляющей позволяет произвести расчет переходного сопротивления с учетом токораспределения линии в режиме двойного замыкания.

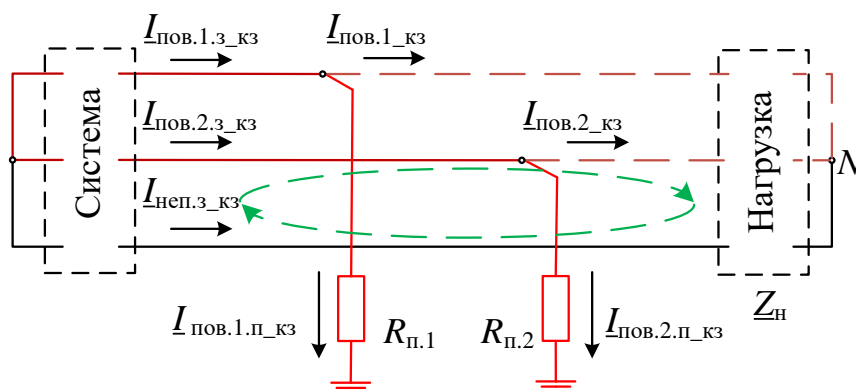


Рисунок 2.9 – Токораспределение в режиме двойного замыкания на землю на одной линии

Значение напряжения в нейтральной точке нагрузки N , для схемы сети с двойным замыканием на землю на одной линии, с учетом параметров неповрежденной фазы, при условии симметрии нагрузки, определяется по следующему выражению (рисунок 2.1):

$$\underline{U}_{N_кз} = \underline{U}_{\text{пов.1.з_кз}} - \underline{I}_{\text{пов.1.з_кз}} \cdot (\underline{z}_l \cdot L + \underline{z}_H) - \underline{I}_{\text{пов.1.з_кз}} \cdot l_1 \cdot \underline{z}_m - \underline{I}_{\text{пов.2.з_кз}} \cdot l_2 \cdot \underline{z}_m, \quad 2.10$$

где \underline{U}_N – напряжение в нейтральной точке нагрузки; \underline{z}_m – удельные сопротивления взаимной индукции.

Схема замещения поврежденной фазы с учетом взаимоиндукции можно представить в следующем виде (рисунок 2.10).

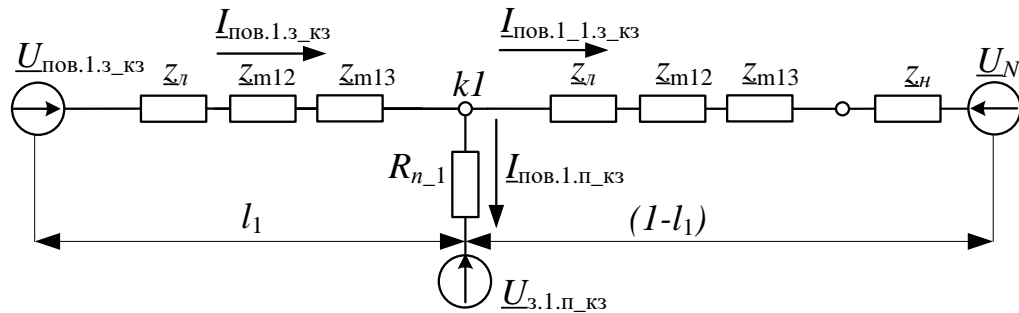


Рисунок 2.10 – Схема замещения поврежденной фазы первой линии, при двойном замыкании на землю

$$\text{где } \underline{z}_{m12} = \underline{z}_m \cdot \frac{\underline{I}_{\text{пов.2.з_кз}}}{\underline{I}_{\text{пов.1.з_кз}}}; \quad \underline{z}_{m13} = \underline{z}_m \cdot \frac{\underline{I}_{\text{неп.з_кз}}}{\underline{I}_{\text{пов.1.з_кз}}}; \quad \underline{z}_{m21} = \underline{z}_m \cdot \frac{\underline{I}_{\text{пов.1.з_кз}}}{\underline{I}_{\text{пов.2.з_кз}}}; \quad \underline{z}_{m23} = \underline{z}_m \cdot \frac{\underline{I}_{\text{неп.з_кз}}}{\underline{I}_{\text{пов.2.з_кз}}} -$$

удельные сопротивления взаимной индукции соответствующих фаз.

Принимая во внимание факт того, что сопротивление эквивалентного участка, полученное по закону Ома, равно сумме сопротивлений эквивалентной цепи, запишем следующее выражение:

$$\begin{aligned} & \frac{\underline{U}_{\text{з.1.п_кз}}}{R_{\text{п1}}} + \frac{\underline{U}_{N_кз}}{(1-l_1) \cdot (\underline{z}_l + \underline{z}_{m12} + \underline{z}_{m13})} \\ & \underline{U}_{\text{пов.1.з_кз}} - \frac{1}{\frac{1}{R_{\text{п1}}} + \frac{1}{(1-l_1) \cdot (\underline{z}_l + \underline{z}_{m12} + \underline{z}_{m13})}} = \quad 2.11 \\ & \underline{I}_{\text{пов.1.з_кз}} \\ & = (\underline{z}_l + \underline{z}_{m12} + \underline{z}_{m13}) \cdot l_1 + \frac{R_{\text{п1}} \cdot ((1-l_1) \cdot (\underline{z}_l + \underline{z}_{m12} + \underline{z}_{m13}) + \underline{z}_H)}{R_{\text{п1}} + (1-l_1) \cdot (\underline{z}_l + \underline{z}_{m12} + \underline{z}_{m13}) + \underline{z}_H} \end{aligned}$$

Пусть $(\underline{z}_l + \underline{z}_{m12} + \underline{z}_{m13}) = \underline{z}_1$, $\underline{z}_2 = (\underline{z}_l + \underline{z}_{m21} + \underline{z}_{m23})$, а напряжение земли $\underline{U}_{\text{з.1.п_кз}} = 0$, тогда с учетом преобразований, полученное выражение будет выглядеть следующим образом:

$$\underline{U}_{\text{пов.1.з_кз}} - \frac{\underline{U}_{N_кз}}{(1-l_1) \cdot \underline{z}_1 + R_{\text{п1}} + \underline{z}_H} = \underline{z}_1 \cdot l_1 + \frac{R_{\text{п1}} \cdot ((1-l_1) \cdot \underline{z}_1 + \underline{z}_H)}{R_{\text{п1}} + (1-l_1) \cdot \underline{z}_1 + \underline{z}_H}, \quad 2.12$$

Выразив из выражения (2.12) $R_{п1}$, и взяв его абсолютное значение, получим формулу для определения переходного сопротивления в месте возникновения первого короткого замыкания:

$$R_{п1} = \left| \frac{\underline{U}_{пов.1.з_кз} \cdot ((1-l_1) \cdot \underline{z}_1 + \underline{z}_H) - \underline{I}_{пов.1.з_кз} \cdot \underline{z}_1 \cdot l_1 \cdot (\underline{z}_1 - \underline{z}_1 \cdot l_1 + \underline{z}_H)}{\underline{I}_{пов.1.з_кз} \cdot (\underline{z}_1 + \underline{z}_H) - \underline{U}_{пов.1.з_кз} + \underline{U}_{N_кз}} \right|. \quad 2.13$$

Аналогичным образом определяется переходное сопротивление в месте возникновения второй точки замыкания:

$$R_{п2} = \left| \frac{\underline{U}_{пов.2.з_кз} \cdot ((1-l_2) \cdot \underline{z}_2 + \underline{z}_H) - \underline{I}_{пов.2.з_кз} \cdot \underline{z}_2 \cdot l_2 \cdot (\underline{z}_2 - \underline{z}_2 \cdot l_2 + \underline{z}_H)}{\underline{I}_{пов.2.з_кз} \cdot (\underline{z}_2 + \underline{z}_H) - \underline{U}_{пов.2.з_кз} + \underline{U}_{N_кз}} \right|. \quad 2.14$$

2.4.1.2 Определение переходного сопротивления для двойных замыканий на землю на разных линиях.

Для схемы с двойным замыканием на землю на разных линиях найдем значения напряжения в нейтральных точках $N1$ и $N2$ (Рисунок 2.3), по параметрам одной из неповрежденных фаз.

Учет нагрузочной составляющей позволяет произвести расчет переходного сопротивления с учетом токораспределения линии в режиме двойного замыкания (рисунок 2.9).

Значение напряжения в нейтральной точке $N1$ в соответствии с рисунком 2.11, по параметрам неповрежденной фазы определяется следующим образом:

$$\underline{U}_{N1_кз} = \underline{U}_{неп.з_кз} - \underline{I}_{L1_неп.з_кз} \cdot (\underline{z}_l \cdot l_1 + \underline{z}_H) - (\underline{I}_{L1_пов.1.з_кз} + \underline{I}_{L1_пов.2.з_кз}) \cdot l_1 \cdot \underline{z}_m, \quad 2.15$$

где l_1 – расстояние до первой точки повреждения, полученное по формуле 2.9.

Рассмотрим поврежденную фазу первой линии, электрической схемы, представленной на рисунке 2.3, с учетом взаимоиנדукции соседних фаз (рисунок 2.11).

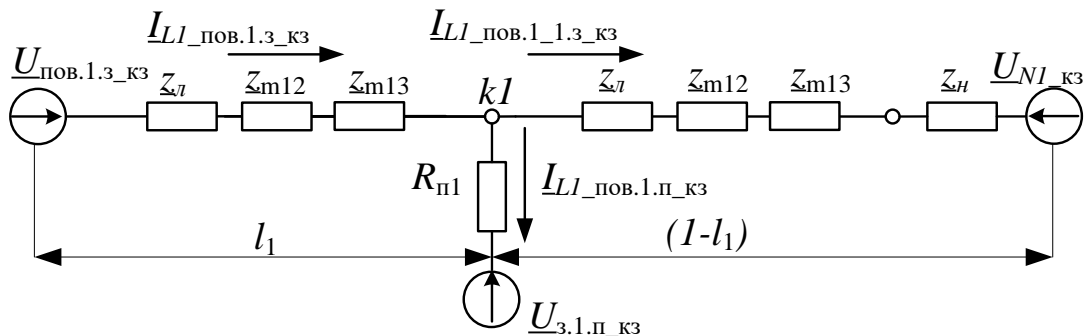


Рисунок 2.11 – Схема замещения поврежденной фазы первой линии, при двойном замыкании на землю

где $\underline{z}_{m12} = \underline{z}_m \cdot \frac{\underline{I}_{L1_пов.2.з_кз}}{\underline{I}_{L1_пов.1.з_кз}}$; $\underline{z}_{m13} = \underline{z}_m \cdot \frac{\underline{I}_{L1_неп.з_кз}}{\underline{I}_{L1_пов.1.з_кз}}$ – удельные сопротивления взаимной

индукции соответствующих фаз. Приняв во внимание тот факт, что сопротивление эквивалентного участка, полученное по закону Ома равно сумме сопротивлений эквивалентной цепи, запишем следующее выражение:

$$\frac{\frac{\underline{U}_{3.1.п_кз}}{R_{п1}} + \frac{\underline{U}_{N1_кз}}{(1-l_1) \cdot (\underline{z}_л + \underline{z}_{m12} + \underline{z}_{m13})}}{\frac{1}{R_{п1}} + \frac{1}{(1-l_1) \cdot (\underline{z}_л + \underline{z}_{m12} + \underline{z}_{m13})}} = \frac{\underline{U}_{пов.1.з_кз}}{\underline{I}_{L1_пов.1.з_кз}} \quad 2.16$$

$$= (\underline{z}_л + \underline{z}_{m12} + \underline{z}_{m13}) \cdot l_1 + \frac{R_{п1} \cdot ((1-l_1) \cdot (\underline{z}_л + \underline{z}_{m12} + \underline{z}_{m13}) + \underline{z}_{н1})}{R_{п1} + (1-l_1) \cdot (\underline{z}_л + \underline{z}_{m12} + \underline{z}_{m13}) + \underline{z}_{н1}}$$

Пусть $(\underline{z}_л + \underline{z}_{m12} + \underline{z}_{m13}) = \underline{z}_1$, а напряжение земли $\underline{U}_{3.1.п_кз} = 0$, тогда с учетом преобразований, полученное выражение будет выглядеть следующим образом:

$$\frac{\underline{U}_{пов.1.з_кз} + \frac{\underline{U}_{N1_кз}}{(1-l_1) \cdot \underline{z}_{л1} + R_{п1} + \underline{z}_{н1}}}{\underline{I}_{L1_пов.1.з_кз}} = \underline{z}_1 \cdot l_1 + \frac{R_{п1} \cdot ((1-l_1) \cdot \underline{z}_{л1} + \underline{z}_{н1})}{R_{п1} + (1-l_1) \cdot \underline{z}_{л1} + \underline{z}_{н1}} \quad 2.17$$

Выразив из данного выражения $R_{п1}$ и взяв его абсолютное значение, получим формулу для определения переходного сопротивления:

$$R_{п1} = \left| \frac{\underline{U}_{пов.1.з_кз} \cdot ((1-l_1) \cdot \underline{z}_1 + \underline{z}_{н1}) - \underline{I}_{L1_пов.1.з_кз} \cdot \underline{z}_1 \cdot l_1 \cdot (\underline{z}_1 - \underline{z}_1 \cdot l_1 + \underline{z}_{н1})}{\underline{I}_{L1_пов.1.з_кз} \cdot (\underline{z}_1 + \underline{z}_{н1}) - \underline{U}_{пов.1.з_кз} + \underline{U}_{N1_кз}} \right| \quad 2.18$$

Напряжения в нейтральной точке $N2$ в соответствии с (рисунком 2.12), по параметрам неповрежденной фазы определяется по следующему выражению:

$$\underline{U}_{N2_кз} = \underline{U}_{неп.з_кз} - \underline{I}_{L2_неп.з_кз} \cdot (\underline{z}_л \cdot L_2 + \underline{z}_н) - (\underline{I}_{L2_пов.1.з_кз} + \underline{I}_{L2_пов.2.з_кз}) \cdot l_2 \cdot \underline{z}_м, \quad 2.19$$

l_2 – расстояние до второй точки повреждения, полученное по формуле 2.9. Рассмотрим поврежденную фазу второй линии, электрической схемы, представленной на рисунке 2.3, с учетом взаимной индукции соседних фаз (рисунок 2.12).

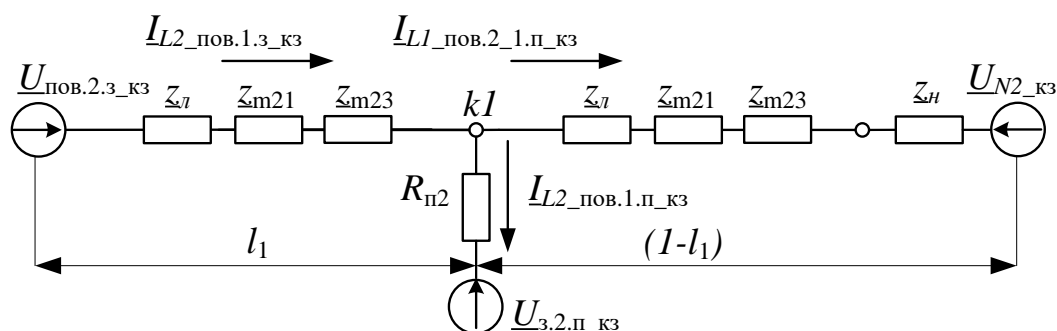


Рисунок 2.12 – Схема замещения поврежденной фазы второй линии, при двойном замыкании на землю

где $z_{m21} = z_m \cdot \frac{I_{L2_пов.2.3_кз}}{I_{L2_пов.1.3_кз}}$; $z_{m23} = z_m \cdot \frac{I_{L2_неп.3_кз}}{I_{L2_пов.1.3_кз}}$ – удельные сопротивления взаимной

индукции соответствующих фаз.

Приняв во внимание тот факт, что сопротивление эквивалентного участка, полученное по закону Ома равно сумме сопротивлений эквивалентной цепи, запишем следующее выражение:

$$\frac{\frac{U_{3.2.п_кз}}{R_{п2}} + \frac{U_{N2_кз}}{(1-l_2) \cdot (z_l + z_{m21} + z_{m23})}}{\frac{1}{R_{п2}} + \frac{1}{(1-l_2) \cdot (z_l + z_{m21} + z_{m23})}} = \frac{U_{пов.2.3_кз}}{I_{L2_пов.1.3_кз}} \quad 2.20$$

$$= (z_l + z_{m21} + z_{m23}) \cdot l_1 + \frac{R_{п2} \cdot ((1-l_2) \cdot (z_l + z_{m21} + z_{m23}) + z_{H2})}{R_{п2} + (1-l_2) \cdot (z_l + z_{m21} + z_{m23}) + z_{H2}}$$

Пусть $z_l + z_{m21} + z_{m23} = z_2$, а напряжение земли $U_{3.2.п_кз} = 0$, тогда с учетом преобразований, полученное выражение будет выглядеть следующим образом:

$$\frac{U_{пов.2.3_кз} + \frac{U_{N2_кз}}{(1-l_2) \cdot z_2 + R_{п2} + z_{H2}}}{I_{L2_пов.1.3_кз}} = z_2 \cdot l_2 + \frac{R_{п2} \cdot ((1-l_2) \cdot z_2 + z_{H2})}{R_{п2} + (1-l_2) \cdot z_2 + z_{H2}} \quad 2.21$$

Выразив из данного выражения $R_{п2}$ и взяв его абсолютное значение, получим формулу для определения переходного сопротивления в месте короткого замыкания:

$$R_{п2} = \left| \frac{U_{пов.2.3_кз} \cdot ((1-l_2) \cdot z_2 + z_{H2}) - I_{L2_пов.1.3_кз} \cdot z_2 \cdot l_2 \cdot (z_2 - z_2 \cdot l_2 + z_{H2})}{I_{L2_пов.1.3_кз} \cdot (z_2 + z_{H2}) - U_{пов.2.3_кз} + U_{N2_кз}} \right| \quad 2.22$$

Рассчитав по формулам 2.13, 2.14, 2.18 и 2.22 величину переходного сопротивления и взяв из таблицы 2.1 ближайшее значение $R_{п1}$ и $R_{п2}$, определяется соответствующее значение компенсирующего коэффициента.

На рисунках 2.13 и 2.15 представлена зависимость расчетных расстояний до ближней (а) и дальней (б) точек повреждения от фактических значений, с учетом применения поправочного коэффициента, введенного в соответствии с величиной переходного сопротивления, рассчитанного по формулам (2.13, 2.14) и (2.18, 2.22).

Введение поправочного коэффициента для минимизации ошибки расчета, при ДвЗЗ на одной линии, позволило снизить максимальную погрешность расчетов до 15 процентов, вместо 26 (рисунок 2.13а) для ближней точки повреждения и до 12 процентов, вместо 16, для дальней точки повреждения (рисунок 2.13б).

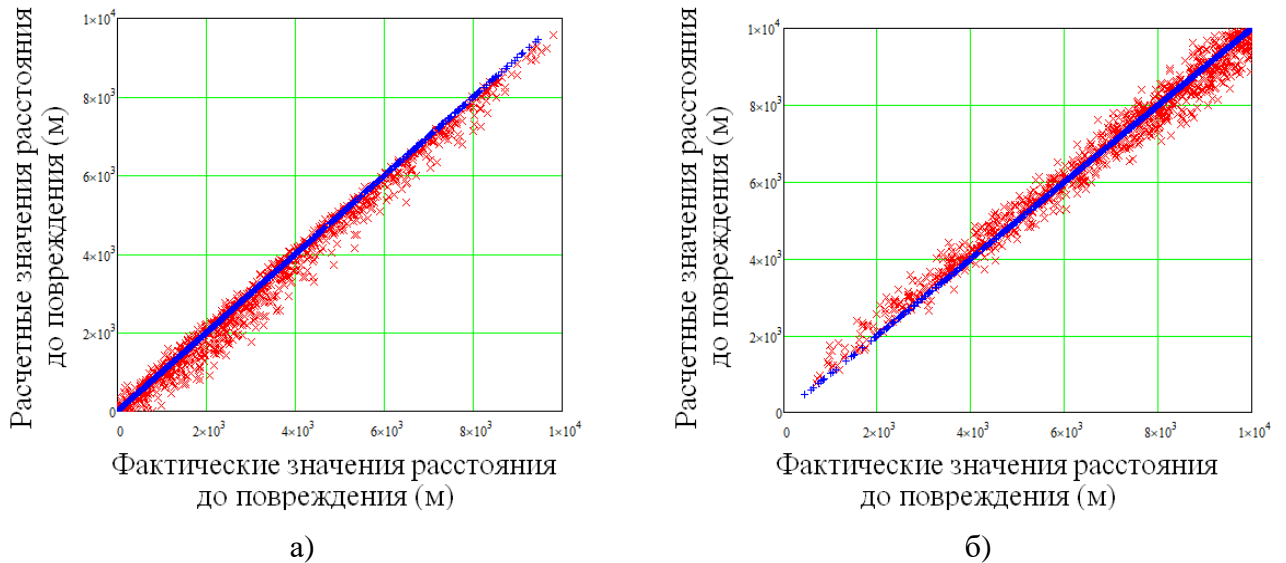


Рисунок 2.13 – Зависимость расчетных расстояний от фактических при введении поправочного коэффициента для ДвЗЗ на одной линии

Результаты имитационного моделирования показывают, что переходное сопротивление существенно влияет на точность определения местоположения замыкания. Определить точно повреждение в самом расчетном месте, без применения процедур компенсации ошибки, практически невозможно, а какая должна быть область осмотра – неизвестно.

Актуальным является сопровождение информации, передаваемой эксплуатационному персоналу, о расчетном расстоянии до места повреждения, дополнительной информацией, чтобы было ясно как использовать расчеты. Такой дополнительной информацией является рекомендуемая зона обхода поврежденной линии [205], она должна быть достаточно большой – настолько, чтобы практически все фактические короткие замыкания лежали внутри этой зоны и одновременно малой, чтобы снизить временные затраты, необходимые для поиска места повреждения.

Зоной обхода можно назвать участок ВЛ расположенный по обе стороны от расчетного места повреждения, этот термин является важным аспектом при организации поиска повреждения, хотя ему не уделяется достаточно внимания при исследовании различных методов ОМП.

Примем гипотезу, что наша случайная ошибка при расчете ОМП подчиняется нормальному закону распределения (это общепринятая гипотеза для случайных ошибок прямых и косвенных измерений).

Имея нормальное распределение случайной величины, можем определить доверительный интервал. В рамках диссертации, для сопоставления точности исследуемых алгоритмов, используется правило трех сигм (3σ), которое охватывает практически все значения нормального распределения случайной величины (приблизительно 0,99).

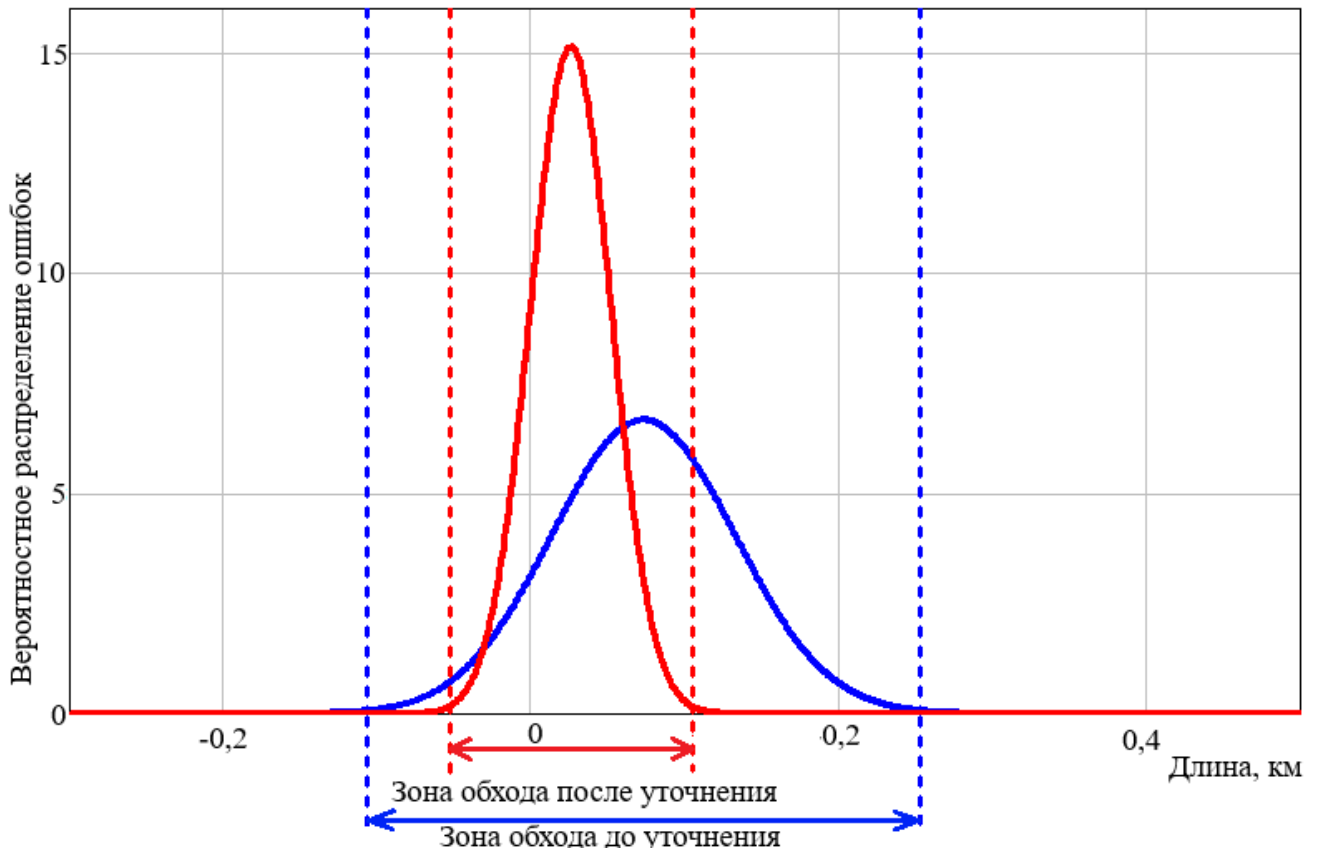


Рисунок 2.14 – График плотности распределения относительной погрешности расчета при ДвЗЗ на одной линии

По правилу трех сигм (3σ), был определен доверительный интервал, соответствующей зоне обхода. На рисунке 2.14 обозначены плотность распределения относительной погрешности расчета (синим – расчет ведется по параметрам аварийного режима, красным – после введения поправочного коэффициента).

Для ближней точки повреждения (рисунок 2.14), полученной до введения поправочного коэффициента, зона обхода составляла 36% от общей протяженности линии, а после введения поправочного коэффициента стала составлять 15%. Для дальней точки замыкания зона обхода составляла 20%, а после введения поправочного коэффициента стала составлять 14%. Результаты расчетов сведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Результаты расчетов зон обхода при ДвЗЗ на одной линии

		Левая граница зоны обхода, о.е.	Правая граница зоны обхода, о.е.	Протяженность зоны обхода, о.е.	Протяженность зоны обхода, %.
Ближняя точка повреждения	До введения поправочного коэффициента	-0,2526	-0,1064	0,359	36
	После введения поправочного коэффициента	-0,05	0,101	0,151	15
Дальняя точка повреждения	До введения поправочного коэффициента	-0,0573	0,1358	0,1958	20
	После введения поправочного коэффициента	-0,0408	0,096	0,1368	14

Введение поправочных коэффициентов для ДвЗЗ на разных линиях позволило снизить максимальное значение относительной погрешности расчета с 15 процентов до 10 для ближней и дальней точек повреждения (рисунок 2.15).

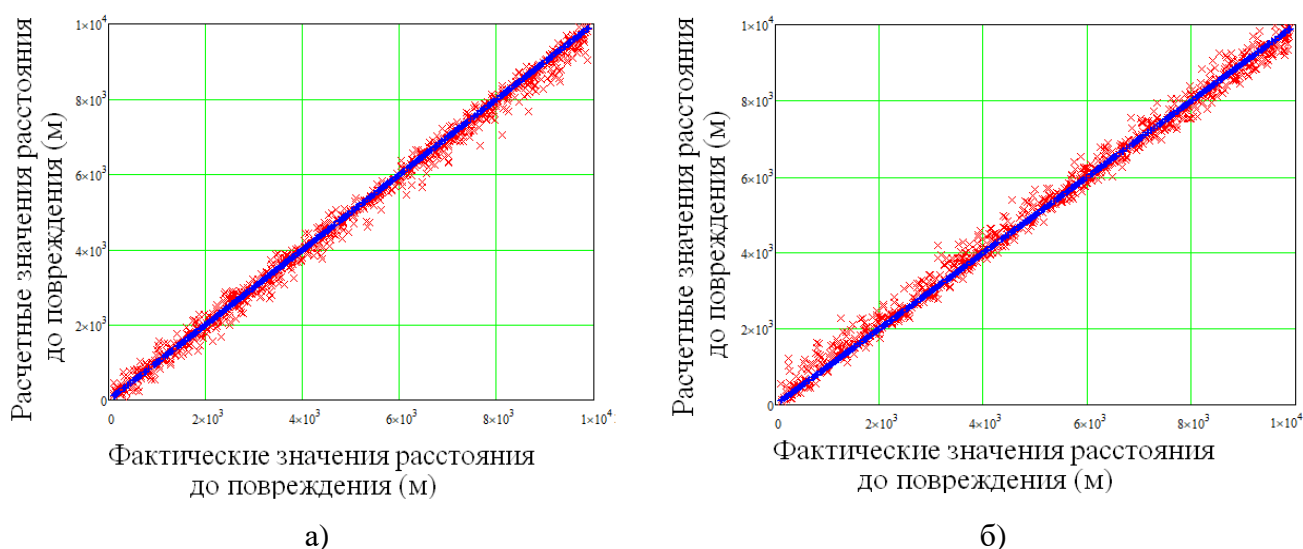


Рисунок 2.15 – Зависимость расчетных расстояний от фактических при введении поправочного коэффициента для ДвЗЗ на разных линиях

Аналогичным образом была определена плотность распределения относительных погрешностей расчета для ДвЗЗ на разных линиях для каждого из мест замыканий.

Для ближней и дальней точек замыканий, полученных до введения поправочного коэффициента, зона обхода составляла 26% от общей протяженности линии, после введения поправочного коэффициента стала составлять 10%. Результаты расчетов зон обхода сведены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Результаты расчетов зон обхода при ДвЗЗ на разных линиях

		Левая граница зоны обхода, о.е.	Правая граница зоны обхода, о.е.	Протяженность зоны обхода, о.е.	Протяженность зоны обхода, %.
Ближняя точка повреждения	До введения поправочного коэффициента	-0,0088	0,1688	0,257	26
	После введения поправочного коэффициента	-0,037	0,06	0,097	10
Дальняя точка повреждения	До введения поправочного коэффициента	-0,0088	0,1688	0,257	26
	После введения поправочного коэффициента	-0,037	0,06	0,097	10

Результаты расчетов расстояния до места повреждения, в зависимости от применения различных методов расчета и методов компенсации ошибки, представлены в таблице 2.6

2.4.2 Уточнение расстояний до повреждений с помощью последовательных итерационных процедур

Альтернативным методом повышение точности расчета является применение итерационного уточнения полученных результатов [129 – 131], где в качестве исходных параметров используются осциллограммы токов и напряжений при установившемся режиме КЗ, а также значения расстояний до мест повреждений, полученные в первом приближении, по упрощенным формулам (2.5, 2.6) и (2.9). Далее определялись напряжения в нейтральных точках нагрузки и значения переходных сопротивлений. Последующие расчеты расстояний l_1 и l_2 реализовались уже с учетом вычисленных параметров, а для определения местоположения повреждений решалась схема замещения, содержащая рассчитанные величины. Многократный последовательный пересчет неизвестных параметров участка сети производился до тех пор, пока итерационный процесс не сходил к окончательному результату.

В случае применения в качестве уточняющего алгоритма последовательный итерационный пересчет модель изменения интересующих параметров описывается следующим уравнением:

$$X_{i+1} = X_i + \mu_{i+1}, \quad 2.23$$

Где X_i – уточняемый параметр на i – й итерации; μ_{i+1} – величина, характеризующая изменение величины X на $i+1$ шаге итерации по сравнению с i – м шагом, обеспечивающая требуемую точность расчета.

Структурная схема применения итерационного уточнения представлена на рисунке 2.16.

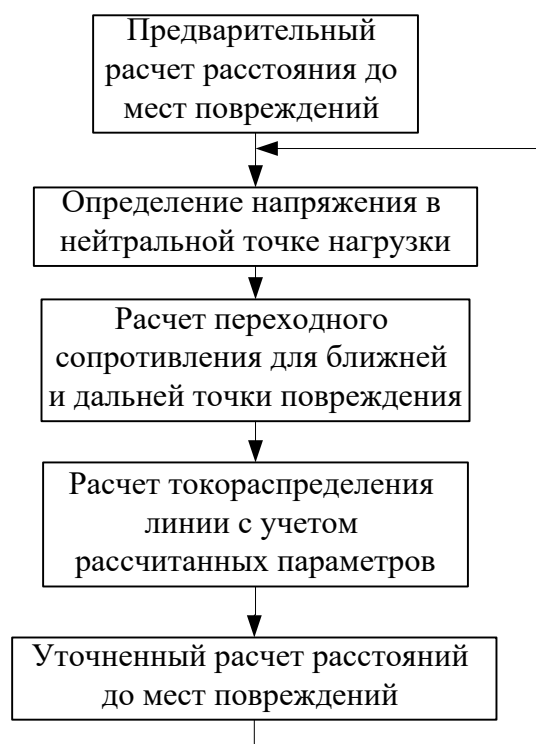


Рисунок 2.16 – Структурная схема алгоритма уточнения, основанного на использовании итерационных процедур

2.4.2.1 Применение итерационного пересчета для двойных замыканий на землю на одной линии

Для схемы с двойным замыканием на землю на одной линии, по параметрам неповрежденной фазы, в соответствии с формулой 2.10 определяется напряжения в нейтральной точке N (Рисунок 2.1). Далее, в соответствии с формулами 2.13, 2.14 определяется величина переходного сопротивления в ближней и дальней точке повреждения, в соответствии с которыми определяется величина тока, протекающего через переходное сопротивление (рисунок 2.17).

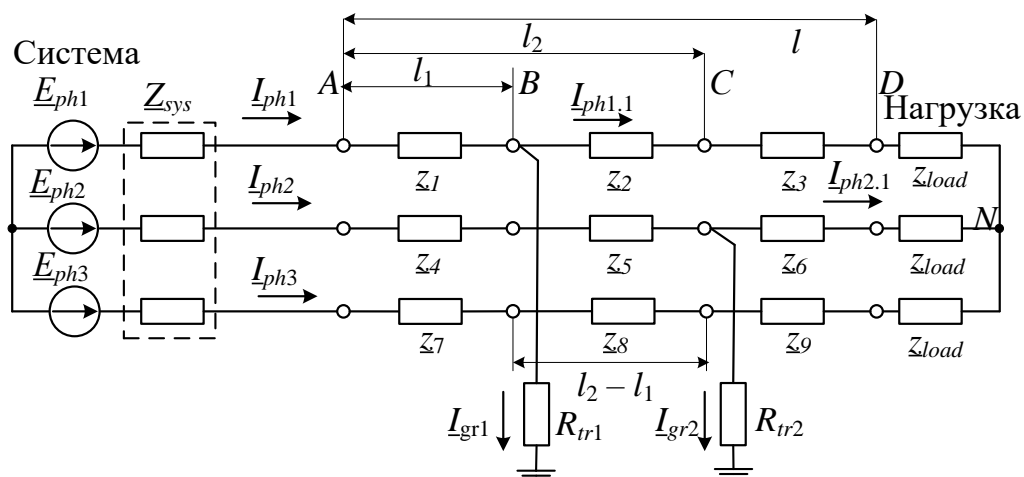


Рисунок 2.17 – Схема замещения поврежденной фазы, при двойном замыкании на землю одной линии

$$\text{где } \underline{z}_{m121} = \underline{z}_m \cdot \frac{\underline{I}_{ph2}}{\underline{I}_{ph1}}; \quad \underline{z}_{m131} = \underline{z}_m \cdot \frac{\underline{I}_{ph3}}{\underline{I}_{ph1}}; \quad \underline{z}_{m122} = \underline{z}_m \cdot \frac{\underline{I}_{ph2}}{\underline{I}_{ph1.1}}; \quad \underline{z}_{m132} = \underline{z}_m \cdot \frac{\underline{I}_{ph3}}{\underline{I}_{ph1.1}};$$

$$\underline{z}_{m123} = \underline{z}_m \cdot \frac{\underline{I}_{ph2.1}}{\underline{I}_{ph1.1}}; \quad \underline{z}_{m211} = \underline{z}_m \cdot \frac{\underline{I}_{ph1}}{\underline{I}_{ph2}}; \quad \underline{z}_{m231} = \underline{z}_m \cdot \frac{\underline{I}_{ph3}}{\underline{I}_{ph2}}; \quad \underline{z}_{m212} = \underline{z}_m \cdot \frac{\underline{I}_{ph1.1}}{\underline{I}_{ph2}}; \quad \underline{z}_{m213} = \underline{z}_m \cdot \frac{\underline{I}_{ph1.1}}{\underline{I}_{ph2.1}};$$

$$\underline{z}_{m233} = \underline{z}_m \cdot \frac{\underline{I}_{ph3}}{\underline{I}_{ph2.1}}; \quad \underline{z}_{m311} = \underline{z}_m \cdot \frac{\underline{I}_{ph1}}{\underline{I}_{ph3}}; \quad \underline{z}_{m321} = \underline{z}_m \cdot \frac{\underline{I}_{ph2}}{\underline{I}_{ph3}}; \quad \underline{z}_{m312} = \underline{z}_m \cdot \frac{\underline{I}_{ph1.1}}{\underline{I}_{ph3}}; \quad \underline{z}_{m323} = \underline{z}_m \cdot \frac{\underline{I}_{ph2.1}}{\underline{I}_{ph3}} -$$

удельное сопротивление взаимной индукции соответствующих фаз; \underline{z}_l – удельное сопротивление линии; \underline{z}_m – удельное сопротивление взаимной индукции; \underline{I}_{ph1} – ток поврежденной фазы, на которой находится ближняя точка повреждения; \underline{I}_{ph2} – ток поврежденной фазы, на которой находится дальняя точка повреждения; \underline{I}_{ph3} – ток неповрежденной фазы; \underline{U}_{ph1} – напряжение поврежденной фазы, на которой находится ближняя точка повреждения; \underline{U}_{ph2} – напряжение поврежденной фазы, на которой находится дальняя точка повреждения; \underline{U}_{ph3} – напряжение неповрежденной фазы; для удобства расчета введем следующие обозначения (рисунок 2.17) $\underline{z}_1 = \underline{z}_l + \underline{z}_{m121} + \underline{z}_{m131}$; $\underline{z}_2 = \underline{z}_l + \underline{z}_{m122} + \underline{z}_{m132}$; $\underline{z}_3 = \underline{z}_l + \underline{z}_{m123} + \underline{z}_{m132}$; $\underline{z}_4 = \underline{z}_l + \underline{z}_{m211} + \underline{z}_{m231}$; $\underline{z}_5 = \underline{z}_l + \underline{z}_{m231} + \underline{z}_{m212}$; $\underline{z}_6 = \underline{z}_l + \underline{z}_{m213} + \underline{z}_{m233}$; $\underline{z}_7 = \underline{z}_l + \underline{z}_{m311} + \underline{z}_{m321}$; $\underline{z}_8 = \underline{z}_l + \underline{z}_{m312} + \underline{z}_{m321}$; $\underline{z}_9 = \underline{z}_l + \underline{z}_{m312} + \underline{z}_{m323}$.

Примем напряжение земли $\underline{U}_{gr} = 0$, тогда зная значение переходного сопротивления в месте возникновения дуги, можно получить величину тока, протекающего через переходное сопротивление (рисунок 2.17):

$$\underline{I}_{gr1} = \frac{\underline{U}_{ph1} - \underline{I}_{ph1} \cdot l_1 \cdot \underline{z}_1}{R_{tr1}}, \quad 2.24$$

$$\underline{I}_{gr2} = \frac{\underline{U}_{ph2} - \underline{I}_{ph2} \cdot \underline{z}_4 \cdot l_1 - \underline{I}_{ph2} \cdot \underline{z}_5 \cdot (l_2 - l_1)}{R_{tr2}}. \quad 2.25$$

По первому закону Кирхгофа определяется ток подпитки точки короткого замыкания нагрузкой:

$$\underline{I}_{ph1.1} = \underline{I}_{ph1} - \underline{I}_{gr1}. \quad 2.26$$

$$\underline{I}_{ph2.1} = \underline{I}_{ph2} - \underline{I}_{gr2}. \quad 2.27$$

С учетом вышеизложенного, производится пересчет напряжения в нейтральной точке N :

$$\underline{U}_N = \underline{U}_{ph3} - \underline{I}_{ph3} \cdot \underline{z}_7 \cdot l_1 - \underline{I}_{ph3} \cdot \underline{z}_8 \cdot (l_2 - l_1) - \underline{I}_{ph3} \cdot \underline{z}_9 \cdot (1 - l_2) - \underline{I}_{ph3} \cdot \underline{z}_{load}. \quad 2.28$$

Приняв во внимание тот факт, что сопротивление эквивалентного участка, полученное по закону Ома равно сумме сопротивлений эквивалентной цепи, тогда для ближней точки повреждения запишем следующее выражение:

$$\frac{\frac{U_{gr}}{R_{tr}} + \frac{U_N}{(1-l_2) \cdot (\underline{z}_3) + (l_2-l_1) \cdot (\underline{z}_2) + \underline{z}_{load}}}{\frac{1}{R_{tr1}} + \frac{1}{(1-l_2) \cdot (\underline{z}_3) + (l_2-l_1) \cdot (\underline{z}_2) + \underline{z}_{load}}} = \frac{U_{ph1}}{I_{ph1}} = \underline{z}_1 \cdot l_1 + \frac{R_{tr1} \cdot (\underline{z}_2 \cdot (l_2-l_1) + \underline{z}_3 \cdot (1-l_2) + \underline{z}_{load})}{R_{tr1} + \underline{z}_2 \cdot (l_2-l_1) + \underline{z}_3 \cdot (1-l_2) + \underline{z}_{load}}. \quad 2.29$$

С учетом преобразований, полученное выражение будет выглядеть следующим образом:

$$\frac{U_{ph1} - \frac{\underline{U}_N \cdot R_{tr1}}{(1-l_2) \cdot (\underline{z}_3) + (l_2-l_1) \cdot (\underline{z}_2) + R_{tr1} + \underline{z}_{load}}}{I_{ph1}} = \underline{z}_1 \cdot l_1 + \frac{R_{tr1} \cdot (\underline{z}_2 \cdot (l_2-l_1) + \underline{z}_3 \cdot (1-l_2) + \underline{z}_{load})}{R_{tr1} + \underline{z}_2 \cdot (l_2-l_1) + \underline{z}_3 \cdot (1-l_2) + \underline{z}_{load}}. \quad 2.30$$

Решение выражения (2.30) относительно величины l_1 сводится к получению квадратного уравнения, корни которого определяют расстояние до точки короткого замыкания. Получаем следующие выражения для определения расстояния до первой точки повреждения:

$$l_1 = \left| \frac{\frac{U_{ph1}}{I_{ph1}} \cdot \underline{z}_2 + \sqrt{a_1 + b_1 + c_1 + d_1 + e_1 + f_1}}{2 \cdot \underline{z}_1 \cdot \underline{z}_2} \right|; \quad 2.31$$

$$l_1 = \left| \frac{\frac{U_{ph1}}{I_{ph1}} \cdot \underline{z}_2 - \sqrt{a_1 + b_1 + c_1 + d_1 + e_1 + f_1}}{2 \cdot \underline{z}_1 \cdot \underline{z}_2} \right|.$$

Коэффициенты $a_1, b_1, c_1, d_1, e_1, f_1$ составлены из следующих выражений:

$$\begin{aligned} a_1 &= (I_{ph1})^2 \cdot (\underline{z}_1)^2 \cdot (l_2^2 \cdot (\underline{z}_2^2 - 2 \cdot \underline{z}_2 \cdot \underline{z}_3 + \underline{z}_3) + 2 \cdot l_2 \cdot (\underline{z}_2 \cdot \underline{z}_3 - \underline{z}_3^2) + \underline{z}_3^2); \\ b_1 &= 2 \cdot I_{ph1}^2 \cdot R_{tr1} \cdot \left(l_2 \cdot \underline{z}_1 \cdot (\underline{z}_1 \cdot \underline{z}_1 - \underline{z}_1 \cdot \underline{z}_3 + \underline{z}_2^2 - \underline{z}_2 \cdot \underline{z}_3) + \underline{z}_1 \cdot \underline{z}_3 \cdot (\underline{z}_1 + \underline{z}_2) \right); \\ c_1 &= I_{ph1}^2 \cdot \underline{z}_{load} \cdot \left(2 \cdot \underline{z}_1^2 (l_2 \cdot \underline{z}_2 - l_2 \cdot \underline{z}_3 + R_{tr1} + \underline{z}_3) + 2 \cdot R_{tr1} \cdot \underline{z}_1 \cdot \underline{z}_2 + \underline{z}_{load} \cdot \underline{z}_1^2 \right); \\ d_1 &= I_{ph1}^2 \cdot R_{tr1}^2 \cdot (\underline{z}_1^2 - 2 \cdot \underline{z}_1 \cdot \underline{z}_2 + \underline{z}_2^2) + 4 \cdot \underline{U}_{ph1}^2 \cdot I_{ph1} \cdot R_{tr1} \cdot \underline{z}_1 \underline{z}_2 + \underline{U}_1^2 \underline{z}_2^2; \\ e_1 &= 2 \cdot I_{ph1} \cdot \underline{U}_{ph1} \cdot \underline{z}_1 \cdot \underline{z}_2 \cdot (l_2 \cdot \underline{z}_3 - l_2 \cdot \underline{z}_2 - R_{tr1} - \underline{z}_{load} - \underline{z}_3) - 2 \cdot I_{ph1} \cdot \underline{U}_1^2 R_{tr1} \underline{z}_2^2; \\ f_1 &= I_{ph1} \cdot (R_{tr1} \cdot (\underline{z}_1 - \underline{z}_2) + \underline{z}_1 \cdot (l_2 \cdot \underline{z}_2 + \underline{z}_3 \cdot (1-l_2) + \underline{z}_{load})). \end{aligned} \quad 2.32$$

Полученные выражения (2.31) позволяют получить уточненное расстояние до точки повреждения. Для выбора единственного верного решения необходимо сравнить полученные значения l_1 с единицей (величины получены в относительных единицах от реальной длины линии).

На следующей итерации с учетом нового значения расстояния до повреждения, по формуле (2.13) производится уточнение значения переходного сопротивления. Далее по выражениям (2.26) и (2.27) определяются ток подпитки точки повреждения и напряжение в точки NI . Далее с учетом уточнённых значений по выражению (2.31) определяется расстояние до точки повреждения. Итерационный процесс продолжается пока изменения значений, полученные в двух последовательных итерациях, не станут незначительными (не более требуемой ошибки расчета расстояния до повреждения).

2.4.2.2 Применение итерационного пересчета для двойных замыканий на землю на разных линиях

Ниже представлен алгоритм уточнения расстояния до точки короткого замыкания, расположенной на первой линии.

По полученном в первом приближении расстоянии до первой точки повреждения в соответствии с формулой (2.9) необходимо по параметрам неповрежденной фазы, по формуле (2.15), определить значение напряжения в нейтральной точке $N1$ (рисунок 2.3) и далее по выражению (2.18) определить значение переходного сопротивления в месте короткого замыкания.

Зная значение переходного сопротивления в месте возникновения дуги, можно получить величину тока, протекающего через переходное сопротивление (рисунок 2.11):

$$\underline{I}_{g1} = \frac{\underline{U}_{ph1} - \underline{I}_{ph11} \cdot l_1 \cdot (\underline{z}_{l1} + \underline{z}_{m12} + \underline{z}_{m13})}{R_{tr1}}. \quad 2.33$$

Тогда по первому закону Кирхгофа можно определить ток подпитки точки короткого замыкания нагрузкой:

$$\underline{I}_{ph11.1} = \underline{I}_{ph11} - \underline{I}_{gr1}. \quad 2.34$$

Тогда напряжения в нейтральной точке $N1$ составит:

$$\underline{U}_{N1} = (\underline{U}_{ph3} - \underline{I}_{ph13} \cdot (\underline{z}_{l1} + \underline{z}_{load1})) - (\underline{I}_{ph11} \cdot l_1 + \underline{I}_{ph11.1} \cdot (1-l_1) + \underline{I}_{ph12}) \cdot \underline{z}_{m1}. \quad 2.35$$

Решение выражения (2.20) относительно величины l_1 сводится к получению квадратного уравнения, корни которого определяют расстояние до точки короткого замыкания. Получаем следующие выражения для определения расстояния до первой точки повреждения:

$$l_1 = \left| \frac{\underline{I}_{ph11} \cdot (\underline{z}_1 + \underline{z}_{load1}) + \sqrt{a_1 + b_1 + c_1} + \underline{U}_{ph1}}{2 \cdot \underline{I}_{ph11} \cdot \underline{z}_1} \right|, \quad 2.36$$

$$l_1 = \left| \frac{\underline{I}_{ph11} \cdot (\underline{z}_1 + \underline{z}_{load1}) - \sqrt{a_1 + b_1 + c_1} + \underline{U}_{ph1}}{2 \cdot \underline{I}_{ph11} \cdot \underline{z}_1} \right|.$$

Коэффициенты a_1 , b_1 , c_1 составлены из следующих выражений:

$$a_1 = (\underline{I}_{ph11} \cdot \underline{z}_{load1}) \cdot (\underline{I}_{ph11} \cdot \underline{z}_{load1} + 2 \cdot \underline{I}_{ph11} \cdot \underline{z}_1 + 4 \cdot R_{tr1} \cdot \underline{I}_{ph11} - 2 \cdot \underline{U}_{ph1});$$

$$b_1 = (\underline{I}_{ph11} \cdot \underline{z}_1) \cdot (\underline{I}_{ph11} \cdot \underline{z}_1 + 4 \cdot R_{tr1} \cdot \underline{I}_{ph11} - 2 \cdot \underline{U}_{ph1}); \quad 2.37$$

$$c_1 = 4 \cdot R_{tr1} \cdot \underline{I}_{ph11} \cdot (\underline{U}_{N1} - \underline{U}_{ph1}) + \underline{U}_{ph1}^2.$$

Полученные выражения (2.36) позволяют получить уточненное расстояние до точки повреждения. Для выбора единственного верного решения необходимо сравнить полученные значения l_1 с единицей (величины получены в относительных единицах от реальной длины линии).

На следующей итерации с учетом нового значения расстояния до повреждения по формуле (2.18) производится уточнение значения переходного сопротивления. Далее по выражениям (2.34) и (2.35) определяются ток подпитки точки повреждения и напряжение в точке NI . Далее с учетом уточнённых значений по выражению (2.36) определяется расстояние до точки повреждения. Итерационный процесс продолжается пока изменения значений, полученные в двух последовательных итерациях, не станут незначительными (не более требуемой ошибки расчета расстояния до повреждения).

Аналогично определяется расстояние до точки повреждения, расположенной на второй линии. По полученном в первом приближении расстоянии до точки повреждения, в соответствии с формулой (2.9), необходимо по параметрам неповрежденной фазы по формуле (2.19), определить значение напряжения в нейтральной точке NI (рисунок 2.3) и далее по выражению (2.22) определить значение переходного сопротивления в месте короткого замыкания.

Зная значение переходного сопротивления в месте возникновения дуги, можно получить величину тока, протекающего через переходное сопротивление (рисунок 2.12):

$$\underline{I}_{g2} = \frac{\underline{U}_{ph2} - \underline{I}_{ph22} \cdot l_2 \cdot (\underline{z}_{l2} + \underline{z}_{m21} + \underline{z}_{m23})}{R_{tr2}}. \quad 2.38$$

Тогда по первому закону Кирхгофа можно определить ток подпитки точки короткого замыкания нагрузкой:

$$\underline{I}_{ph22.1} = \underline{I}_{ph22} - \underline{I}_{gr2}. \quad 2.39$$

С учетом изложенного выше, пересчет напряжения в нейтральной точке $N2$ составит:

$$\underline{U}_{N2} = (\underline{U}_{ph3} - \underline{I}_{ph23} \cdot (\underline{z}_{l2} + \underline{z}_{load2})) - (\underline{I}_{ph22} \cdot l_2 + \underline{I}_{ph22.1} \cdot (1 - l_2) + \underline{I}_{ph22}) \cdot \underline{z}_{m2}. \quad 2.40$$

Решение выражения (2.20) относительно величины l_2 сводится к получению квадратного уравнения, корни которого определяют расстояние до точки короткого замыкания. Получаем следующие выражения для определения расстояния до второй точки повреждения:

$$l_2 = \left| \frac{\underline{I}_{ph22} \cdot (\underline{z}_2 + \underline{z}_{load2}) + \sqrt{a_2 + b_2 + c_2} + \underline{U}_{ph2}}{2 \cdot \underline{I}_{ph22} \cdot \underline{z}_2} \right|, \quad 2.41$$

$$l_2 = \left| \frac{\underline{I}_{ph22} \cdot (\underline{z}_2 + \underline{z}_{load2}) - \sqrt{a_2 + b_2 + c_2} + \underline{U}_{ph2}}{2 \cdot \underline{I}_{ph22} \cdot \underline{z}_2} \right|.$$

Коэффициенты a_1, b_1, c_1 составлены из следующих выражений:

$$\begin{aligned} a_2 &= (\underline{I}_{ph22} \cdot \underline{z}_{load2}) \cdot (\underline{I}_{ph22} \cdot \underline{z}_{load2} + 2 \cdot \underline{I}_{ph22} \cdot \underline{z}_2 + 4 \cdot R_{tr2} \cdot \underline{I}_{ph22} - 2 \cdot \underline{U}_{ph2}); \\ b_2 &= (\underline{I}_{ph22} \cdot \underline{z}_2) \cdot (\underline{I}_{ph22} \cdot \underline{z}_2 + 4 \cdot R_{tr2} \cdot \underline{I}_{ph22} - 2 \cdot \underline{U}_{ph2}); \\ c_2 &= 4 \cdot R_{tr2} \cdot \underline{I}_{ph22} \cdot (\underline{U}_{N2} - \underline{U}_{ph2}) + \underline{U}_{ph2}^2. \end{aligned} \quad 2.42$$

На рисунках 2.18, 2.20 представлена зависимость расчетных расстояний до ближней (а) и дальней (б) точек повреждения от фактических значений, с учетом введения итерационных процедур.

Проверка работоспособности итерационного пересчета при ДвЗЗ на одной линии проводилась с использованием схемы, представленной на рисунке 2.5 в точках $k3$ и $k4$.

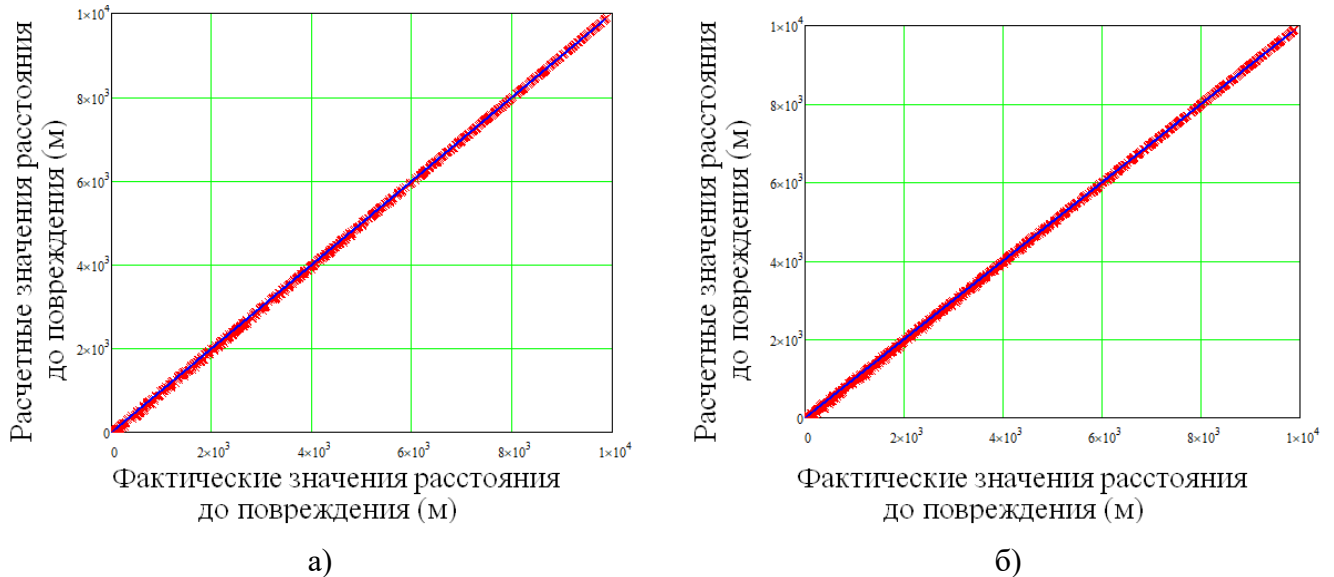


Рисунок 2.18– Зависимость расчетных расстояний от фактических после итерационного уточнения для ДвЗЗ одной линии

Зона обхода поврежденной линии, в случае применения итерационного уточнения, показана на рисунке 2.19.

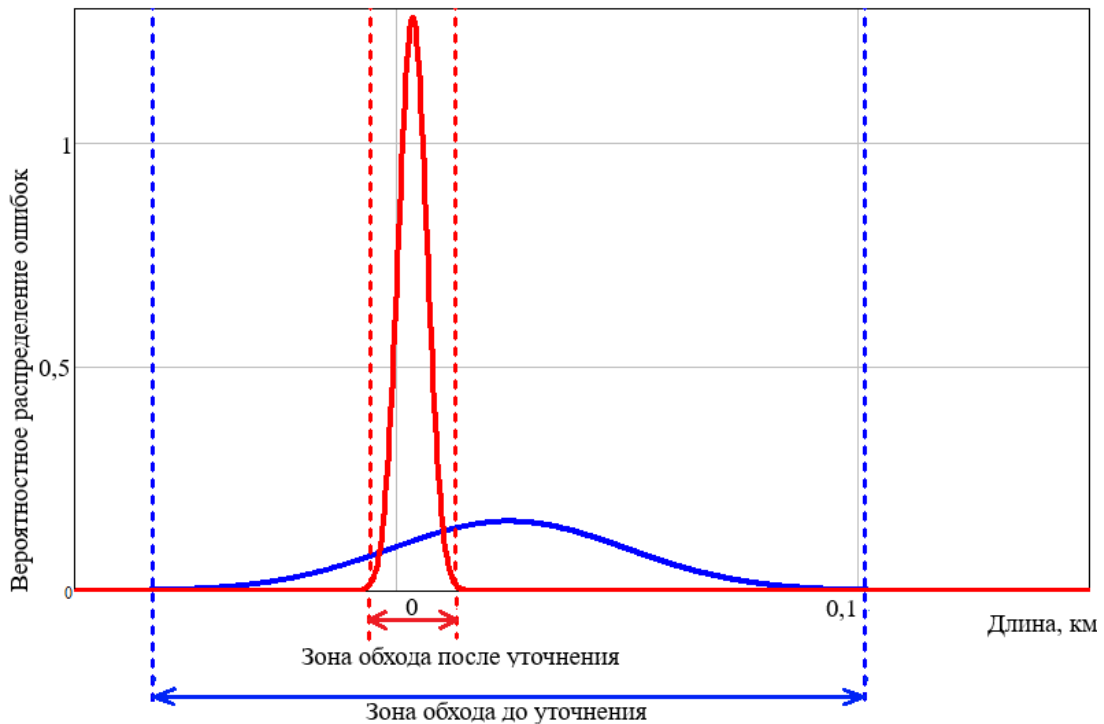


Рисунок 2.19 – График плотности распределения относительной погрешности при ДвЗЗ на одной линии

Для ближней и дальней точки повреждений, полученной до итерационного расчета, зона обхода составляла 36% и 20% от общей протяженности линии, а после итерационного пересчета сократилась до 2%. Результаты расчетов сведены в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Результаты расчетов зон обхода при ДвЗЗ на одной линии

		Левая граница зоны обхода, о.е.	Правая граница зоны обхода, о.е.	Протяженность зоны обхода, о.е.	Протяженность зоны обхода, %.
Ближняя точка повреждения	До итерационного пересчета	-0,2526	-0,1064	0,359	36
	После итерационного пересчета	-0,06	0,13	0,2	2
Дальняя точка повреждения	До итерационного пересчета	-0,0573	0,1358	0,1958	20
	После итерационного пересчета	-0,0067	0,0128	0,0195	2

Проверка работоспособности итерационного уточнения при ДвЗЗ на разных линиях проводилась с использованием схемы, представленной на рисунке 2.5 в точках *k1* и *ik2*.

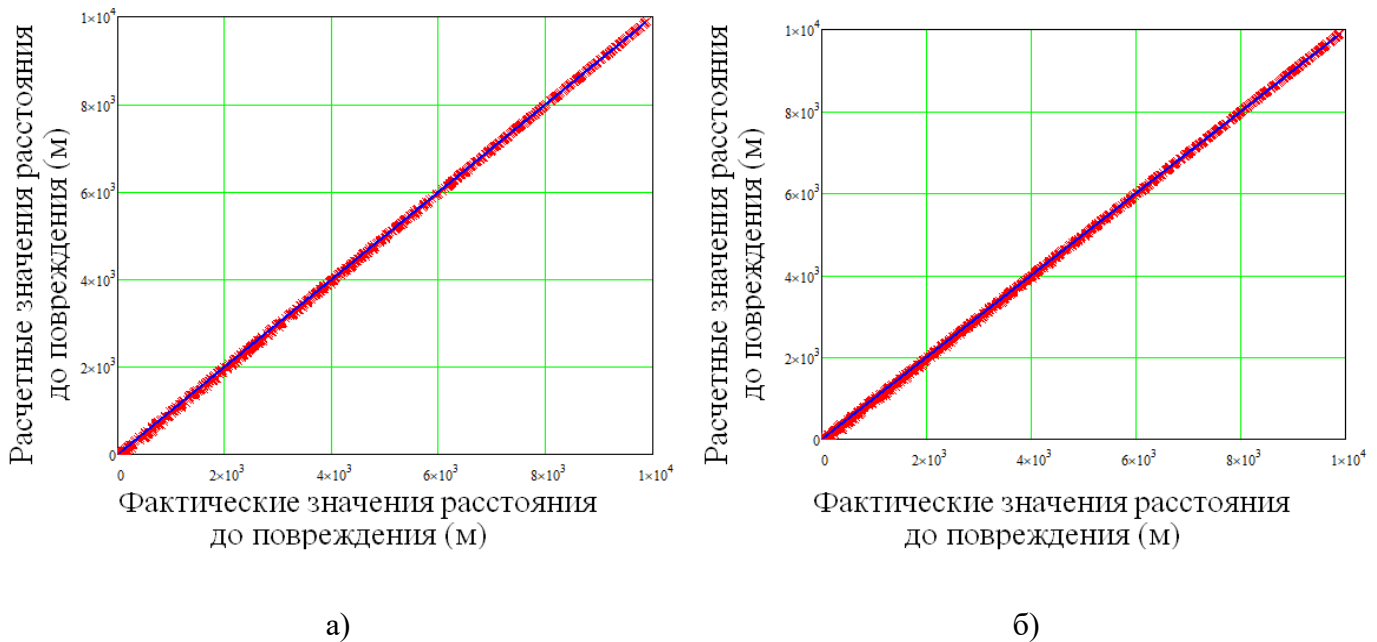


Рисунок 2.20 – Зависимость расчетных расстояний от фактических после итерационного уточнения для ДвЗЗ на разных линиях

Для ближней и дальней точки повреждений, полученной до итерационного расчета, зона обхода составляла 26% от общей протяженности линии, а после итерационного пересчета сократилась до 2%. Результаты расчетов сведены в таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Результаты расчетов зон обхода при ДвЗЗ на разных линиях

		Левая граница зоны обхода, о.е.	Правая граница зоны обхода, о.е.	Протяженность зоны обхода, о.е.	Протяженность зоны обхода, %.
Ближняя точка повреждения	До итерационного пересчета	-0,0088	0,1688	0,257	26
	После итерационного пересчета	-0,06	0,013	0,02	2
Дальняя точка повреждения	До итерационного пересчета	-0,0088	0,1688	0,257	26
	После итерационного пересчета	-0,0067	0,0128	0,0195	2

Анализ результатов подтверждает увеличение точности определения расстояния и снижение ошибки расчета в сравнении с первоначальными результатами. Максимальное значение относительной погрешности не превышает 3%, что в сравнении с первоначальными методами, позволяет довольно точно определять место возникновения точки повреждения.

Использование итерационного расчета для уточнения расстояний, позволило сократить зону обхода с 36% и 20% до 2%, для ближней и дальней точки повреждения при ДвЗЗ на одной линии, и с 26% до 2% для разных линий, что позволяет довольно точно определять место возникновения повреждения и почти полностью исключить необходимость проведения полного обхода линии. Результаты расчетов представлены в таблице 2.6.

Таблица 2.6 – Сводная таблица результатов расчета разработанных алгоритмов ОМП по ПАР при двойных замыканиях на землю.

Вид алгоритма	Погрешность расчета /зона обхода линии	Преимущества	Недостатки
ОМП при ДвЗЗ на одной линии с использованием МСС	Ближняя точка повреждения: 27% /36%	– простота реализации; – возможность производства ручного расчета ОМП;	– отсутствие возможности учета несимметрии сети; – низкая точность алгоритма ОМП;
	Дальняя точка повреждения: 17% / 20%		
ОМП при ДвЗЗ на разных линиях с использованием МСС	Ближняя и дальняя точки повреждения: 16% / 26%		– невозможность применения на линиях с ответвлениями
ОМП при ДвЗЗ на одной линии с использованием фазных координат	Ближняя точка повреждения: 27% / 36%	– простота реализации; – возможность учета несимметрии сети;	– сложность в ручной реализации;
	Дальняя точка повреждения: 16% / 20%		
ОМП при ДвЗЗ на разных линиях с использованием фазных координат	Ближняя и дальняя точка повреждения: 12% / 26%	– возможность применения различных методов уточнения.	– низкая точность алгоритма ОМП; – невозможность применения на линиях с ответвлениями
Алгоритмы уточнения ДвЗЗ на одной линии, основанные на формировании корректирующей таблицы	Ближняя точка повреждения: 15% / 15%	– приемлемая точность;	– необходимость предварительного моделирования каждой линии; – невозможность применения на линиях с ответвлениями
	Для дальней точки повреждения: 12% / 14%		
Алгоритмы уточнения ДвЗЗ на разных линиях, основанные на формировании корректирующей таблицы	Ближняя и дальняя точка повреждения: 10% / 10%		
Алгоритмы уточнения ДвЗЗ на разных линиях, основанные на применении последовательных итерационных процедур	Для ближней точки повреждения: 2,2% / 2%	– высокая точность расчета;	– невозможность ручной реализации; – необходимо наличие больших вычислительных мощностей
Алгоритмы уточнения ДвЗЗ на одной линии, основанные на применении последовательных итерационных процедур	Для дальней точки повреждения: 2,3% / 2%		
Алгоритм ОМП при ОЗЗ с кратковременным введением ДвЗЗ и учетом балластного сопротивления	4% / 2%	– высокая точность расчета;	– наличие сведений о сопротивлении нагрузки; – не применимы на линиях с ответвлениями

Не применимы на линиях с ответвлениями

2.5 Выводы по главе

1. Предложены способы определения расстояний до мест возникновения ДвЗЗ для случаев, когда повреждения находятся на одной и на разных линиях. Разработанные методы основаны на решении схемы замещения в фазных координатах, т.е. в величинах, соответствующих физическим параметрам электроэнергетической системы.

2. Разработанные алгоритмы позволяют определить область возникновения ДвЗЗ на одной и разных линиях электропередачи в сетях с разного рода несимметрией. Принятые в работе допущения, связанные с неучетом переходного сопротивления в месте короткого замыкания и сопротивления нагрузки, также как и известные методы приводят к возникновению алгоритмической ошибки, так, что максимальная погрешность расчета при ДвЗЗ на одной линии может достигать 27%, а при ДвЗЗ на разных линиях 16%.

3. При анализе результатов имитационного моделирования, наблюдалась положительная корреляция между рассчитанными расстояниями и заданными, что в совокупности с незначительными значениями стандартного отклонения позволили провести процедуру компенсации ошибок. Рассмотренные подходы к решению задачи повышения точности ОМП при ДвЗЗ позволили существенно снизить погрешность расчета. В диссертации рассмотрены два подхода к решению задачи повышения точности ОМП при ДвЗЗ. Первый из них подразумевает: множественное имитационное моделирование, получение обучающей выборки, определение критерия для распознавания зависимости погрешности расчета от различных величин и дальнейшее корректирование предлагаемых алгоритмов в соответствии с обучающей выборкой. Идея второго подхода заключается в итерационном уточнении интересующих параметров с учетом предыдущих значений до достижения требуемой точности.

4. Обучение разработанных алгоритмов с учетом переходного сопротивления позволило существенно повысить точность производимых расчетов и снизить максимальную погрешность с 27% до 15% для ДвЗЗ на одной линии и с 15% до 10% при ДвЗЗ на разных линиях, сократив зону обхода поврежденной линии до 15 % при ДвЗЗ на одной линии и до 10 % при ДвЗЗ на разных линиях (таблица 2.6). Расчетная погрешность удалось устранить за счет введения корректирующего коэффициента, сформированного по обучающей выборке, на основании полученной зависимости.

5. Предлагаемые способы уточнения расстояний, основанные на введении итерационных процедур, позволили точно определить место возникновения короткого замыкания и существенно сократить зону обхода поврежденной линии. Не зависимо от значений переходного сопротивления и несимметрии сети погрешность расчетов при использовании данного метода не превысила 3% (таблица 2.6).

ГЛАВА 3 ПРИМЕНЕНИЕ КРАТКОВРЕМЕННОГО ДВОЙНОГО ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ АЛГОРИТМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА ПОВРЕЖДЕНИЯ ЛЭП 6–35 КВ ПРИ ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЯХ НА ЗЕМЛЮ

Однофазные замыкания на землю (ОЗЗ) являются преобладающим видом повреждений в распределительных электрических сетях среднего напряжения [1, 132–134]. В силу специфики электромагнитных переходных процессов при однофазных замыканиях на землю, обусловленных, прежде всего режимом заземления нейтрали, задача ОМП не имеет однозначного решения. Длительный режим работы сети при ОЗЗ ведет к повышенной аварийности и вероятности перехода ОЗЗ в многофазные или многоместные короткие замыкания, которые, в свою очередь, влекут за собой значительный экономический ущерб.

Быстрое и точное определение места повреждения является главным условием ликвидации аварийной ситуации и восстановления нормального режима работы электрической сети. Ранее предлагаемые способы искусственного введения двухфазных замыканий на землю для определения места ОЗЗ, представленные в первой главе, перспективны в применении, но, к сожалению, не нашли пока практической реализации в эксплуатирующих организациях, в том числе из-за низкой точности.

3.1 Определения места повреждения при однофазном замыкании на землю на воздушной линии электропередачи

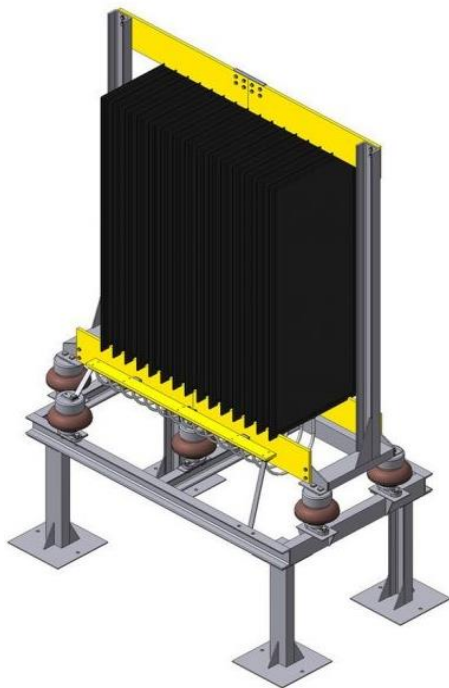
Для решения задачи определения места ОЗЗ предлагается кратковременное подключение балластного сопротивления к резервной ячейке секции шин распределительного устройства 6–35 кВ. В резервной ячейке устанавливается выключатель с пофазным приводом, выводы неподвижной токоведущей части которого замыкаются накоротко между собой и соединяются с землей через балластное сопротивление [135 – 138]. При возникновении ОЗЗ, производится коммутация одной из неповрежденных фаз выключателя, обеспечивая протекание через балластное сопротивление ограниченного по величине и времени тока короткого замыкания, тем самым имитируя двойное замыкание на землю (раздел 2.1). После регистрации протекающего через балластное сопротивление тока выключатель отключается, и режим работы сети при ОЗЗ восстанавливается [139 – 143].

Реализация предлагаемого алгоритма представлена на рисунке 3.2. Возникновение ОЗЗ на поврежденном присоединении фиксируется устройством релейной защиты, в котором реализованы известные алгоритмы [145 – 152], выявляющие факт возникновения ОЗЗ и определяющие поврежденный фидер и поврежденную фазу. Автоматически по факту фиксации ОЗЗ устройством релейной защиты выдается сигнал на включение выключателя резервной ячейки распределительного устройства для обеспечения протекания через балластное сопротивление ограниченного по времени и величине тока короткого замыкания.

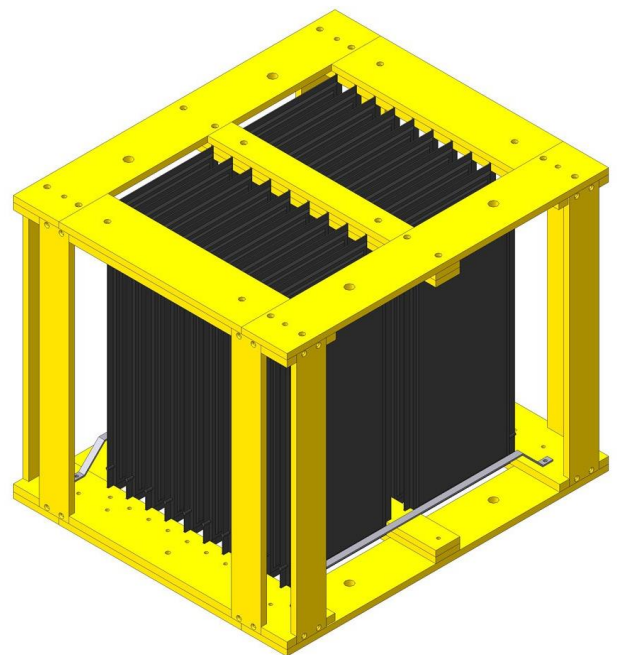
В качестве балластного сопротивления предлагается использовать токоограничивающие резисторы, применяемые для заземления нейтрали. В настоящее время в сетях среднего напряжения чаще всего применяется два варианта заземления нейтрали: низкоомное и высокоомное.

Высокоомное заземление нейтрали применяется в случаях, когда поврежденная замыканием на землю сеть должна функционировать в течении длительного времени, до обнаружения места повреждения. Применение высокоомного заземления позволяет исключить возможность появления дуговых перенапряжений, а протекающий через нейтраль ток становится достаточным для определения поврежденного присоединения. Длительная работа в данном режиме накладывает определенные ограничения на исполнение и размещение резистора. Резисторы такого плана устанавливаются, как правило, на отдельной площадке в ОРУ или помещениях ЗРУ (рисунок 3.1 б).

Низкоомное заземление применяется в случаях, когда необходимо отключить ОЗЗ в течении минимально возможного времени. При этом ток, протекающий через резистор должен быть достаточным для срабатывания алгоритмов релейной защиты. Для низкоомного заземления нейтрали, используются резисторы компактного исполнения, устанавливаемые в ячейках КРУ (рисунок 3.1 а).



б) Для установки в помещениях ЗРУ, на территории ОРУ



а) Для установки в ячейках КРУ

Рисунок 3.1 – Унифицированные конструкции блоков резистора заземления нейтрали производства ООО «ЛНП Болид»

В случае кратковременного замыкания на землю неповрежденной фазы, целесообразно применение резисторов, устанавливаемых в ячейках РУ. Величина допустимого протекающего через такой резистор, по рекомендации изготовителя, не должна превышать 40А, при продолжительности 15с. Однако, для корректной работы алгоритма ОМП, такая длительность протекания тока является избыточной, в этом случае целесообразно ограничиваться выбором времени протекания и величиной тока короткого замыкания в соответствии с параметрами термической стойкости провода ЛЭП, при этом, не превышая 100А при продолжительности не более 1 сек (рекомендация по выбору предельно допустимого тока линии [153]).

Во время протекания тока двойного замыкания производится регистрация токов и напряжений, необходимых для реализации разрабатываемого алгоритма ОМП и определения расстояния до места замыкания.



Рисунок 3.2 – Структурная схема алгоритма определения места повреждения при ОЗЗ

На рисунке 3.3 изображена схема замещения, характеризующая протекание тока при искусственном введении двойного замыкания на землю, и приняты следующие обозначения: $\underline{E}_{п.ф}$, $\underline{E}_{н.ф}$, $\underline{E}_{ф.б}$ – эквивалентные ЭДС системы; \underline{Z}_c – эквивалентное сопротивление системы; \underline{z}_l – удельное сопротивление линии (Ом/км); \underline{k}_m – коэффициент взаимной индукции; $\underline{Z}_н$ – эквивалентное сопротивление нагрузки; $\underline{R}_п$ – переходные сопротивления в местах замыканий; l – фактические расстояния до места замыканий на земл; $R_б$ – балластное сопротивление; L – длина линии (км).

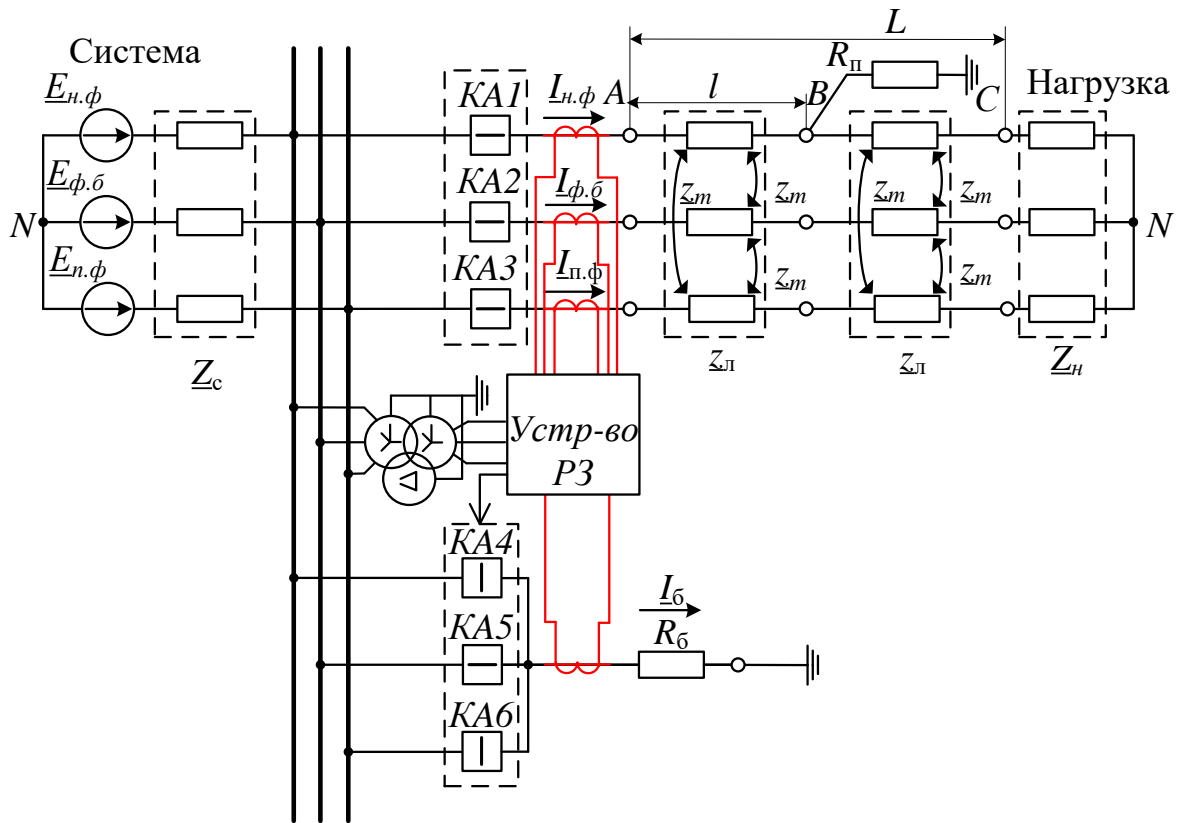


Рисунок 3.3 – Схема замещения сети в режиме однофазного замыкания на землю с искусственным введением двойного замыкания

Кратковременное подключение балластного сопротивления, позволяет осуществить имитацию двойных замыканий на землю на разных линиях, что в свою очередь дает возможность воспользоваться алгоритмами, представленными в разделе 2.2, в этом случае, расстояние до места возникновения однофазного замыкания на землю возможно определить в соответствии с выражением 3.1, характерным для ДвЗЗ на разных линиях, при этом погрешность расчета будет аналогичная и не будет превышать 15 процентов.

$$l_x = \frac{\operatorname{Im} \left(\frac{U_{п.φ}}{I_{п.φ}} \right)}{\operatorname{Im} \left(z_{л1} + z_m \cdot \frac{(I_{φ.φ} + I_{н.φ})}{I_{п.φ}} \right)} \quad 3.1$$

где $U_{п.φ}$, $I_{п.φ}$ – напряжение и ток поврежденной фазы, на которой произошло ОЗЗ; $U_{φ.φ}$, $I_{φ.φ}$ – напряжение и ток фазы, замкнутой на балластное сопротивление; $U_{н.φ}$, $I_{н.φ}$ – напряжение и ток неповрежденной фазы.

Однако в отличие от фактических двойных замыканий на землю, при их искусственном введении, сопротивление второй, кратковременно замкнутой на землю фазы, известно и этот параметр можно учесть в расчетной формуле для определения расстояния [137].

Для удобства определения неизвестных параметров преобразуем схему замещения, представленную на рисунке 3.3, к следующему виду (рисунок 3.4).

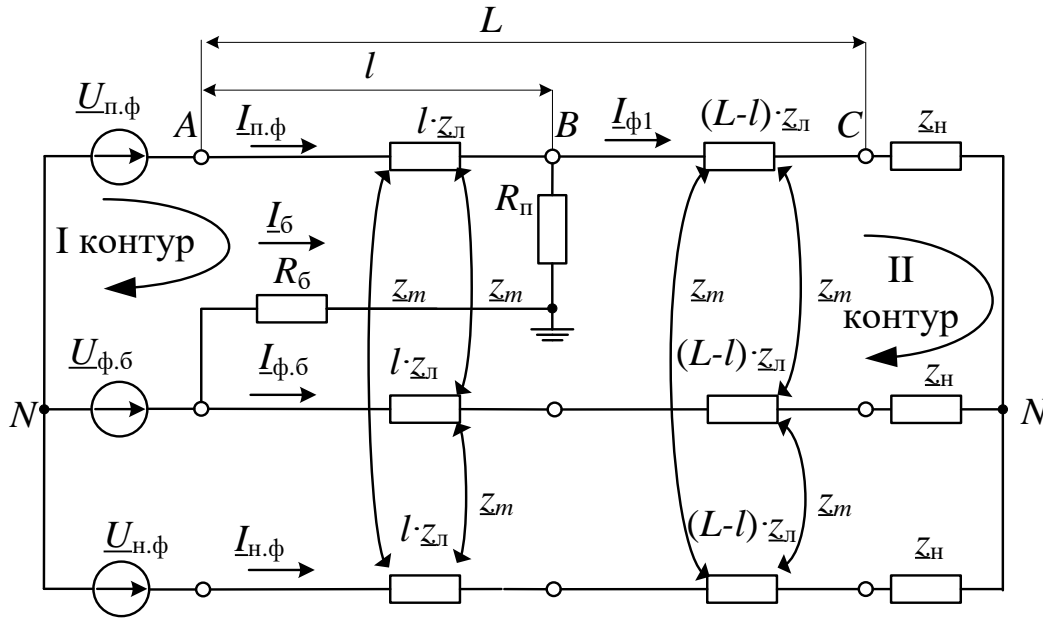


Рисунок 3.4 – Схема замещения сети в режиме двойного замыкания на землю

Запишем второй закон Кирхгофа для первого и второго контуров (рисунок 3.4), предварительно задав направление их обхода.

Уравнение для первого контура выглядит следующим образом

$$\underline{I}_{п.ф} \cdot \underline{z}_л \cdot l + \underline{I}_{ф.б} \cdot \underline{z}_м \cdot l + \underline{I}_{н.ф} \cdot \underline{z}_м \cdot l - \underline{I}_б \cdot R_б - \underline{I}_б \cdot R_п = \underline{U}_{п.ф} - \underline{U}_{ф.б}; \quad 3.2$$

Уравнение для второго контура соответствует выражению 3.3:

$$\begin{aligned} \underline{I}_{ф1} \cdot (L-l) \cdot \underline{z}_л + \underline{I}_{ф1} \cdot \underline{z}_н + \underline{I}_{ф.б} \cdot (L-l) \cdot \underline{z}_м + \underline{I}_{н.ф} \cdot (L-l) \cdot \underline{z}_м - \underline{I}_{ф.б} \cdot \underline{z}_н - \\ - \underline{I}_{ф.б} \cdot \underline{z}_л \cdot L - \underline{I}_{н.ф} \cdot \underline{z}_м \cdot L - \underline{I}_{п.ф} \cdot \underline{z}_м \cdot l - \underline{I}_{ф1} \cdot \underline{z}_м (L-l) + \underline{I}_б \cdot (R_б + R_п) = 0 \end{aligned} \quad 3.3$$

После вынесения за скобки общих множителей получаем следующие аналитические соотношения:

– для первого контура:

$$\underline{I}_{п.ф} \cdot \underline{z}_л \cdot l + (\underline{I}_{ф.б} + \underline{I}_{н.ф}) \cdot \underline{z}_м \cdot l - \underline{I}_б \cdot (R_б + R_п) = \underline{U}_{п.ф} - \underline{U}_{ф.б}; \quad 3.4$$

– для второго контура:

$$\begin{aligned} \underline{I}_{ф1} \cdot (L-l) \cdot \underline{z}_л + \underline{I}_{ф1} \cdot \underline{z}_н + (\underline{I}_{ф.б} + \underline{I}_{н.ф}) \cdot (L-l) \cdot \underline{z}_м - \underline{I}_{ф.б} \cdot (\underline{z}_н + \underline{z}_л \cdot L) - \\ - \underline{I}_{н.ф} \cdot \underline{z}_м \cdot L - \underline{I}_{п.ф} \cdot \underline{z}_м \cdot l - \underline{I}_{ф1} \cdot \underline{z}_м (L-l) + \underline{I}_б \cdot (R_б + R_п) = 0 \end{aligned} \quad 3.5$$

Выразим из выражения 3.4 сумму активных сопротивлений ($R_б + R_п$):

$$R_б + R_п = \frac{\underline{I}_{п.ф} \cdot \underline{z}_л \cdot l + (\underline{I}_{ф.б} + \underline{I}_{н.ф}) \cdot \underline{z}_м \cdot l - \underline{U}_{п.ф} + \underline{U}_{ф.б}}{\underline{I}_б}; \quad 3.6$$

Подставим полученное выражение 3.6 в равенство 3.5, получаем:

$$\begin{aligned}
& \underline{I}_{\phi 1} \cdot (L-l) \cdot \underline{z}_l + \underline{I}_{\phi 1} \cdot \underline{z}_n + (\underline{I}_{\phi 6} + \underline{I}_{n\phi}) \cdot (L-l) \cdot \underline{z}_m + (\underline{I}_{\phi 6} + \underline{I}_{n\phi}) \cdot (L-l) \cdot \underline{z}_m - \\
& - \underline{I}_{\phi 6} \cdot \underline{z}_l \cdot L - \underline{I}_{n\phi} \cdot \underline{z}_m \cdot L - \underline{I}_{n\phi} \cdot \underline{z}_m \cdot l - \underline{I}_{\phi 1} \cdot \underline{z}_m (L-l) + \underline{I}_{n\phi} \cdot \underline{z}_l \cdot l + \\
& + (\underline{I}_{\phi 6} + \underline{I}_{n\phi}) \cdot \underline{z}_m \cdot l - \underline{U}_{n\phi} + \underline{U}_{\phi 6} = 0;
\end{aligned} \tag{3.7}$$

Подставив в соотношение 3.5, вместо $\underline{I}_{\phi 1}$ эквивалентное выражение, полученное по первому закону Кирхгофа, и сократив общие члены, получаем следующее уравнение:

$$\begin{aligned}
& \underline{I}_6 \cdot \underline{I}_{\phi 6} \cdot \underline{z}_l \cdot l + \underline{I}_6 \cdot \underline{I}_{n\phi} \cdot \underline{z}_l \cdot l + \underline{I}_6 \cdot \underline{I}_{\phi 6} \cdot \underline{z}_m \cdot l - \underline{I}_6 \cdot \underline{I}_{n\phi} \cdot \underline{z}_m \cdot l + \\
& + \underline{U}_{\phi 6} \cdot \underline{I}_{n\phi} + \underline{U}_{\phi 6} \cdot \underline{I}_6 - \underline{U}_{n\phi} \cdot \underline{I}_{n\phi} - \underline{U}_{n\phi} \cdot \underline{I}_6 + \underline{U}_{n\phi} \cdot \underline{I}_{\phi 6} - \\
& - \underline{I}_{\phi 6} \cdot \underline{U}_{n\phi} + \underline{I}_{n\phi} \cdot \underline{U}_{n\phi} - \underline{I}_{n\phi} \cdot \underline{U}_{\phi 6} = 0
\end{aligned} \tag{3.8}$$

После вынесения за скобки общих множителей получаем следующее выражение:

$$\begin{aligned}
& \underline{I}_{n\phi} \cdot (\underline{z}_l - \underline{z}_m - \underline{z}_n) - \underline{I}_{n\phi} \cdot (\underline{z}_l \cdot L - \underline{z}_m \cdot L + \underline{z}_n) + \underline{I}_6 \cdot (\underline{z}_l \cdot L - \underline{z}_m \cdot L + \underline{z}_n) - \\
& \underline{I}_6 \cdot (\underline{z}_l - \underline{z}_m) \cdot l - \underline{U}_{n\phi} + \underline{U}_{\phi 6} = 0
\end{aligned} \tag{3.9}$$

Выразив l из выражения 3.9, получим формулу для расчета расстояния до места повреждения:

$$l = \frac{(\underline{I}_{n\phi} - \underline{I}_{n\phi} + \underline{I}_6) \cdot (\underline{z}_l \cdot L - \underline{z}_m \cdot L + \underline{z}_n) - \underline{U}_{n\phi} + \underline{U}_{\phi 6}}{\underline{I}_6 \cdot (\underline{z}_l - \underline{z}_m)} \tag{3.10}$$

Тогда в общем виде получаем итоговое соотношение для расчета расстояния до места повреждения:

$$l = \text{Im} \left(\frac{(\underline{I}_{n\phi} - \underline{I}_{n\phi} + \underline{I}_6) \cdot (\underline{z}_l \cdot L - \underline{z}_m \cdot L + \underline{z}_n) - \underline{U}_{n\phi} + \underline{U}_{\phi 6}}{\underline{I}_6 \cdot (\underline{z}_l - \underline{z}_m)} \right) \tag{3.11}$$

где \underline{I}_6 – ток, протекающий через балластное сопротивление.

Для использования равенства (3.15) необходимо знание информации о параметрах электрической сети, которые могут быть получены эксплуатирующими организациями из проектных или справочных данных ($\underline{z}_l, \underline{z}_m, L$) с учетом конструктивного исполнения линии электропередачи, а также путем анализа данных оперативно-измерительных комплексов, автоматизированных систем учета электрической энергии, SCADA-систем или запроса диспетчерских служб потребителей для получения информации о нагрузке линии электропередачи (\underline{z}_n).

В связи со сложностью получения информации о сопротивлении нагрузки от диспетчерских служб потребителей, а также отсутствия повсеместного использования в сетях среднего напряжения SCADA-систем, актуальным является учет сопротивления нагрузки в расчетном выражении. Для этого предлагается рассмотреть в схеме замещения, представленной на рисунке 3.4, неповрежденный контур (рисунок 3.5) [138]:

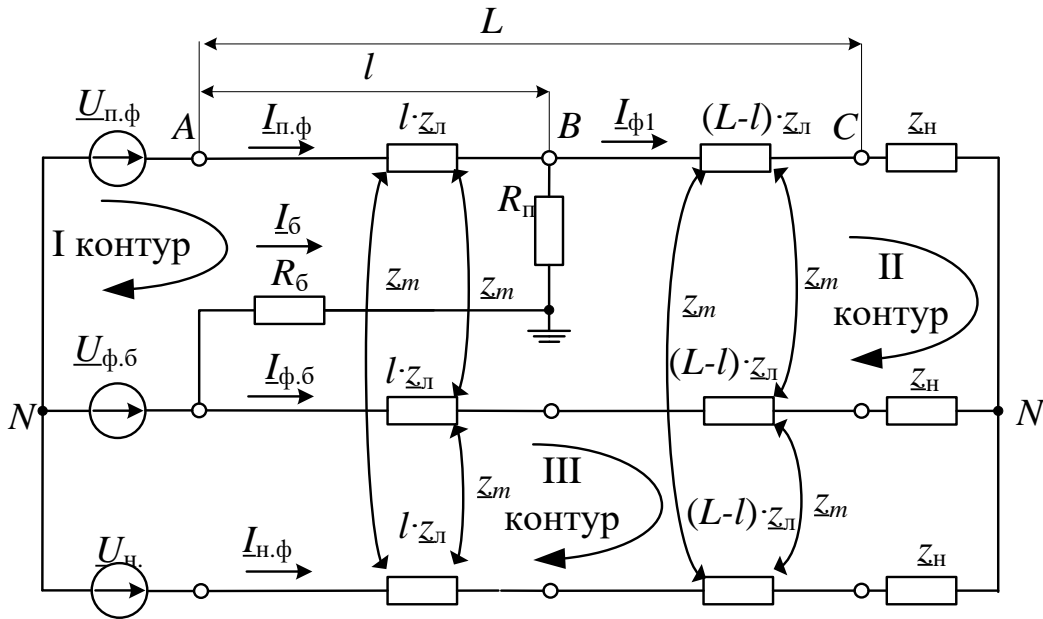


Рисунок 3.5 – Схема замещения сети в режиме двойного замыкания на землю

Уравнение для третьего контура определяется следующим выражением:

$$\begin{aligned} \underline{I}_{\text{ф.б}} \cdot \underline{z}_{\text{л}} \cdot L + \underline{I}_{\text{ф.б}} \cdot \underline{z}_{\text{н}} + \underline{I}_{\text{н.ф}} \cdot \underline{z}_{\text{м}} \cdot L + \underline{I}_{\text{п.ф}} \cdot \underline{z}_{\text{м}} \cdot l + \underline{I}_{\text{ф1}} \cdot (L-l) \cdot \underline{z}_{\text{м}} - \underline{I}_{\text{ф.б}} \cdot \underline{z}_{\text{н}} - \\ - \underline{I}_{\text{ф.б}} \cdot \underline{z}_{\text{л}} \cdot L - \underline{I}_{\text{н.ф}} \cdot \underline{z}_{\text{м}} \cdot L - \underline{I}_{\text{ф1}} \cdot (L-l) \cdot \underline{z}_{\text{м}} - \underline{I}_{\text{п.ф}} \cdot \underline{z}_{\text{м}} \cdot l = \underline{U}_{\text{ф.б}} - \underline{U}_{\text{н.ф}} \end{aligned} \quad 3.12$$

После вынесения за скобки общих множителей, выразим сопротивление нагрузки $\underline{z}_{\text{н}}$

$$\underline{z}_{\text{н}} = \frac{\underline{U}_{\text{ф.б}} - \underline{U}_{\text{н.ф}} - (\underline{I}_{\text{ф.б}} - \underline{I}_{\text{н.ф}}) \cdot (\underline{z}_{\text{л}} - \underline{z}_{\text{м}}) \cdot L}{\underline{I}_{\text{ф.б}} - \underline{I}_{\text{н.ф}}} \quad 3.13$$

Подставим полученное выражение 3.13 в соотношение 3.7, получаем:

$$\begin{aligned} \underline{I}_{\text{ф1}} \cdot (\underline{I}_{\text{ф.б}} + \underline{I}_{\text{н.ф}}) \cdot \underline{z}_{\text{л}} \cdot (L-l) - \underline{I}_{\text{ф.б}} \cdot (\underline{I}_{\text{ф.б}} - \underline{I}_{\text{н.ф}}) \cdot \underline{z}_{\text{л}} \cdot L + \\ + (\underline{I}_{\text{ф1}} - \underline{I}_{\text{ф.б}}) \cdot (\underline{U}_{\text{ф.б}} - \underline{U}_{\text{н.ф}} - (\underline{I}_{\text{ф.б}} - \underline{I}_{\text{н.ф}}) \cdot (\underline{z}_{\text{л}} - \underline{z}_{\text{м}}) \cdot L) + \\ + (\underline{I}_{\text{ф.б}} + \underline{I}_{\text{н.ф}}) \cdot (\underline{I}_{\text{ф.б}} - \underline{I}_{\text{н.ф}}) \cdot (L-l) \cdot \underline{z}_{\text{м}} - \underline{I}_{\text{н.ф}} \cdot (\underline{I}_{\text{ф.б}} - \underline{I}_{\text{н.ф}}) \cdot \underline{z}_{\text{м}} \cdot L - \\ - \underline{I}_{\text{п.ф}} \cdot (\underline{I}_{\text{ф.б}} - \underline{I}_{\text{н.ф}}) \cdot \underline{z}_{\text{м}} \cdot l - \underline{I}_{\text{ф1}} \cdot (\underline{I}_{\text{ф.б}} - \underline{I}_{\text{н.ф}}) \cdot \underline{z}_{\text{м}} \cdot (L-l) + \\ + (\underline{I}_{\text{ф.б}} - \underline{I}_{\text{н.ф}}) \cdot (\underline{I}_{\text{п.ф}} \cdot \underline{z}_{\text{л}} \cdot l + (\underline{I}_{\text{ф.б}} + \underline{I}_{\text{н.ф}}) \cdot \underline{z}_{\text{м}} \cdot l - \underline{U}_{\text{п.ф}} + \underline{U}_{\text{ф.б}}) = 0 \end{aligned} \quad 3.14$$

Раскрыв скобки, перемножив между собой многочлены и сократив общие члены, имеем следующее выражение:

$$\begin{aligned} -\underline{I}_{\text{ф1}} \cdot \underline{I}_{\text{ф.б}} \cdot \underline{z}_{\text{л}} \cdot l + \underline{I}_{\text{ф1}} \cdot \underline{I}_{\text{н.ф}} \cdot \underline{z}_{\text{л}} \cdot l + \underline{U}_{\text{ф.б}} \cdot \underline{I}_{\text{ф1}} - \underline{U}_{\text{н.ф}} \cdot \underline{I}_{\text{ф1}} - \underline{U}_{\text{ф.б}} \cdot \underline{I}_{\text{ф.б}} + \\ + \underline{U}_{\text{н.ф}} \cdot \underline{I}_{\text{ф.б}} - \underline{I}_{\text{п.ф}} \cdot \underline{I}_{\text{ф.б}} \cdot \underline{z}_{\text{м}} \cdot l + \underline{I}_{\text{п.ф}} \cdot \underline{I}_{\text{н.ф}} \cdot \underline{z}_{\text{м}} \cdot l + \underline{I}_{\text{ф1}} \cdot \underline{I}_{\text{ф.б}} \cdot \underline{z}_{\text{м}} \cdot l - \\ - \underline{I}_{\text{ф1}} \cdot \underline{I}_{\text{н.ф}} \cdot \underline{z}_{\text{м}} \cdot l + \underline{I}_{\text{ф.б}} \cdot \underline{I}_{\text{п.ф}} \cdot \underline{z}_{\text{л}} \cdot l - \underline{I}_{\text{ф.б}} \cdot \underline{U}_{\text{п.ф}} + \underline{I}_{\text{ф.б}} \cdot \underline{U}_{\text{ф.б}} - \\ - \underline{I}_{\text{н.ф}} \cdot \underline{I}_{\text{п.ф}} \cdot \underline{z}_{\text{л}} \cdot l + \underline{I}_{\text{н.ф}} \cdot \underline{U}_{\text{ф.б}} = 0 \end{aligned} \quad 3.15$$

Подставив, вместо $\underline{I}_{\phi 1}$ эквивалентное выражение, полученное по первому закону Кирхгофа $\underline{I}_{\phi 1} = \underline{I}_{п.ф} + \underline{I}_{\phi}$ имеем следующее выражение:

$$\begin{aligned} & -(\underline{I}_{п.ф} + \underline{I}_{\phi}) \cdot \underline{I}_{\phi.б} \cdot \underline{z}_л \cdot l + (\underline{I}_{п.ф} + \underline{I}_{\phi}) \cdot \underline{I}_{н.ф} \cdot \underline{z}_л \cdot l - \underline{I}_{п.ф} \cdot \underline{I}_{\phi.б} \cdot \underline{z}_м \cdot l + \\ & + \underline{I}_{п.ф} \cdot \underline{I}_{н.ф} \cdot \underline{z}_м \cdot l - (\underline{I}_{п.ф} + \underline{I}_{\phi}) \cdot \underline{I}_{н.ф} \cdot \underline{z}_м \cdot l + (\underline{I}_{п.ф} + \underline{I}_{\phi}) \cdot \underline{I}_{\phi.б} \cdot \underline{z}_м \cdot l + \\ & + \underline{I}_{\phi.б} \cdot \underline{I}_{п.ф} \cdot \underline{z}_л \cdot l - \underline{I}_{н.ф} \cdot \underline{I}_{п.ф} \cdot \underline{z}_л \cdot l + \underline{U}_{\phi.б} \cdot (\underline{I}_{п.ф} + \underline{I}_{\phi}) - \underline{U}_{н.ф} \cdot (\underline{I}_{п.ф} + \underline{I}_{\phi}) - \\ & - \underline{U}_{\phi.б} \cdot \underline{I}_{\phi.б} + \underline{U}_{н.ф} \cdot \underline{I}_{\phi.б} - \underline{I}_{\phi.б} \cdot \underline{U}_{п.ф} + \underline{U}_{\phi.б} \cdot \underline{I}_{\phi.б} + \underline{I}_{н.ф} \cdot \underline{U}_{п.ф} - \underline{I}_{н.ф} \cdot \underline{U}_{\phi.б} = 0 \end{aligned} \quad 3.16$$

Сократим полученное выражение, найдя общие члены:

$$\begin{aligned} & \underline{I}_{\phi} \cdot \underline{I}_{\phi.б} \cdot \underline{z}_л \cdot l + \underline{I}_{\phi} \cdot \underline{I}_{н.ф} \cdot \underline{z}_л \cdot l + \underline{I}_{\phi} \cdot \underline{I}_{\phi.б} \cdot \underline{z}_м \cdot l - \underline{I}_{\phi} \cdot \underline{I}_{н.ф} \cdot \underline{z}_м \cdot l + \\ & + \underline{U}_{\phi.б} \cdot \underline{I}_{п.ф} + \underline{U}_{\phi.б} \cdot \underline{I}_{\phi} - \underline{U}_{н.ф} \cdot \underline{I}_{п.ф} - \underline{U}_{н.ф} \cdot \underline{I}_{\phi} + \underline{U}_{н.ф} \cdot \underline{I}_{\phi.б} - \\ & - \underline{I}_{\phi.б} \cdot \underline{U}_{п.ф} + \underline{I}_{н.ф} \cdot \underline{U}_{п.ф} - \underline{I}_{н.ф} \cdot \underline{U}_{\phi.б} = 0 \end{aligned} \quad 3.17$$

После вынесения за скобки общих множителей получаем следующее выражение:

$$\begin{aligned} & \underline{I}_{\phi} \cdot l \cdot (\underline{z}_л - \underline{z}_м) \cdot (\underline{I}_{н.ф} - \underline{I}_{\phi.б}) + (\underline{I}_{п.ф} + \underline{I}_{\phi}) \cdot (\underline{U}_{\phi.б} - \underline{U}_{н.ф}) + \underline{I}_{\phi.б} \cdot (\underline{U}_{н.ф} - \underline{U}_{п.ф}) + \\ & + \underline{I}_{н.ф} \cdot (\underline{U}_{п.ф} - \underline{U}_{\phi.б}) = 0 \end{aligned} \quad 3.18$$

Выразив l из выражения 3.18 получим формулу для расчета расстояния до места повреждения:

$$l = \frac{(\underline{I}_{п.ф} + \underline{I}_{\phi}) \cdot (\underline{U}_{\phi.б} - \underline{U}_{н.ф}) + \underline{I}_{\phi.б} \cdot (\underline{U}_{н.ф} - \underline{U}_{п.ф}) + \underline{I}_{н.ф} \cdot (\underline{U}_{п.ф} - \underline{U}_{\phi.б})}{\underline{I}_{\phi} \cdot (\underline{z}_м - \underline{z}_л) \cdot (\underline{I}_{н.ф} - \underline{I}_{\phi.б})} \quad 3.19$$

В общем виде получаем расчетное соотношение для определения расстояния до места повреждения, независимое от сопротивления нагрузки:

$$l = \text{Im} \left[\frac{(\underline{I}_{п.ф} + \underline{I}_{\phi}) \cdot (\underline{U}_{\phi.б} - \underline{U}_{н.ф}) + \underline{I}_{\phi.б} \cdot (\underline{U}_{н.ф} - \underline{U}_{п.ф}) + \underline{I}_{н.ф} \cdot (\underline{U}_{п.ф} - \underline{U}_{\phi.б})}{\underline{I}_{\phi} \cdot (\underline{z}_м - \underline{z}_л) \cdot (\underline{I}_{н.ф} - \underline{I}_{\phi.б})} \right] \quad 3.20$$

Следует заметить, что в ходе формирования итогового соотношения (3.20), реализовалась подстановка и компенсация суммы $R_{\phi} + R_{п}$ в результате чего расчет расстояния до места ОЗЗ не зависит от переходного сопротивления $R_{п}$. Это обстоятельство является крайне важным, поскольку в сетях с изолированной и компенсированной нейтралью практически все ОЗЗ сопровождаются изменяющимся во времени переходным сопротивлением. С другой стороны, независимость l (выражение (3.20)) от R_{ϕ} подчеркивает, что введение балластного сопротивления необходимо лишь для обеспечения требуемого диапазона фиксации токов и напряжений при кратковременном двойном замыкании на землю.

В рассматриваемой схеме замещения (рисунок 3.5) и в полученном выражении (3.20) не учитывается влияние активной и емкостной проводимости линии. Для исключения возможных искажений расчетов предлагается рассматривать только мнимую часть выражения, а ведение поправочного коэффициента, в дальнейших вычислениях, позволит снизить влияние активных проводимостей на точностные характеристики формируемых результатов.

В заключении отметим, что предлагаемый способ позволяет с высокой точностью определить расстояние до места однофазного замыкания на землю в электрических сетях 6–35 кВ с изолированной или компенсированной нейтралью, за счет использования полной информации о токах и напряжениях поврежденной фазы, а также компенсации влияния сопротивления повреждения и нагрузки на точность оценки расстояния до места ОЗЗ путем их учета в соответствующих расчетных выражениях.

3.2 Имитационное моделирование однофазных замыканий на землю

Проверка предложенного алгоритма проводилась в соответствии со схемой, представленной на рисунке 2.5. Для обоснования возможности применения разработанного алгоритма, имитировалось однофазное замыкание на землю в точке $k1$ (рисунок 2.5), для имитации двойного замыкания на землю рассматривалось короткое замыкание через балластное сопротивление, установленное в ячейку с выключателем КА5.

Обработка результатов моделирования в соответствии с выражением 3.1, позволила получить зависимость расчетных расстояний от задаваемых при моделировании (рисунок 3.6).

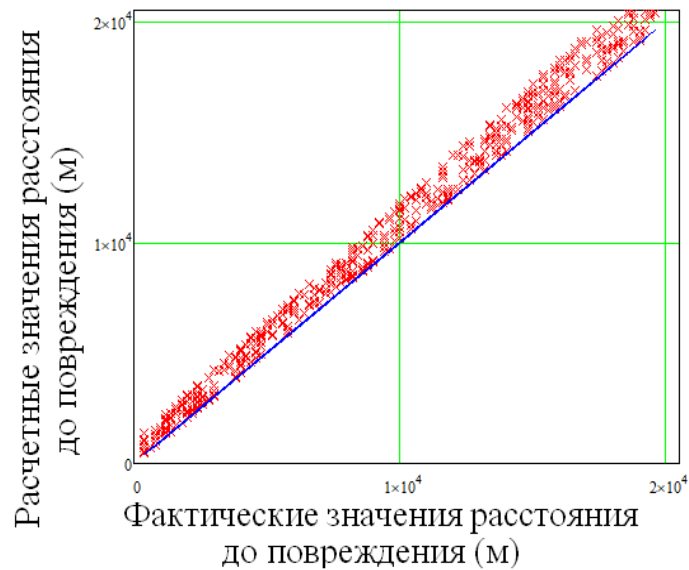


Рисунок 3.6 – Зависимость расчетных расстояний до точек повреждения от фактических значений при ОЗЗ, за счет имитации ДвЗЗ

Анализ полученных результатов показал, что применение формулы расчета расстояния до ОЗЗ, полученной в разделе 2.2 для двойных замыканий на землю на разных линиях позволяет определять расстояние с относительной погрешностью, не превышающей 15%, математическим ожиданием не превышающим 5% и среднеквадратичным отклонением составляющим 3%.

Обработка результатов моделирования в соответствии с выражением 3.20, показала, что максимальное значение относительной погрешность расчета не превысило 12%, при этом, математической ожидание и среднеквадратичное не превысили 3х процентов (рисунок 3.7)

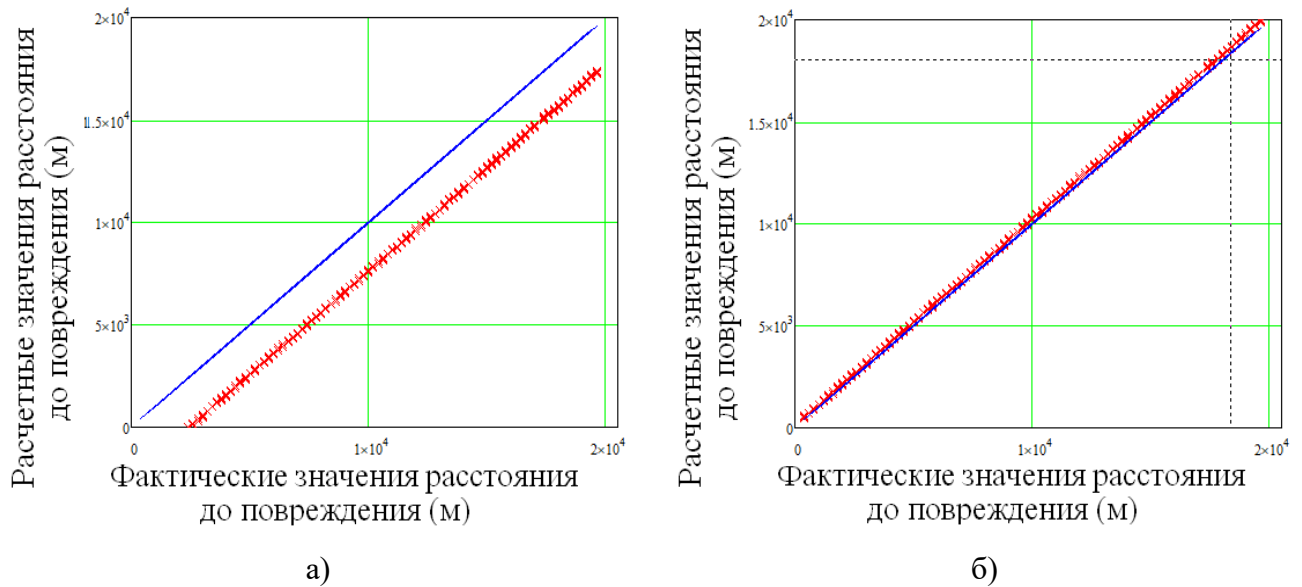


Рисунок 3.7 – Зависимость расчетных расстояний до точек повреждения от фактических значений при ОЗЗ, при учете сопротивления нагрузки

Зависимость 3.7 (а), показывает, что ошибка, вносимая расчетной формулой 3.20, носит постоянный характер. Проведение ряда экспериментов, позволило определить, что полученная в результате расчета погрешность обусловлена заданной в модели емкостной проводимостью линии. После введения поправки в результирующий расчет, и исключения влияния емкостной проводимости, была определена зависимость, которая показала, что погрешность определения расстояния не превышает 4%, при этом значение среднеквадратичного отклонения и математического ожидания также не превышают 4% (рисунок 3.7).

Использование в расчетном выражении информации о значении балластного сопротивления позволило получить зону обхода не превышающую двух процентов, при этом, неучет данного параметра в расчетном выражении требует обхода 17% от полной длины линии. Результаты расчетов сведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Результаты расчетов зон обхода при кратковременном введении ОЗЗ

		Левая граница зоны обхода, о.е.	Правая граница зоны обхода, о.е.	Протяженность зоны обхода, о.е.	Протяженность зоны обхода, %.
Учет балластного сопротивления в расчетном выражении	-	-0,04	0,133	0,173	17
	+	-0,004	0,016	0,02	2

Анализ полученных результатов показал, что благодаря созданию кратковременного искусственного двойного замыкания на землю и использованию в расчетном алгоритме информации о величине балластного сопротивления возможно определить расстояние до места

ОЗЗ с погрешностью, не превышающей 4% от длины линии. При этом максимальное отклонение расчетного расстояния от фактического, для модели, представленной на рисунке 2.5, составило не более 200 м. Таким образом, был получен быстрый и точный алгоритм определения места ОЗЗ на воздушных линиях электропередачи 6–35 кВ, который позволяет не только сократить затраты на ликвидацию повреждения и восстановления нормального режима работы сети, но и значительно снизить вероятность перехода в замыкание, отключаемое штатным действием релейной защиты, и в конечном итоге, уменьшить число кратковременных нарушений электроснабжения потребителей. Результаты расчетов представлены в таблице 2.6.

3.3 Выводы по главе

1. Предложены способы одностороннего ОМП ЛЭП при ОЗЗ, основанные на применении балластного сопротивления и кратковременном введении ДвЗЗ, что позволило воспользоваться разработанными во второй главе алгоритмами ОМП для замыканий на разных линиях и определить расстояние до места повреждения с учетом предложенных алгоритмов компенсации, определяя при этом расстояние с высокой точностью.

2. Получены расчетные соотношения для более точного определения расстояния до места повреждения, которые не требуют осуществления процедуры компенсации ошибки и учитывают в расчетной формуле информацию о величине балластного сопротивления. Полученное соотношение использует информацию о напряжениях поврежденной и замкнутой через балластное сопротивление фаз, а также осуществляет компенсацию влияния нагрузки на точность оценки расстояния до места ОЗЗ, путем учета сопротивления нагрузки в соответствующем расчетном выражении.

3. Важным преимуществом разработанного алгоритма является исключение переходного сопротивления из формулы, сведя к минимуму погрешность расчета. Потенциальная ошибка ОМП ЛЭП 6–35 кВ при таком техническом решении может быть не более 4%.

ГЛАВА 4 ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА НАЛОЖЕНИЯ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ АЛГОРИТМОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТ ПОВРЕЖДЕНИЙ В СЕТЯХ С ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ

В распределительных сетях применяются, как правило, методы ОМП, основанные на одностороннем замере параметров аварийного режима. Ввиду особенности данных сетей, затруднена разработка точных алгоритмов расчета расстояния до однофазных и двойных замыканий на землю. Особенность работы, произвольная конфигурация электрических сетей, а также отсутствие возможности осуществления многосторонних замеров накладывают определенные ограничения на разработку универсальных алгоритмов ОМП ЛЭП 6–35 кВ.

Во второй главе были подробно рассмотрены два подхода для решения задач связанных с компенсацией ошибок разработанных алгоритмов. Использование итерационных процедур позволило сократить зону обхода до 2%, а применение статистического моделирования позволяет получать зону обхода, не превышающую 15% для ДвЗЗ на одной линии и 10% для ДвЗЗ на разных линиях. Каждый из этих методов имеет свои особенности, подробно рассмотренные в разделе 2.4, которые накладывают определенные ограничения на их повсеместное применение, особенно в распределительных сетях сложной конфигурации. В четвертой главе рассмотрена возможность применения универсального аналитического метода, независимого от структуры электрической сети.

Применяемые на практике алгоритмы ОМП основаны на замере и дальнейшей обработке параметров аварийного режима, хотя аварийные составляющие сигнала содержат в себе компоненты не только аварийного, но и доаварийного (нормального) режимов [48, 155 – 157] (рисунок 4.1).

Фиксация аварийного режима производится с учетом апериодической составляющей и высших гармоник, которые благодаря алгоритмам цифровой обработки сигнала можно исключить и получить в неискаженном виде периодическую составляющую сигнала.

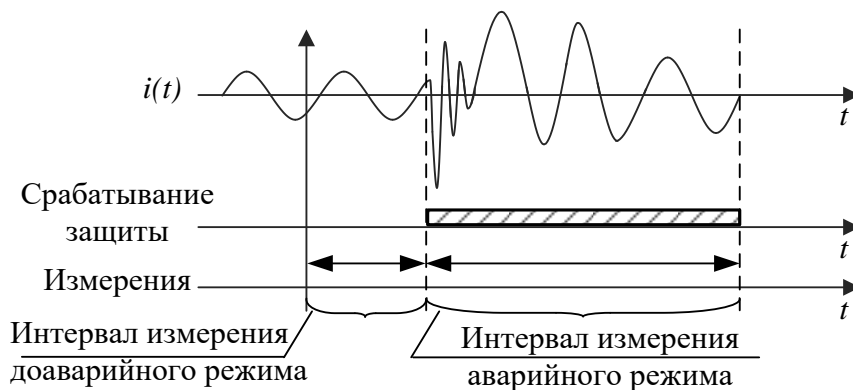


Рисунок 4.1 – Фиксация предшествующего и аварийного режимов

Актуальной задачей является разделение аварийного режима на нагрузочную и чисто аварийную составляющие.

Для решения задачи ОМП при замыканиях на землю, на линиях электропередачи произвольной конфигурации, предлагается использовать метод наложения с целью упрощения расчетных соотношений и эквивалентирования линии [158, 159]. Структурная схема работы алгоритма представлена на рисунке 4.2.

Основная идея разделение аварийного режима на нагрузочную и чисто аварийную составляющие осуществляется за счет применения метода наложения, суть которого заключается в уравнивании количества ветвей в электрической сети до и после повреждения.

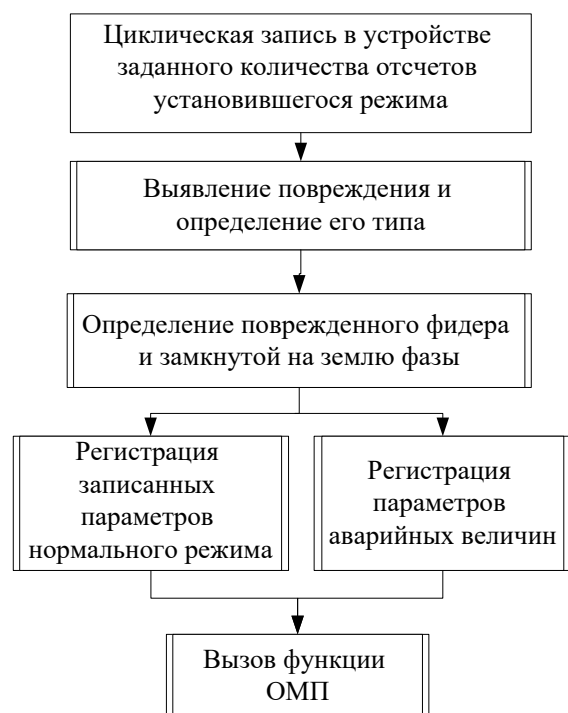


Рисунок 4.2 – Структурная схема алгоритма ОМП с применением метода наложения

Принцип работы метода поясняется на рисунке 4.3, на котором наблюдаемая модель системы представлена в виде активных и пассивных (не содержащих источников ЭДС) многополюсников (рисунок 4.3а).

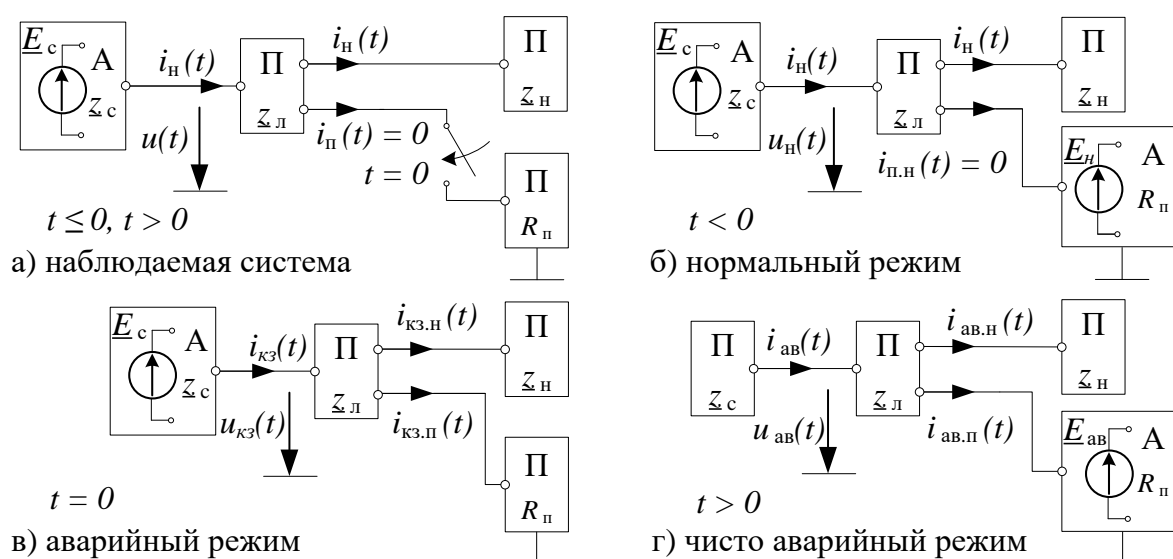


Рисунок 4.3 – Пояснение к применению метода наложения

Для получения чисто аварийной схемы рассматриваются схемы замещения нормального и аварийного режимов. В рассматриваемой схеме замещения нормального режима (рисунок 4.3 б) в место предполагаемого замыкания подключается фиктивная ветвь ЭДС, равная напряжению в точке замыкания и не меняющая токораспределения линии, при этом аварийная схема (рисунок 4.3 в), напротив, не содержит ЭДС в месте предполагаемого КЗ. Вычитая по законам Кирхгофа из уравнений аварийной схемы, уравнения доаварийного режима, получают чисто аварийную схему (рисунок 4.3 г), которая содержит одну ЭДС, расположенную в месте замыкания и представляющую в искаженном виде всю необходимую информацию для распознавания повреждения.

4.1 Алгоритм определения места повреждения при двойных замыканиях на землю на одной линии

Для получения схемы замещения чисто аварийного режима ДвЗЗ на одной линии, составляется схема замещения нормального режима, предварительно подставив в место предполагаемого КЗ фиктивную ветвь ЭДС (рисунок 4.4а), и аварийного режима, напротив не содержащую ЭДС в месте предполагаемого КЗ (рисунок 4.4б). Вычитая по законам Кирхгофа из уравнений аварийной схемы, уравнения доаварийного режима, получается чисто аварийная схема (рисунок 2.8в), которая содержит в искаженном виде всю необходимую информацию для распознавания повреждения [158].

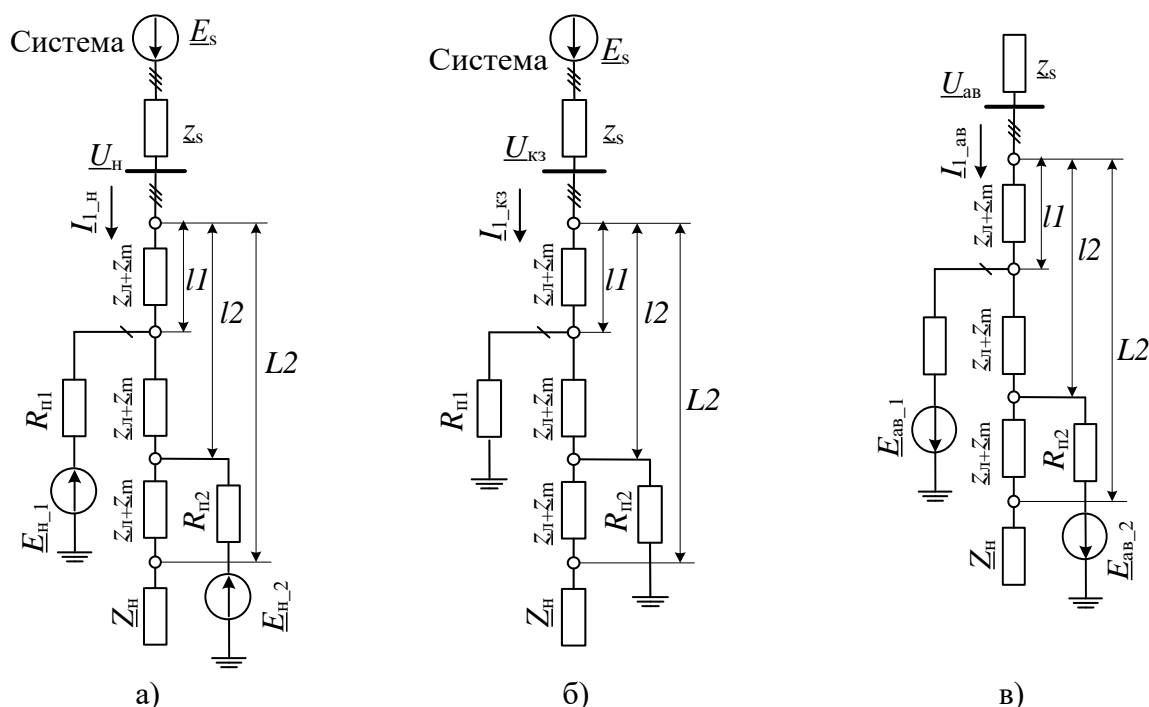


Рисунок 4.4 – Пояснение к применению метода наложения для ДвЗЗ на одной линии

Схема замещения для чисто аварийного режима в трехфазном исполнении выглядит следующим образом (рисунок 4.5).

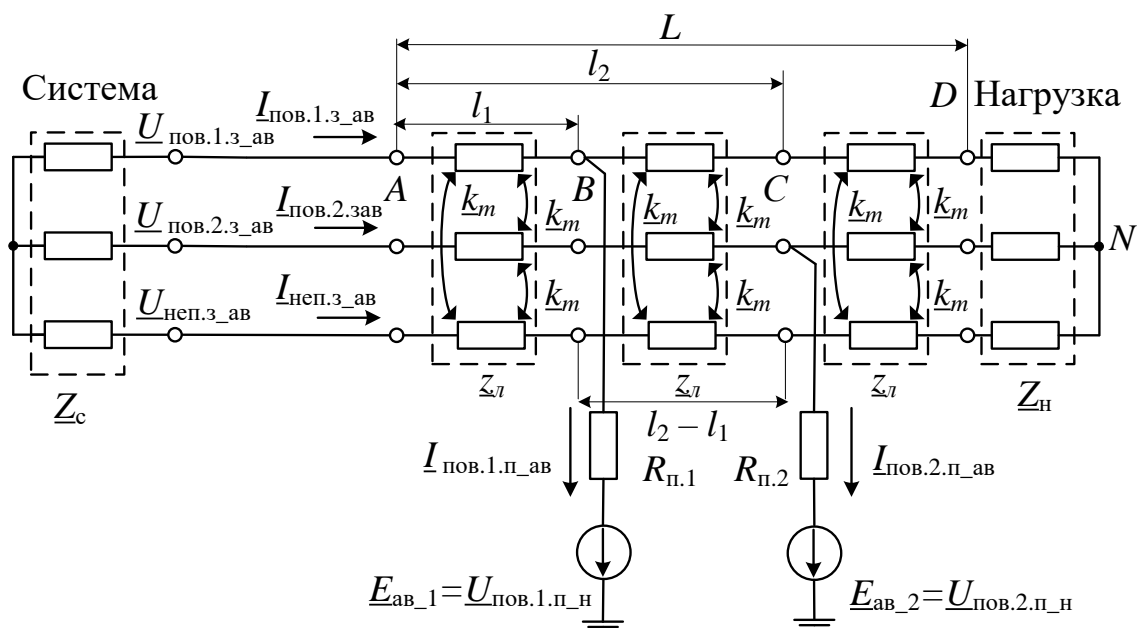


Рисунок 4.5 – Схема замещения чисто аварийного режима в трехфазном исполнении

Анализ схемы, представленной на рисунке 4.5 в фазных координатах, позволяет получить расчетные выражения для определения расстояний до точек повреждения.

Доаварийные напряжения в месте повреждения определяются по выражению:

$$\underline{U}_{\text{пов.1(2).п}_n} = \underline{U}_{\text{пов.1(2).з}_n} - I_{\text{пов.1(2).з}_n} \cdot \underline{z}_l \cdot l_{1(2)} - I_{\text{пов.2(1).з}_n} \cdot \underline{z}_m \cdot l_1 - I_{\text{неп.з}_n} \cdot \underline{z}_m \cdot l_{1(2)}, \quad 4.1$$

где l_x – расстояние до ближней (дальней) точки повреждения; \underline{z}_m – удельное сопротивление взаимной индукции; \underline{z}_l – удельное сопротивление линии; $\underline{U}_{\text{пов.х.з}_z}$ – фазное напряжение соответствующего режима на шинах; $I_{\text{пов.х.з}_z}$ – ток, протекающий в месте установки защиты; $I_{\text{пов.х.п}_z}$ – ток, протекающий в месте повреждения; индекс «х» обозначает точку повреждения (1 соответствует ближней точке, 2 – дальней точки повреждения); индекс «z» соответствует режиму (н – нормальный режим, кз – аварийный режим, ав – чисто аварийный режим).

Для ближней точки повреждения, напряжение поврежденной фазы определяется по следующему выражению:

$$\underline{U}_{\text{пов.1.з}_\text{ав}} = I_{\text{пов.1.з}_\text{ав}} \cdot \underline{z}_l \cdot l_1 + (I_{\text{пов.2.з}_\text{ав}} + I_{\text{неп.з}_\text{ав}}) \cdot \underline{z}_m \cdot l_1 + I_{\text{пов.1.п}_\text{ав}} \cdot R_{\text{п1}} + E_{\text{ав}_1}. \quad 4.2$$

В соответствии с методом наложения, ЭДС в месте повреждения $E_{\text{ав}_x}$ равна до аварийному напряжению $\underline{U}_{\text{пов.1.п}_n}$, взятому с обратным знаком, поэтому, подставив выражение (4.1) в выражение (4.2) для ближней точки повреждения, получаем следующее соотношение:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{\text{пов.1.з}_\text{ав}} + \underline{U}_{\text{пов.1.п}_n} &= l_1 \cdot (I_{\text{пов.2.з}_\text{ав}} + I_{\text{неп.з}_\text{ав}} + I_{\text{пов.2.з}_n} + I_{\text{неп.з}_n}) \cdot \underline{z}_m + \\ &+ l_1 \cdot (I_{\text{пов.1.з}_\text{ав}} + I_{\text{пов.1.з}_n}) \cdot \underline{z}_l + I_{\text{пов.1.п}_\text{ав}} \cdot R_{\text{п1}}. \end{aligned} \quad 4.3$$

Выразив из соотношения (8) длину линии l_1 получаем формулу для расчета расстояния до места повреждения:

$$l_1 = \frac{U_{\text{пов.1.з_ав}} + U_{\text{пов.1.п_н}} - I_{\text{пов.1.п_ав}} \cdot R_{\text{п1}}}{\left(I_{\text{пов.2.з_ав}} + I_{\text{неп.з_ав}} + I_{\text{х_пов.2.з_н}} + I_{\text{неп.з_н}} \right) \cdot z_m + \left(I_{\text{пов.1.з_ав}} + I_{\text{пов.1.з_н}} \right) \cdot z_l} \quad 4.4$$

Применение чистоаварийного режима позволяет снизить влияние нагрузки на точность расчета с учетом того, что ток, протекающий через нагрузку одинаков как в нагрузочном, так и аварийном режимах, поэтому значение $I_{\text{пов.1.п_ав}} \approx I_{\text{пов.1.з_ав}}$.

Поскольку переходное сопротивление, как правило, принимается активным, то его влияние можно исключить за счет рассмотрения только реактивных составляющих, тогда расстояния до места повреждения на первой линии электропередачи определяется соотношением.

$$l_1 = \frac{\text{Im} \left(\frac{U_{\text{пов.1.з_ав}} + U_{\text{пов.1.п_н}}}{I_{\text{пов.1.п_ав}}} \right)}{\text{Im} \left(\frac{\left(I_{\text{пов.1.п_ав}} + I_{\text{неп.з_ав}} + I_{\text{х_пов.2.з_н}} + I_{\text{неп.з_н}} \right) \cdot z_m + \left(1 + \frac{I_{\text{пов.1.з_н}}}{I_{\text{пов.1.п_ав}}} \right) \cdot z_l}{I_{\text{пов.1.п_ав}}} \right)} \quad 4.5$$

Аналогично определяются расстояние для дальней точки повреждения. Применение чисто аварийного режима позволяет снизить влияние токораспределения (оно одинаково в доаварийном и аварийном режимах) при КЗ на ЛЭП. Поэтому влиянием магнитной индукции на участке между первой и второй точкой КЗ можно пренебречь, а напряжение поврежденной фазы для дальней точке КЗ определить по следующему выражению:

$$U_{\text{пов.2.з_ав}} = I_{\text{пов.2.з_ав}} \cdot z_l \cdot l_2 + I_{\text{пов.1.з_ав}} \cdot z_m \cdot l_1 + I_{\text{неп.з_ав}} \cdot z_m \cdot l_2 + I_{\text{пов.2.п_ав}} \cdot R_{\text{п2}} + E_{\text{ав}_2} \quad 4.6$$

Подставив выражение 4.1 в выражение 4.6 для дальней точки повреждения, получаем следующее соотношение:

$$l_2 = \frac{U_{\text{пов.2.з_ав}} + U_{\text{пов.2.з_н}} - \left(I_{\text{пов.1.з_ав}} + I_{\text{пов.1.з_н}} \right) \cdot z_m \cdot l_1 - I_{\text{пов.2.п_ав}} \cdot R_{\text{п2}}}{\left(I_{\text{пов.2.з_ав}} + I_{\text{пов.2.з_н}} \right) \cdot z_l + \left(I_{\text{неп.з_ав}} + I_{\text{неп.з_н}} \right) \cdot z_m} \quad 4.7$$

Тогда расстояния для дальней точки повреждения определяется следующим соотношением.

$$l_2 = \frac{\text{Im} \left(\frac{U_{\text{пов.2.з_ав}} + U_{\text{пов.2.з_н}}}{I_{\text{пов.2.з_ав}}} \right) - \text{Im} \left(\frac{I_{\text{пов.1.з_ав}} + I_{\text{пов.1.з_н}}}{I_{\text{пов.2.з_ав}}} \cdot z_m \cdot l_1 \right)}{\text{Im} \left(\frac{I_{\text{пов.2.з_ав}} + I_{\text{пов.2.з_н}}}{I_{\text{пов.2.з_ав}}} \cdot z_l + \frac{I_{\text{неп.з_ав}} + I_{\text{неп.з_н}}}{I_{\text{пов.2.з_ав}}} \cdot z_m \right)} \quad 4.8$$

Исследование разработанного метода проводилось в программном комплексе *Matlab* с использованием среды моделирования *Simulink*. Имитация повреждений проводилась на модели участка электрической сети, содержащей линии с распределенными параметрами,

предполагающую заданный набор конфигураций (рисунок 2.5). Для имитации двойных замыканий на землю на одной линии имитировались замыкания на землю в точках $k3$ и $k4$ (рисунок 2.5).

Для анализа преимуществ алгоритма, проводилось сравнение результатов расчета полученных по выражениям (4.4) и (4.7) со значениями, рассчитанным по выражениям (2.5) и (2.6), использующих параметры аварийного режима раздел 2.1. Обработка результатов моделирования позволила получить зависимость расчетных расстояний, от фактических значений (рисунок 4.6).

На рисунке 4.6 представлены расчетные зависимости при двойных замыканиях на землю на одной линии, не содержащей ответвлений, полученных с применением чисто аварийной схемы (синие крестики), и по параметрам аварийного режима (красные кружки), (а – для ближней точки; б – для дальней точки повреждения).

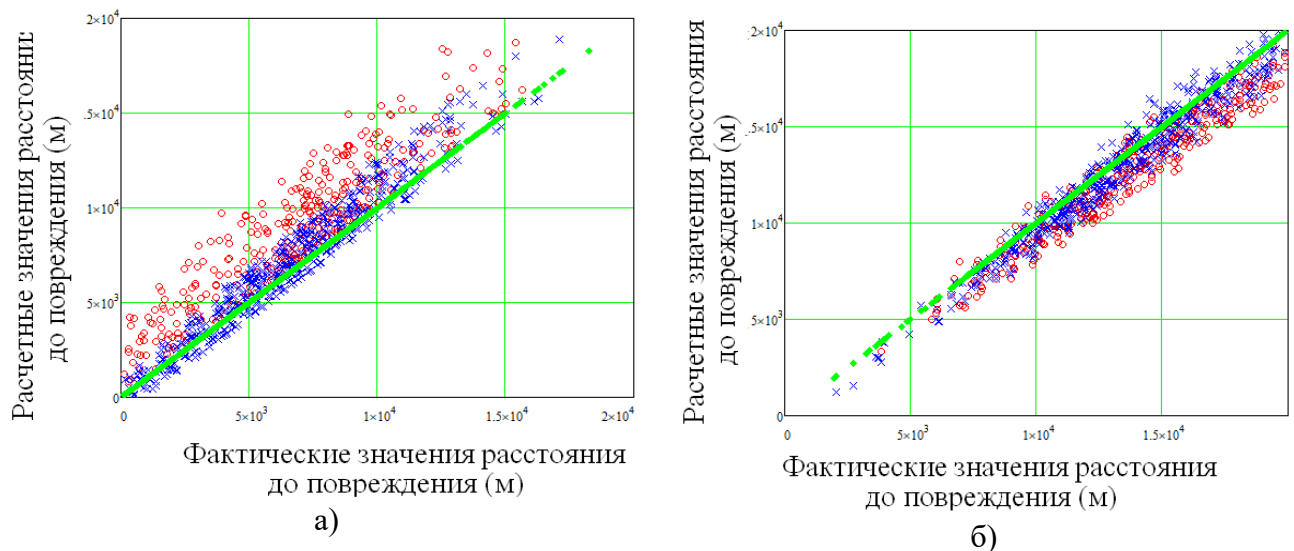


Рисунок 4.6 – Зависимость расчетных расстояний до точек повреждения от фактических при ДвЗЗ на одной линии не содержащей ответвлений

Анализ полученных результатов показал, что применение чисто аварийного режима позволяет существенно снизить отклонение расчётных расстояний от фактических. По сравнению с алгоритмами, использующими параметры аварийного режима (раздел 2.1), предлагаемый вариант ОМП позволяет снизить максимальное значение относительной погрешности с 26 процентов до 13 для ближней точки повреждения и с 16 до 13 процентов для дальней точки. Как видно из полученных результатов, в случае применения метода наложения отпадает необходимость предварительного имитационного моделирования для уточнения результатов расчета. Использование метода наложения позволило сократить необходимую зону обхода для ближней точки повреждения с 36% до 15%, для дальней точки с 20% до 12%, что практически идентично применению поправочных коэффициентов, при этом, в случае

применения данного алгоритма, отпадает необходимость предварительного моделирования участка сети. Результаты расчетов зон обхода сведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Результаты расчетов зон обхода при ДвЗЗ на одной линии без ответвлений

		Левая граница зоны обхода, о.е.	Правая граница зоны обхода, о.е.	Протяженность зоны обхода, о.е.	Протяженность зоны обхода, %.
Ближняя точка повреждения	Параметры аварийного режима	-0,11	0,2496	0,359	36
	Параметры чисто аварийного режима	-0,05	0,103	0,15	15
Дальняя точка повреждения	Параметры аварийного режима	-0,0338	-0,1709	0,2047	20
	Параметры чисто аварийного режима	-0,021	0,1013	0,1223	12

Для обоснования преимущества применения разработанного алгоритма ОМП на линиях с ответвлениями, имитировались двойные замыкание на землю, в точках $k7.1$ и $k7.2$ (ДвЗЗ после ответвлений), $k6$ и $k7$ (отпайка между замыканиями) и в точках $k6.1$ и $k6.2$ (ДвЗЗ до ответвлений) (рисунок 2.5).

Применение метода наложения, при наличии на исследуемой линии ответвления до предполагаемого места КЗ (ДвЗЗ в точках $k8$ и $k9$, рисунок 2.5), позволило снизить относительную погрешность расчета до 14 процентов, вместо 43 для ближней точки (рисунок 4.7 а), и с 45 до 10 процентов для дальней точки (рисунок 4.7 б), где красными кружками обозначены значения, рассчитанные по параметрам аварийного режима, а синими крестиками при использовании метода наложения.

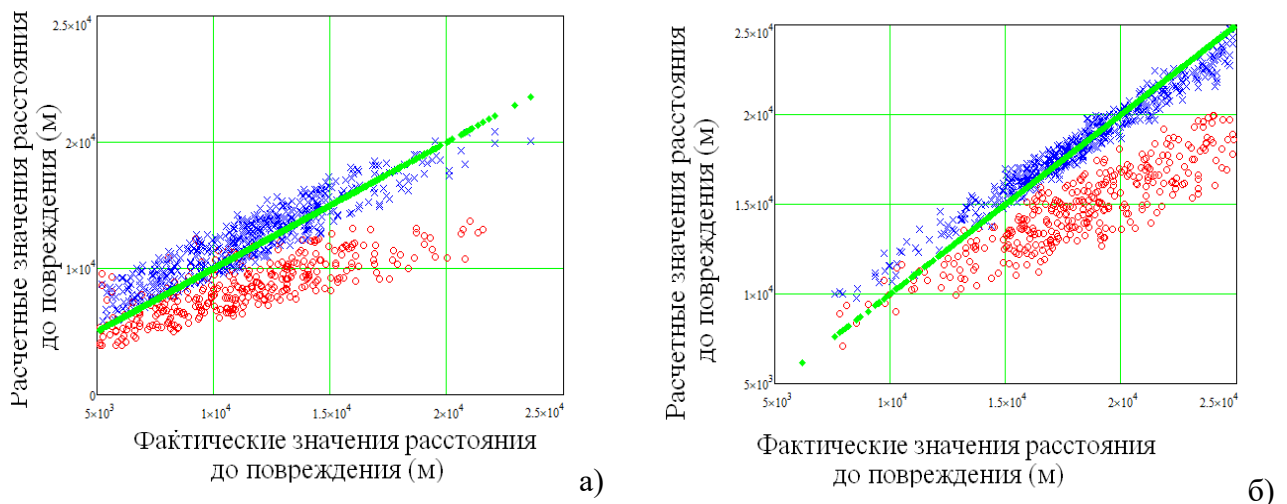


Рисунок 4.7 – Зависимость расчетных расстояний от фактических при ДвЗЗ на одной линии и наличии ответвления до повреждений

Построенный доверительный интервал позволил установить, что в случае использования параметров чисто аварийного режима, удастся получить зону обхода поврежденной линии не превышающую 16% от общей длины, при этом применение классических алгоритмов, не целесообразно, т.к. зона обхода может достигать 50% от общей протяженности линии. Результаты расчетов сведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Результаты расчетов зон обхода при ДвЗЗ на одной линии и наличии ответвления до повреждений

		Левая граница зоны обхода, о.е.	Правая граница зоны обхода, о.е.	Протяженность зоны обхода, о.е.	Протяженность зоны обхода, %.
Ближняя точка повреждения	Параметры аварийного режима	-0,2526	-0,1064	0,359	36
	Параметры чисто аварийного режима	-0,0533	0,1048	0,1581	16
Дальняя точка повреждения	Параметры аварийного режима	-0,0332	0,4644	0,4976	50
	Параметры чисто аварийного режима	-0,0428	0,0955	0,1384	14

Применение метода наложения, при наличии на исследуемой линии ответвления между повреждениями, позволяет произвести расчет с погрешностью, не превышающей 16 процентов, при этом, в случае применения алгоритмов основанных на использовании ПАР погрешность расчета может достигать 35 процентов (рисунок 4.8).

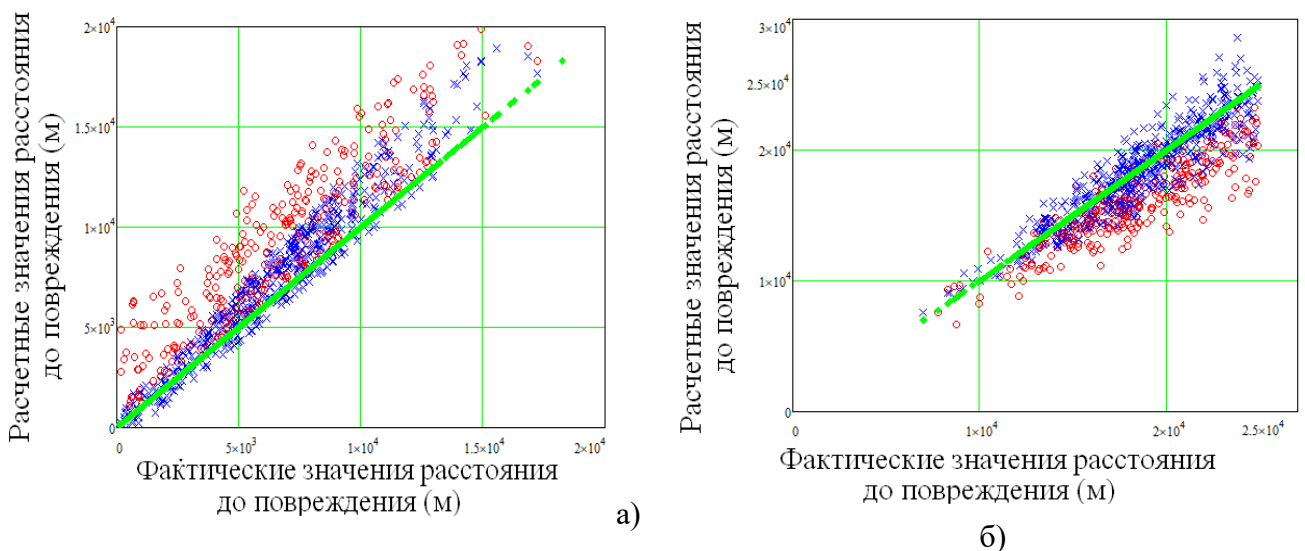


Рисунок 4.8 – Зависимость расчетных расстояний от фактических при ДвЗЗ на одной линии и наличии ответвления между повреждениями

В случае применения метода наложения, зона обхода поврежденной линии не превышает 14% для ближней точки повреждения и 16 % для дальней, при этом, применение классических методов при наличии ответвления на поврежденной линии не целесообразно, т.к. зона обхода может достигать 39 %. Результаты расчетов сведены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Результаты расчетов зон обхода при ДвЗЗ на одной линии и наличии ответвления между повреждениями

		Левая граница зоны обхода, о.е.	Правая граница зоны обхода, о.е.	Протяженность зоны обхода, о.е.	Протяженность зоны обхода, %.
Ближняя точка повреждения	Параметры аварийного режима	-0,0977	0,2956	0,3933	39
	Параметры чисто аварийного режима	-0,0381	0,0988	0,1369	14
Дальняя точка повреждения	Параметры аварийного режима	-0,0899	0,2809	0,3708	37
	Параметры чисто аварийного режима	-0,048	0,1156	0,1636	16

В случае наличия ответвления после предполагаемых КЗ, применение метода наложения позволяет снизить относительную погрешность расчета до 16 процентов, вместо 28 для ближней точки (рисунок 4.9 а), и с 22 до 15 процентов для дальней точки (рисунок 4.9 б).

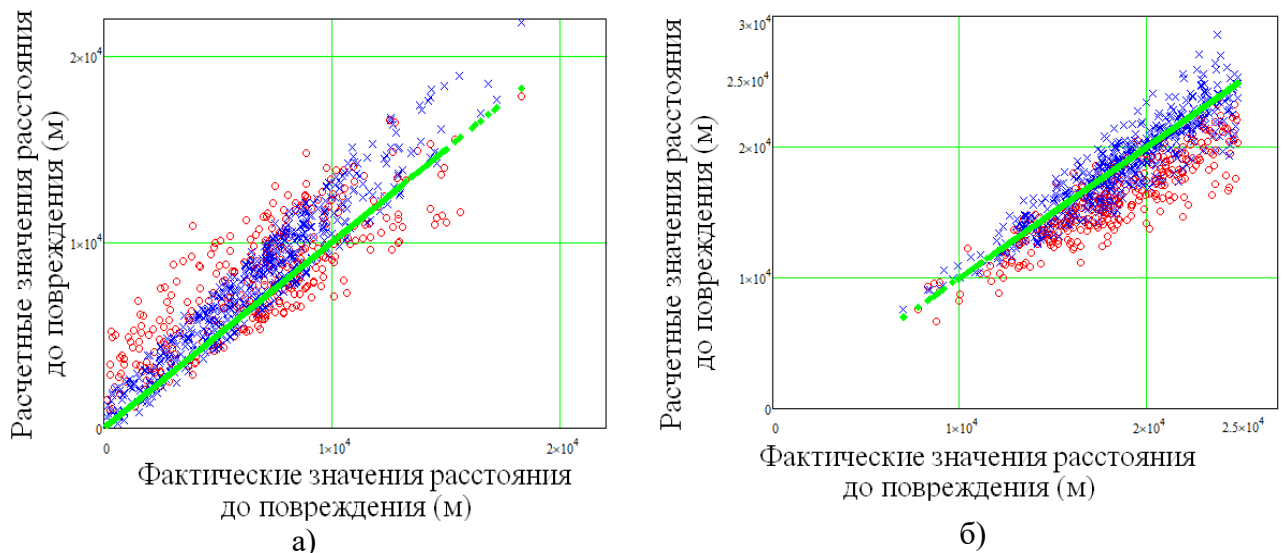


Рисунок 4.9 – Зависимость расчетных расстояний от фактических для ДвЗЗ на одной линии и наличии ответвления после повреждений

По построенному доверительному интервалу удалось установить, что в случае применения метода наложения, зона обхода поврежденной линии не превышает 16% для

ближней точки повреждения и 18 % для дальней. В случае использования алгоритмов основанных на ПАР зона обхода может достигать 36 %. Результаты расчетов сведены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Результаты расчетов зон обхода при ДвЗЗ на одной линии и наличии ответвления после повреждений

		Левая граница зоны обхода, о.е.	Правая граница зоны обхода, о.е.	Протяженность зоны обхода, о.е.	Протяженность зоны обхода, %.
Ближняя точка повреждения	Параметры аварийного режима	-0,0986	0,2597	0,3583	36
	Параметры чисто аварийного режима	-0,0416	0,12	0,1616	16
Дальняя точка повреждения	Параметры аварийного режима	-0,0653	0,1885	0,2537	25
	Параметры чисто аварийного режима	-0,0432	0,138	0,1812	18

4.2 Алгоритм определение места повреждения при двойных замыканиях на землю на разных линиях

Для получения схемы замещения чисто аварийного режима при ДвЗЗ на разных линиях, аналогично разделу 4.1 составлялась схема замещения нормального и аварийного режимов. Рассмотрим схему замещения при двойных замыканиях на землю на линиях, не содержащих ответвлений (рисунок 4.10).

Для схемы замещения нормального режима, в место предполагаемого КЗ включается фиктивная ветвь ЭДС, значение которой равно доаварийному напряжению в месте повреждения (рисунок 4.10а). Схема замещения аварийного режима напротив не содержит ЭДС в месте предполагаемого КЗ (рисунок 4.10б). Вычитая по законам Кирхгофа из уравнений аварийной схемы, уравнения доаварийного режима, получаем чисто аварийную схему (рисунок 4.10в), которая содержит в неискаженном виде всю необходимую информацию для распознавания повреждения [159, 160,164].

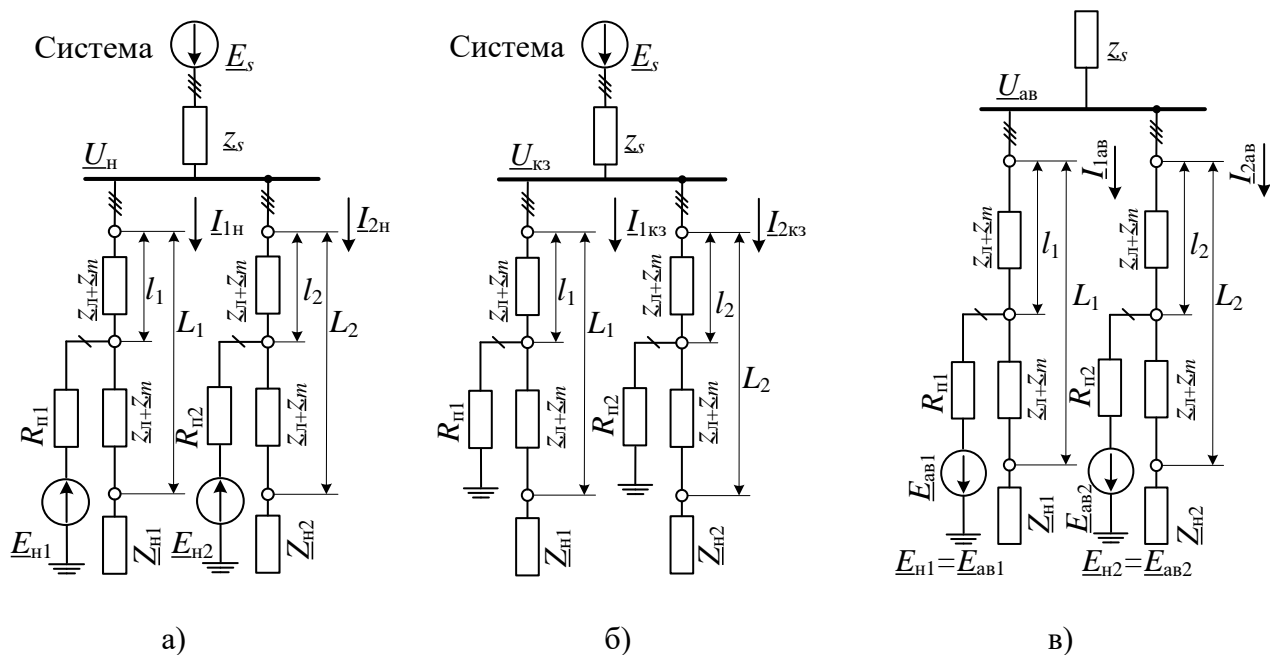


Рисунок 4.10 – Пояснение к применению метод наложения для ДвЗЗ на разных ЛЭП

Представим схему замещения для чисто аварийного режима в трехфазном исполнении (рисунок 4.11).

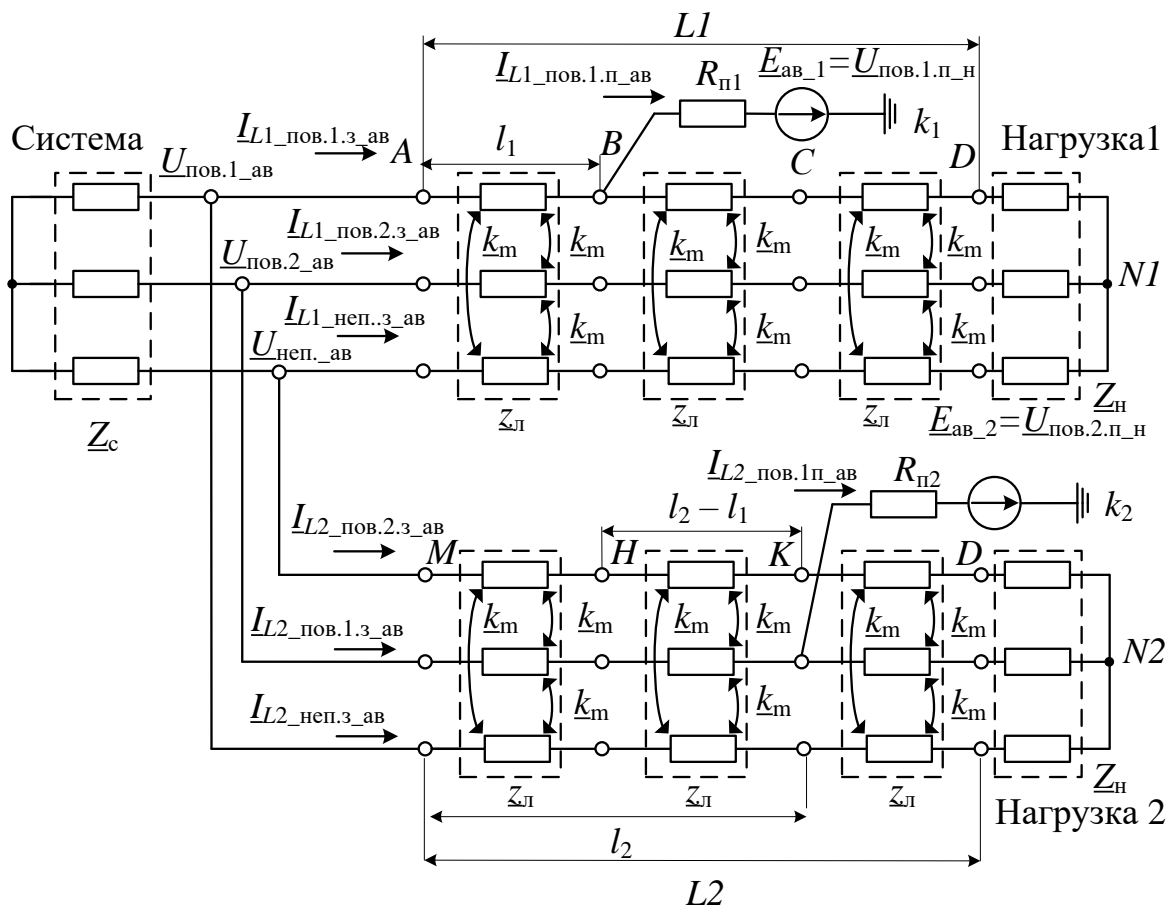


Рисунок 4.11 – Схема замещения чисто аварийного режима в трехфазном исполнении

Анализ схемы, представленной на рисунке 4.11 в фазных координатах, позволяет получить расчетные выражения для определения расстояний до точек повреждения.

Доаварийные напряжения в месте повреждения определяются по выражению:

$$\underline{U}_{\text{пов.1(2).п}_n} = \underline{U}_{\text{пов.1(2).з}_n} - \underline{I}_{x_{\text{пов.1(2).з}_n}} \cdot \underline{z}_l \cdot l_{1(2)} - \left(\underline{I}_{x_{\text{пов.2(1).з}_n}} + \underline{I}_{x_{\text{неп.з}_n}} \right) \underline{z}_m \cdot l_{1(2)} \quad 4.9$$

где l_x – расстояние до места повреждения; \underline{z}_m – удельное сопротивление взаимной индукции; \underline{z}_l – удельное сопротивление линии; $\underline{U}_{\text{пов.х.з}_z}$ – фазное напряжение соответствующего режима на шинах; $\underline{I}_{x_{\text{пов.у.з}_z}}$ – ток, протекающий в месте установки защиты; $\underline{I}_{x_{\text{пов.у.п}_z}}$ – ток, протекающий в месте повреждения; индекс «х» – обозначает анализируемую линию (1 соответствует линии L1, 2 – линии L2); индекс «у» – указывает фазу (1 – поврежденная фаза анализируемой линии, 2 – поврежденная фаза соседней линии, неп. – неповрежденная фаза); индекс «з» – соответствует режиму (н – нормальный режим, кз – аварийный режим, ав – чисто аварийный режим).

В случае применения чисто аварийной схемы, влияние нагрузочной составляющей снижается. При коротких замыканиях в точках k1 и k2 (рисунок 2.5) ЭДС в месте повреждения определяется по следующему выражению:

$$\underline{E}_{\text{ав}_x} = -\underline{U}_{\text{пов.1}_\text{ав}} + \underline{I}_{x_{\text{пов.1.з}_\text{ав}}} \cdot \underline{z}_l \cdot l_x + \left(\underline{I}_{x_{\text{пов.2.з}_\text{ав}}} + \underline{I}_{x_{\text{неп.з}_\text{ав}}} \right) \cdot \underline{z}_m \cdot l_x + \underline{I}_{x_{\text{пов.1.п}_\text{ав}}} \cdot R_{\text{п1}} \quad 4.10$$

В соответствие с методом наложения, ЭДС в месте повреждения $\underline{E}_{\text{ав}_x}$ равна до аварийному значению, поэтому с учетом выражений (4.9) и (4.10) приходим к соотношению:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{\text{пов.1}_\text{ав}} + \underline{U}_{\text{пов.1}_n} = l_x \cdot \left(\underline{I}_{x_{\text{пов.2.з}_\text{ав}}} + \underline{I}_{x_{\text{неп.з}_\text{ав}}} + \underline{I}_{x_{\text{пов.2.з}_n}} + \underline{I}_{x_{\text{неп.з}_n}} \right) \cdot \underline{z}_m + \\ + l_x \cdot \left(\underline{I}_{x_{\text{пов.1.з}_n}} + \underline{I}_{x_{\text{пов.1.з}_\text{ав}}} \right) \cdot \underline{z}_l + \underline{I}_{x_{\text{пов.1.з}_\text{ав}}} \cdot R_{\text{п1}}. \end{aligned} \quad 4.11$$

Выразив из соотношения (4.11) длину линии l_1 получаем формулу для расчета расстояния до места повреждения:

$$l_1 = \frac{\underline{U}_{\text{пов.1}_\text{ав}} + \underline{U}_{\text{пов.1}_n} - \underline{I}_{x_{\text{пов.1.з}_\text{ав}}} \cdot R_{\text{п1}}}{\left(\underline{I}_{x_{\text{пов.2.з}_\text{ав}}} + \underline{I}_{x_{\text{неп.з}_\text{ав}}} + \underline{I}_{x_{\text{пов.2.з}_n}} + \underline{I}_{x_{\text{неп.з}_n}} \right) \cdot \underline{z}_m + \left(\underline{I}_{x_{\text{пов.1.з}_\text{ав}}} + \underline{I}_{x_{\text{пов.1.з}_n}} \right) \cdot \underline{z}_l}. \quad 4.12$$

Влияние активных переходных сопротивлений можно исключить путем выделения реактивной составляющей сопротивления, тогда расстояния до места повреждения определяется соотношением:

$$l_x = \frac{\text{Im} \left(\frac{\underline{U}_{\text{пов.1}_\text{ав}} + \underline{U}_{\text{пов.1}_n}}{\underline{I}_{x_{\text{пов.1.з}_\text{ав}}}} \right)}{\text{Im} \left(\left(\frac{\underline{I}_{x_{\text{пов.2.з}_\text{ав}}}}{\underline{I}_{x_{\text{пов.1.з}_\text{ав}}}} + \frac{\underline{I}_{x_{\text{неп.з}_\text{ав}}}}{\underline{I}_{x_{\text{пов.1.з}_\text{ав}}}} + \frac{\underline{I}_{x_{\text{пов.2.з}_n}}}{\underline{I}_{x_{\text{пов.1.з}_\text{ав}}}} + \frac{\underline{I}_{x_{\text{неп.з}_n}}}{\underline{I}_{x_{\text{пов.1.з}_\text{ав}}}} \right) \cdot \underline{z}_m + \left(\frac{\underline{I}_{x_{\text{пов.1.з}_n}}}{\underline{I}_{x_{\text{пов.1.з}_\text{ав}}} + 1} \right) \cdot \underline{z}_l \right)} \quad 4.13$$

Исследование разработанного метода проводилась в соответствии со схемой замещения, представленной на рисунке 2.5. Для имитации двойных замыканий на землю на разных линиях имитировались замыкания на землю в точках $k1$ и $k2$.

Для анализа преимуществ предложенного алгоритма проводилось сравнение результатов расчета полученных по выражениям (4.13) со значениями, рассчитанным по выражению (2.9), использующих параметры аварийного режима раздел 2.1.

На рисунке 4.12 представлены расчетные зависимости при двойных замыканиях на землю на разных линиях не содержащих ответвлений, полученных с применением чисто аварийной схемы (синие крестики), и по параметрам аварийного режима (красные кружки), (а – для ближней точки; б – для дальней точки повреждения).

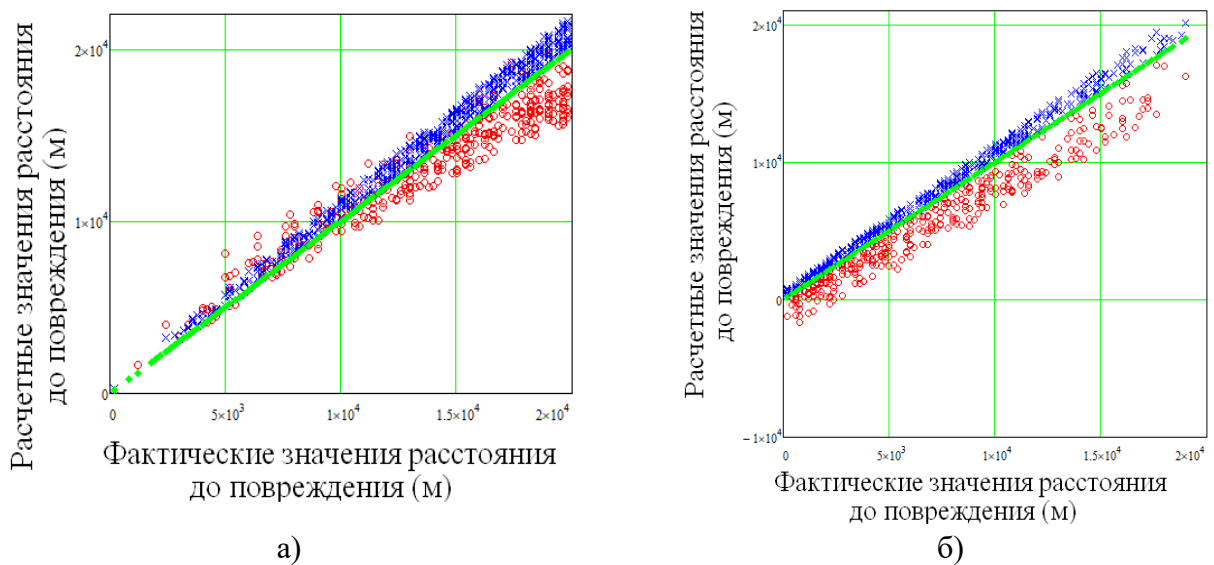


Рисунок 4.12 – Зависимость расчетных расстояний до точек повреждения от фактических при двойных замыканиях на землю на линиях, не содержащих ответвлений

Анализ полученных результатов показывает, что применение чисто аварийного режима позволяет существенно снизить отклонения расчётных расстояний от фактических. По сравнению с алгоритмами, использующими параметры аварийного режима (раздел 2.1), предлагаемый вариант ОМП позволяет снизить максимальное значение относительной погрешности с 26 процентов до 10 для ближней и дальней точек повреждения. Как видно из полученных результатов, в случае применения метода наложения отпадает необходимость предварительного имитационного моделирования для уточнения результатов расчета.

Использование метода наложения позволило сократить необходимую зону обхода для ближней точки повреждения с 26% до 12%, для дальней точки с 26% до 11%, что практически идентично применению поправочных коэффициентов, при этом, в случае применения данного алгоритма, отпадает необходимость предварительного моделирования участка сети. Результаты расчетов зон обхода сведены в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Результаты расчетов зон обхода при ДвЗЗ на одной линии не содержащей ответвлений

		Левая граница зоны обхода, о.е.	Правая граница зоны обхода, о.е.	Протяженность зоны обхода, о.е.	Протяженность зоны обхода, %.
Ближняя точка повреждения	Параметры аварийного режима	-0,0502	0,214	0,2642	26
	Параметры чисто аварийного режима	-0,0073	0,1101	0,1174	12
Дальняя точка повреждения	Параметры аварийного режима	-0,0502	0,214	0,2642	26
	Параметры чисто аварийного режима	-0,0251	0,0861	0,1112	11

Применение данного алгоритма является неплохой альтернативой для линий без ответвлений, в случае отсутствия вычислительных мощностей на устройстве ОМП альтернативой методам, основанным на итерационном уточнении.

Для обоснования преимущества применения разработанного алгоритма ОМП на линиях с ответвлениями, имитировались двойные замыкания на землю, в точках $k7$ (КЗ после ответвления) и $k6$ (КЗ до ответвления) (рисунок 2.5).

Применение метода наложения, при наличии на исследуемой линии ответвлений, позволило снизить относительную погрешность расчета до 10 процентов, вместо 43 для ближней и дальней точки повреждения (рисунок 4.13), где красными кружками обозначены значения, рассчитанные по параметрам аварийного режима, а синими крестиками при использовании метода наложения.

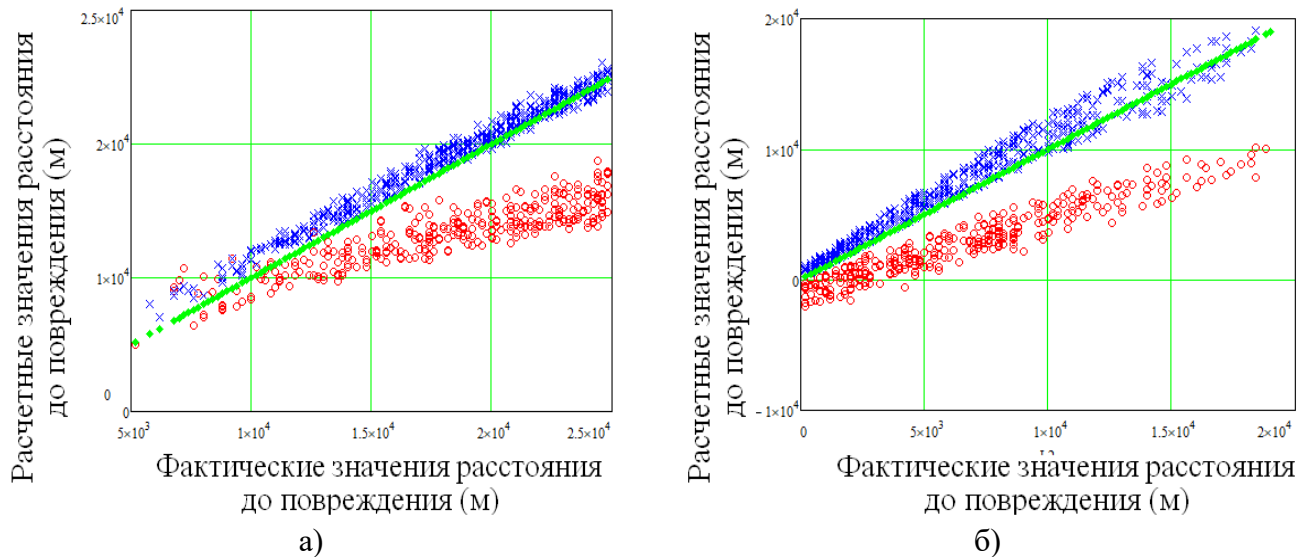


Рисунок 4.13 – Зависимость расчетных расстояний до точек повреждения от фактических при двойных замыканиях на землю на линиях с ответвлениями

Полученный доверительный интервал позволил установить, что в случае использования параметров чисто аварийного режима, удастся получить зону обхода поврежденной линии не превышающую 16% от общей длины, при применении классических алгоритмов зона обхода может достигать 60% от общей протяженности линии. Результаты расчетов сведены в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Результаты расчетов зон обхода при ДвЗЗ на одной линии и наличии ответвления до повреждений

		Левая граница зоны обхода, о.е.	Правая граница зоны обхода, о.е.	Протяженность зоны обхода, о.е.	Протяженность зоны обхода, %.
Ближняя точка повреждения	Параметры аварийного режима	-0,1203	-0,5208	0,641	64
	Параметры чисто аварийного режима	-0,0346	0,1062	0,1408	14
Дальняя точка повреждения	Параметры аварийного режима	-0,0967	0,4157	0,5124	51
	Параметры чисто аварийного режима	-0,00422	0,121	0,163	16

Уменьшение размера ошибок достигается за счет снижения влияния токораспределения на линиях с ответвлениями, а также нагрузочной составляющей при введении чисто аварийного режима.

4.3 Алгоритм определение места повреждения при однофазном замыкании на землю

В случае возникновения ОЗЗ на линиях не содержащих ответвлений, предлагается вести расчет расстояния до места повреждения в соответствии с выражением 3.20, однако, в случае наличия ответвлений данный алгоритм становится не пригодным для использования, в связи с учетом в формуле замкнутых через нагрузку контуров.

При наличии ответвлений, целесообразно использование формулы 4.13 для расчета расстояния. Для изучения возможности применения данной формулы для ОЗЗ, рассмотрим схему замещения, представленную на рисунке 4.14.

Для реализации алгоритма определения места повреждения по параметрам чисто аварийного режима, необходимо применение метода наложения, который подразумевает составление двух схем замещения участка электрической сети для нормального и аварийного режимов.

При составлении схемы замещения для нормального режима, в место предполагаемого КЗ включается фиктивная ветвь ЭДС, значение которой равно доаварийному напряжению в месте повреждения (рисунок 4.14а). Схема замещения аварийного режима напротив не содержит ЭДС в месте предполагаемого КЗ (рисунок 4.14б). Вычитая по законам Кирхгофа из уравнений аварийной схемы, уравнения доаварийного режима, получаем чисто аварийную схему (рисунок 4.14в), которая содержит в неискаженном виде всю необходимую информацию для распознавания повреждения [167].

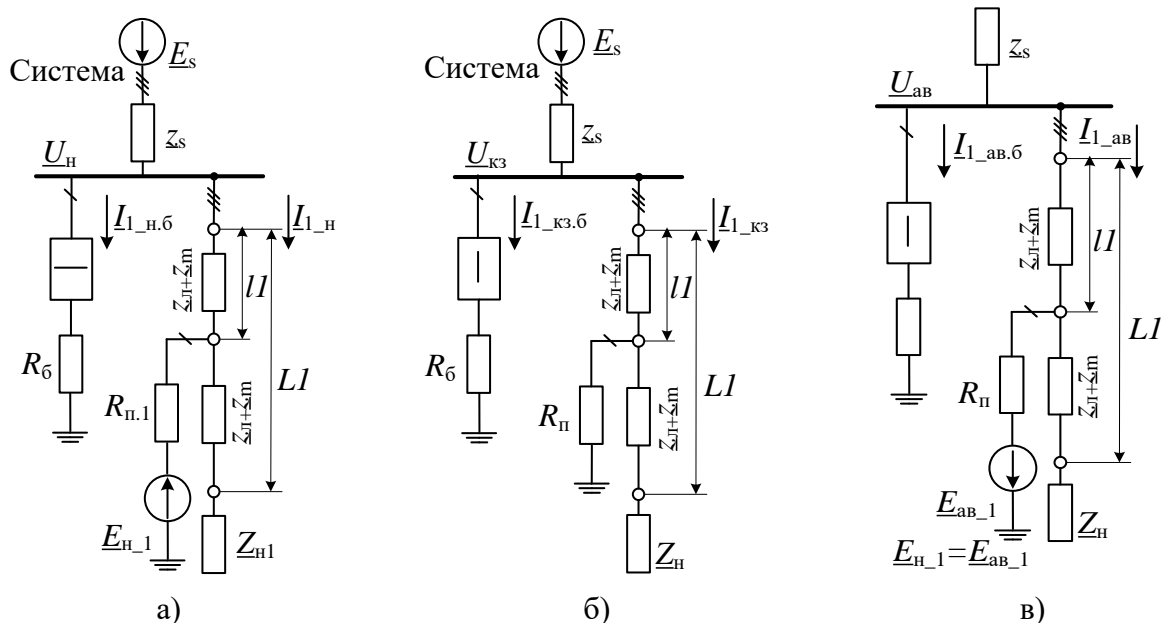


Рисунок 4.14 – Пояснение к применению метода наложения для ОЗЗ на линии

Представим схему замещения для чисто аварийного режима в трехфазном исполнении (рисунок 4.15).

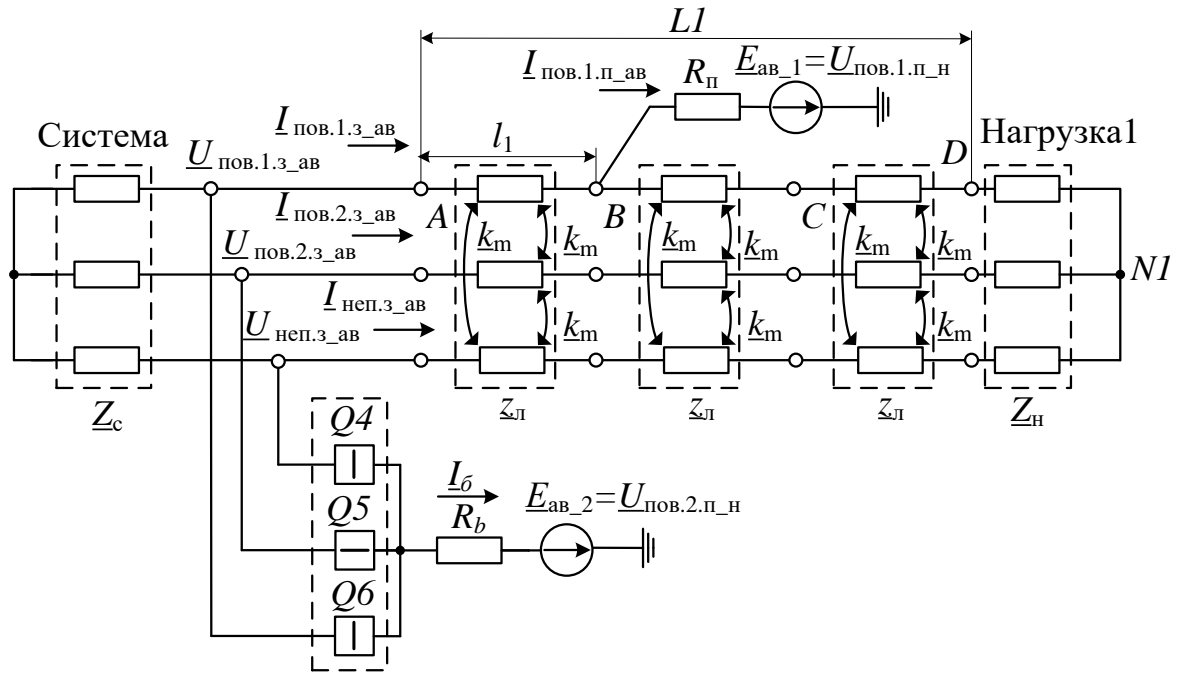


Рисунок 4.15 – Схема замещения чисто аварийного режима в трехфазном исполнении

Анализ схемы, представленной на рисунке 4.15 в фазных координатах, позволяет получить расчетные выражения для определения расстояний до точек повреждения.

Доаварийные напряжения в месте повреждения определяются по выражению:

$$\underline{U}_{\text{пов.1.п}_н} = \underline{U}_{\text{пов.1.3}_н} - \underline{I}_{\text{пов.1.3}_н} \cdot \underline{z}_л \cdot l_1 - (\underline{I}_{\text{пов.2.3}_н} + \underline{I}_{\text{неп.3}_н}) \cdot \underline{z}_м \cdot l_1, \quad 4.14$$

где, l_x – расстояние до места повреждения; z_m – удельное сопротивление взаимной индукции; z_l – удельное сопротивление линии; $\underline{U}_{\text{пов.х.з}_z}$ – фазное напряжение соответствующего режима на шинах; $\underline{I}_{x_{\text{пов.у.з}_z}}$ – ток, протекающий в месте установки защиты; $\underline{I}_{x_{\text{пов.у.п}_z}}$ – ток, протекающий в месте повреждения; индекс «x» обозначает точку повреждения (1 соответствует фазе с ОЗЗ, 2 – фазе замкнутой на балластное сопротивление); индекс «z» соответствует режиму (н – нормальный режим, кз – аварийный режим, ав – чисто аварийный режим).

В случае применения чисто аварийной схемы (рисунок 4.15), влияние нагрузочной составляющей снижается. При ОЗЗ ЭДС в месте повреждения определяется по следующему выражению:

В случае применения чисто аварийной схемы, влияние нагрузочной составляющей снижается. Для ближней точки повреждения, напряжение поврежденной фазы определяется по следующему выражению:

$$\underline{U}_{\text{пов.1}_ав} = \underline{I}_{\text{пов.1.3}_ав} \cdot \underline{z}_л \cdot l_1 + (\underline{I}_{\text{пов.2.3}_ав} + \underline{I}_{\text{неп.3}_ав}) \cdot \underline{z}_м \cdot l_1 + \underline{I}_{\text{пов.1.п}_ав} \cdot R_{п1} + \underline{E}_{ав_1}. \quad 4.15$$

В соответствие с методом наложения, ЭДС в месте повреждения $\underline{E}_{ав_x}$ равна до аварийному напряжению $\underline{U}_{\text{пов.1.п}_н}$, взятому с обратным знаком, подставив выражение (4.14) в выражение (4.15) получаем следующее соотношение:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{\text{пов.1_ав}} + \underline{U}_{\text{пов.1_н}} = l_1 \cdot \left(\underline{I}_{\text{пов.2.з.ав}} + \underline{I}_{\text{неп.з.ав}} + \underline{I}_{\text{пов.2.з.н}} + \underline{I}_{\text{неп.з.н}} \right) \cdot \underline{z}_m + \\ l_1 \cdot \left(\underline{I}_{\text{пов.1.з.н}} + \underline{I}_{\text{пов.1.з.ав}} \right) \cdot \underline{z}_л + \underline{I}_{\text{пов.1.з.ав}} \cdot R_{\text{пл}}. \end{aligned} \quad 4.16$$

Выразив из соотношения (4.16) длину линии l_1 получаем формулу для расчета расстояния до места повреждения:

$$l_1 = \frac{\underline{U}_{\text{пов.1_ав}} + \underline{U}_{\text{пов.1_н}} - \underline{I}_{\text{пов.1.з.ав}} \cdot R_{\text{пл}}}{\left(\underline{I}_{\text{пов.2.з.ав}} + \underline{I}_{\text{неп.з.ав}} + \underline{I}_{\text{пов.2.з.н}} + \underline{I}_{\text{неп.з.н}} \right) \cdot \underline{z}_m + \left(\underline{I}_{\text{пов.1.з.ав}} + \underline{I}_{\text{пов.1.з.н}} \right) \cdot \underline{z}_л}. \quad 4.17$$

Как было сказано ранее в разделе 4.1 применение чистоаварийного режима позволяет снизить влияние нагрузки на точность расчета расстояния до повреждения с учетом того, что ток, протекающий через нагрузку одинаков как в нагрузочном, так и аварийном режимах, поэтому значение $\underline{I}_{\text{пов.1.п.ав}} \approx \underline{I}_{\text{пов.1.з.ав}}$.

Поскольку переходное сопротивление, как правило, принимается активным, то его влияние можно исключить за счет рассмотрения только реактивных составляющих, тогда расстояния до места повреждения на первой линии электропередачи определяется соотношением:

$$l_1 = \frac{\text{Im} \left(\frac{\underline{U}_{\text{пов.1_ав}} + \underline{U}_{\text{пов.1_н}}}{\underline{I}_{\text{пов.1.з.ав}}} \right)}{\text{Im} \left(\left(\frac{\underline{I}_{\text{пов.2.з.ав}} + \underline{I}_{\text{неп.з.ав}} + \underline{I}_{\text{пов.2.з.н}} + \underline{I}_{\text{неп.з.н}}}{\underline{I}_{\text{пов.1.з.ав}}} \right) \cdot \underline{z}_m + \left(\frac{\underline{I}_{\text{пов.1.з.ав}} + \underline{I}_{\text{пов.1.з.н}}}{\underline{I}_{\text{пов.1.з.ав}}} \right) \cdot \underline{z}_л \right)}. \quad 4.18$$

Для имитации однофазных замыканий на землю производилось замыкания на землю в точке $k1$ (рисунок 2.5), для имитации кратковременного двойного замыкания на землю рассматривалось короткое замыкание, через балластное сопротивление установленное в ячейку с выключателем КА6.

Для анализа преимуществ, предложенного алгоритма проводилось сравнение результатов полученных по формуле 4.18 со значениями, рассчитанными по выражению 3.20, использующих параметры аварийного режима, раздел 3.1.

Обработка результатов моделирования позволила получить зависимости расчетных расстояний, от фактических значений (рисунок 4.16, 4.17).

На рисунке 4.16 представлены расчетные зависимости при однофазных замыканиях на землю на линиях без ответвлений, с учетом применения метода наложения (синие крестики).

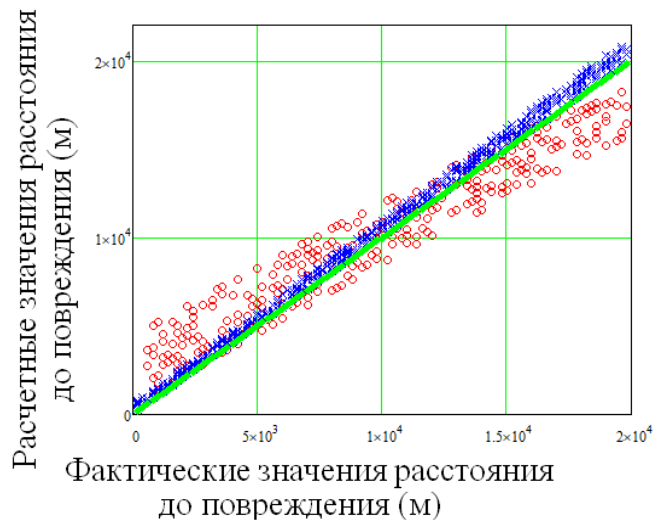


Рисунок 4.16 – Зависимость расчетных расстояний до точки повреждения от фактических при ОЗЗ на линиях без ответвлений

Анализ полученных результатов показывает, что применение чисто аварийного режима позволяет получить максимальное отклонение от расчетных значений не превышающее 7%.

При расчете ОЗЗ по формуле 3.20, с учетом сопротивления нагрузки, зона обхода поврежденной линии не превысила 2% от полной длины линии, а при расчете зоны обхода по параметрам чисто аварийного режима зона не превысила 9%. Результаты расчетов сведены в таблице 4.7.

Таблица 4.7 – Результаты расчетов зон обхода при ОЗЗ.

	Левая граница зоны обхода, о.е.	Правая граница зоны обхода, о.е.	Общая протяженность зоны обхода, о.е.	Общая протяженность зоны обхода, %
Учет сопротивления нагрузки	0,0138	0,0095	0,0234	2
Параметры чисто аварийного режима	-0,019	0,0712	0,0902	9

Как видно из анализа распределения относительной погрешности, применение алгоритма учитывающего сопротивление нагрузки является приоритетным, однако алгоритм основанный на применении метода наложения является альтернативой и может быть применен как на линиях без ответвлений, так и при их наличии.

Для обоснования преимуществ применения разработанного алгоритма ОМП на линиях с ответвлениями, имитировалось два вида однофазных замыканий на землю к4 (КЗ до ответвления, рисунок 4.17а) и в точке к7 (КЗ после ответвления, рисунок 4.17б), в каждом случае для имитации двойного замыкания на землю рассматривалось короткое замыкание через балластное сопротивление, установленное в ячейку с выключателем КАб с пофазным приводом (рисунок 2.5).

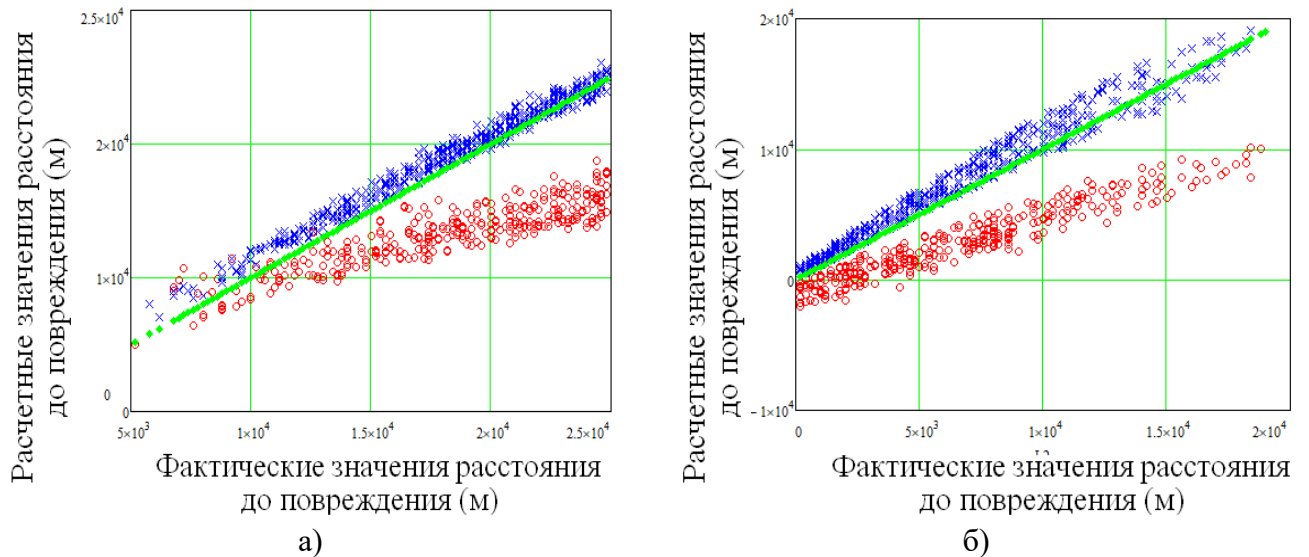


Рисунок 4.17 – Зависимость расчетных расстояний до точек повреждения от фактических при однофазном замыкании на землю на линиях с ответвлениями

Расчитанные по алгоритмам, основанных на использовании параметров аварийного режима, значения при наличии ответвлений на линиях, имеют относительную погрешность, достигающую 50%. Применение чисто аварийного режима в процедуре ОМП, позволяет снизить максимальное значение относительной погрешности расчета расстояния до места повреждения до 10 %. На рисунке 4.17 красными кружками обозначены значения, рассчитанные по параметрам аварийного режима, а синими крестиками, при использовании метода наложения.

Построенный доверительный интервал, для ОЗЗ с ответвлениями до КЗ (точка $k7$ на рисунке 2.5), позволил установить, что при использовании чисто аварийного режима зона обхода поврежденной линии не превышает 14 % от полной длины линии, при этом, применение классических алгоритмов, не целесообразно, т.к. зона обхода может достигать 64%. При наличии ответвления после предполагаемого КЗ (точка $k6$ на рисунке 2.5), зона обхода при использовании метода наложения не превышает 10%, а при использовании аварийного режима составляет 35 % . Результаты расчетов зон обхода сведены в таблице 4.8.

Таблица 4.8 – Результаты расчетов зон обхода при ДвЗЗ на одной линии не содержащей ответвлений

		Левая граница зоны обхода, о.е.	Правая граница зоны обхода, о.е.	Протяженность зоны обхода, о.е.	Протяженность зоны обхода, %.
ОЗЗ после ответвлений	Параметры аварийного режима	-0,1103	-0,5307	0,641	64
	Параметры чисто аварийного режима	-0,0346	0,1062	0,1408	14
ОЗЗ до ответвлений	Параметры аварийного режима	-0,0952	0,2576	0,3528	35
	Параметры чисто аварийного режима	-0,0177	0,0848	0,1025	10

Таким образом, предлагаемые алгоритмы ОМП позволяет с высокой точностью определять расстояния до места возникновения замыканий на землю на линиях электропередачи в сетях с малыми токами замыкания на землю. Результаты имитационного моделирования участка электрической сети показали существенное сокращение ошибки расчета расстояния до места повреждения и соответствующее сокращение зоны обхода линии при ДвЗЗ и ОЗЗ в случае применения метода наложения. Уменьшение размера ошибок достигается за счет снижения влияния токораспределения на линиях с ответвлениями, а также нагрузочной составляющей при введении чисто аварийного режима. Результаты расчетов с учетом применения метода наложения представлены в таблице 4.9.

Таблица 4.9 – Результаты расчета алгоритмов ОМП с учетом чисто аварийной схемы

Вид алгоритма	Погрешность расчета /зона обхода линии		Преимущества
	Линии без ответвлений	Линии с ответвлениями	
ОМП при ДвЗЗ на одной линии	Ближняя точка повреждения: 13% / 16%	Ответвления до повреждений	Ближняя точка повреждения: 14% / 16%
			Дальняя точка повреждения: 10% / 14%
	Дальняя точка повреждения: 13% / 12%	Ответвления между повреждениями	Ближняя точка повреждения: 16% / 14%
			Дальняя точка повреждения: 17% / 16%
		Ответвления после повреждений	Ближняя точка повреждения: 17% / 16%
			Дальняя точка повреждения: 15% / 18%
ОМП при ДвЗЗ на разных линиях	Ближняя точка повреждения: 10% / 12%	Ответвления до повреждений: 10% / 16%	
	Дальняя точка повреждения: 10% / 11%	Ответвления после повреждений: 10% / 14%	
ОМП при ОЗЗ с кратковременным введением ДвЗЗ	7% / 9%	Ответвление до повреждения: 10% / 16%	
		Ответвления после повреждения: 10% / 14%	

– высокая точность;
– учет сопротивления нагрузки и несимметрии сети;
– снижение влияния нагрузки и ответвлений на точность ОМП.

4.4 Выводы по главе

1. Применение метода наложения при оценке параметров аварийного и нормального режимов при замыканиях на землю позволило получить расчетные соотношения для определения мест повреждений, не зависящие от топологии электрической сети.

2. Предложенный метод позволяет снизить влияние нагрузочного режима и токораспределения на ЛЭП с ответвлениями на точность расчета расстояния до места повреждения, обеспечивая существенное повышение точности определения места повреждения, что ведет к сокращению необходимой зоны обхода поврежденной линии и снижению затрат на проведение ремонтно-восстановительных работ в распределительных электрических сетях с изолированной нейтралью.

3. Обработка результатов имитационных экспериментов показала, что применение метода наложения для ОМП ЛЭП 6–35 кВ позволяет снизить максимальную погрешность расчета при ДвЗЗ до 13% и до 10% при ОЗЗ. Возможность применения разработанных алгоритмов на линиях с ответвлениями позволяет определять расстояние до точки повреждения с максимальной погрешностью, не превышающей 17 %. (таблица 4.9).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Вариантный анализ различных методов определения места повреждения с использованием отечественных и зарубежных источников показал перспективность применения множественного имитационного моделирования с последующей статистической обработкой результатов расчета расстояния до места повреждения воздушных ЛЭП 6–35 кВ.

2. Разработанная методика проведения множественных модельных экспериментов позволила получить набор статистических данных, необходимых для адекватного представления характера распределения погрешностей разрабатываемых методов ОМП ЛЭП 6–35 кВ.

3. Предложенные алгоритмы ОМП ЛЭП 6–35 кВ при двойных замыканиях на землю по сравнению с известными техническими решениями позволили сократить ошибку расчета расстояния с 27% до 15 %, а дополнительное введение итерационных процедур обеспечило уменьшение ошибки до 3% и устранение зависимости от изменяющегося переходного сопротивления и несимметрии электрической сети.

4. Алгоритмы ОМП воздушных ЛЭП при ОЗЗ с использованием кратковременных ДвЗЗ позволяют с высокой точностью определять расстояние до места однофазного замыкания в электрических сетях с изолированной нейтралью за счет использования информации о напряжениях поврежденной и замкнутой через балластное сопротивление фазах. Потенциальная точность ОМП ЛЭП 6–35 кВ при таком техническом решении может достигать 4%.

5. Применение метода наложения при оценке параметров аварийного и нормального режимов при замыканиях на землю позволило получить расчетные соотношения для определения мест повреждений, не зависящие от структуры распределительной электрической сети. Обработка результатов имитационных экспериментов показала, что применение метода наложения для ОМП ЛЭП 6–35 кВ позволяет снизить максимальную погрешность расчета при ДвЗЗ до 13% и до 10% при ОЗЗ. Возможность применения разработанных алгоритмов на линиях с ответвлениями позволяет определять расстояние до точки повреждения с максимальной погрешностью, не превышающей 17 %.

6. Практическая реализация предложенных методов ОМП ЛЭП в распределительных сетях с изолированной нейтралью не представляет технических трудностей и возможна на базе современных терминалов релейной защиты. Применение разработанных алгоритмов совместно с индикаторами обнаружения места повреждения, установленными на ответвлениях, позволит ремонтной бригаде безошибочно определить необходимый маршрут.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шуин, В.А. Защиты от замыканий на землю в электрических сетях 6–10 кВ // В.А. Шуин, А.В. Гусенков – М.: НТФ «Энергопрогресс», «Энергетик», 2001. – 104 с.
2. Шадрикова, Т. Ю. Разработка комплексной многофункциональной защиты от однофазных замыканий на землю кабельных сетей 6–10 кВ: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02 / Татьяна Юрьевны Шадрикова – Иваново, ИГЭУ, 2016.
3. Петрухин, А.А. Совершенствование методов и технических средств определения мест повреждений воздушных ЛЭП 6–35 кВ на основе активного зондирования: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02 / Петрухин Андрей Алексеевич – Иваново, ИГЭУ, 2009. – 176 с.
4. Лачугин, В.Ф. Определение мест повреждений воздушных линий высокого напряжения с использованием спутниковой связи. волновой метод двусторонних синхронизированных измерений / В.Ф.Лачугин, Д.И.Панфилов, А.Н.Смирнов, П.С.Платонов // Энергия единой сети. – 2017. – № 2 (31). – С. 30–41.
5. Правила устройства электроустановок (ПУЭ). 7-е издание. [Утверждены приказом Минэнерго Российской Федерации от 08.07.2002. № 204]. – М.: Омега-Л, 2012. – 272 с.
6. Лихачев, Ф.А, Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией емкостных токов / Ф.А. Лихачев – М.: Энергия, 1971. – 152 с.
7. Айзенфельд, А.И. Методы определения мест короткого замыкания на воздушных линиях электропередачи при помощи фиксирующих приборов / А.И. Айзенфельд. – М.: Энергия, 1974. – 80 с.
8. Айзенфельд, А.И, Шалыт Г.М. Определение мест короткого замыкания на линиях с ответвлениями / А.И Айзенфельд, Г.М. Шалыт. – М.: Энергия, 1977. – 208 с.
9. Аржанников, Е. А. Методы и приборы определения мест повреждения на линиях электропередачи / Е. А. Аржанников, А.М. Чухин. – М.: НТФ «Энергопресс», 1998
10. Аржанников, Е. А. Определение места короткого замыкания на высоковольтных линиях электропередачи / Е. А. Аржанников, В. Ю. Лукоянов, М. Ш. Мисриханов; под ред. В. А. Шуина. – М.: Энергоатомиздат, 2003. – 272 с.
11. Висящев, А.Н. Приборы и методы определения места повреждения на линиях электропередачи: учеб. пособие. / А.Н. Висящев. – Иркутск: ИрГТУ. 2001.
12. Куликов, А.Л. Дистанционное определение мест повреждений ЛЭП методами активного зондирования: монография / А.Л. Куликов. – Москва: М.: Энергоатомиздат, 2006.
13. Куликов, А.Л. Цифровое дистанционное определение мест повреждений ЛЭП. / А.Л. Куликов, под ред. М.Ш. Мисриханова. – Н. Новгород: Изв. Волго-Вятской академии гос. службы, 2006. – 315 с.

14. Силаев, Ю.М. Способы и средства поиска повреждений в электросетях 6–35 кВ / Ю.М. Силаев // М.: Информэнерго, 1973.
15. Концепция развития релейной защиты и автоматики электросетевого комплекса. Приложение №1 к протоколу Правления ОАО «Россети» от 22.06.2015 № 356пр
16. Положение ПАО «Россети» «О единой технической политике в электросетевом комплексе» Москва, 2017 г.
17. Технические требования к микропроцессорным устройствам РЗА // СТО ПАО «ФСК ЕЭС» 56947007 – 29.120.70.241 – 2017.
18. Арцишевский, Я.Л. Определение мест повреждения линий электропередачи в сетях с изолированной нейтралью /Я. Л. Арцишевский // М: Высш. Шк., 1988. – 94 с.
19. Арцишевский, Я.Л. Разработка метода комплексного использования средств определения мест повреждений для повышения надежности электрических сетей ЕНЭС: отчет о НИР, М.,2008. – 191 с.
20. Арцишевский, Я.Л., Серегина Т.А. Состояние и перспективы развития средств определения мест повреждения на ВЛ 110–750 кВ. / Я.Л. Арцишевский, Т.А. Серегина // Энергоэксперт. № 4, 2008. с. 74–77.
21. Арцишевский, Я.Л., Комплекс средств ОМП для ускорения аварийного ремонта межгосударственных ВЛ стран СНГ /Я. Л. Арцишевский// МЭИ (ТУ). – М.: 2009 г.
22. Шалыт, Г.М. Определение мест повреждения в электрических сетях / Г.М. Шалыт. – М.: Энергоиздат, 1982. – 312 с.
23. Гриб, О. Г. Автоматизированные методы и средства определения мест повреждения линий электропередачи / О.Г. Гриб, А.А. Светелик, Г.А. Сендерович, Д.Н. Калужный. Под общей редакцией О.Г. Гриба. – Харьков: ХГАГХ, 2003. – 146с.
24. Абрамочкина, Л. В. Повышение точности определения места повреждения воздушных линий электропередачи по параметрам предаварийного и аварийного режимов: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02 / Абрамочкина Людмила Владимировна – Томск, НИТПУ, 2016.
25. Павлов, А.О. Информационные аспекты распознавания коротких замыканий в линиях электропередачи в приложении к защите дальнего резервирования: автореф. дис. ... к-та техн. наук: 05.14.02/ Павлов Александр Олегович. – Чебоксары, 2002.
26. Подшивалин, А. Н. Метод информационного анализа и его приложения к определению места повреждения и дистанционной защите линий электропередачи: автореф. дис. ... к-та техн. наук: 05.14.02 / Подшивалин Андрей Николаевич. – Чебоксары, 2005.
27. Обалин, М. Д. Применение имитационного моделирования электротехнических комплексов для адаптации алгоритмов определения места повреждения по параметрам

аварийного режима: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03/ Обалин Михаил Дмитриевич – Нижний Новгород, НГТУ, 2016.

28. Шалыт, Г. М. Определение мест повреждения линий электропередачи по параметрам аварийного режима / Г. М. Шалыт, А. И. Айзенфельд, А. С. Малый. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 208 с.

29. Патент Франция № 1532591 Comraque des compteurs /G. Cahen, H. Guyard, M. Sauillard // Промышленная собственность. 1968. – № 28.

30. Куликов, А. Л. Определение места повреждения линии электропередачи по мгновенным значениям осциллограмм аварийных событий/ А.Л. Куликов, И.А. Лукичева // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2016. – № 5. – С. 16–21.

31. Вагапов, Г. В. Повышение эффективности эксплуатации распределительных электрических сетей на основе многопараметрических комплексов распознавания однофазных замыканий на землю и гололедообразований на проводах и грозозащитных тросах: дис. ... докт. техн. наук: 05.09.03/ Вагапов Георгий Валериянович – Казань, КГЭУ, 2022.

32. Бургсдорф, В.В. Открытие дуги большой мощности / В.В. Бургсдорф// Электричество – 1948. – №10. – С.15–23

33. Якимец, И.В. Определение места повреждения в линиях электропередачи на основе измерения потоков мощности. / И.В. Якимец, А.В. Наровлянский, И.А. Иванов – Электричество. – 1999. – № 5. – С. 5–9.

34. Лосев, С.Б. Вычисление электрических величин в несимметричных режимах электрических систем / С.Б. Лосев, А.Б. Чернин. — М.: Энергоатомиздат, 1983. – 526 с.

35. Патент РФ №2586082 G01R 31/08 (2006.01) Способ определения мест замыканий на землю в разных фазах фидера / Лямец Ю.Я., Белянин А. А. Оpubл. 10.06.2016. Бюл. №16.

36. Белянин, А.А. Исследование и разработка средств защиты и локации замыканий на землю фидера распределительной сети: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02 / Белянин Андрей Александрович – Чебоксары, ЧГУ, 2015.

37. Патент РФ №2737234 МПК G01R 31/08 (2020.08). Способ определения мест двойного замыкания на землю в сети с изолированной нейтралью / Убасева М.В, Петров В.С. Наумов В.А, Антонов В.И. Оpubл. 26.11.2020. Бюл. №33.

38. Убасева, М.В. Определение мест двойного замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью / М.В. Убасева, В.С. Петров, В.А. Наумов, В.И. Антонов, А.О. Федоров // Релейная защита и автоматизация. – 2021. –№4. – с. 40–46.

39. Руководство по эксплуатации АИПБ.656122.011 РЭ1. Терминал защиты и автоматики типа «ТОР300». – Чебоксары: ООО «ИЦ «Бреслер», 2015. – 68 с. [Электронный ресурс]. – URL: www.ic-bresler.ru (дата обращения: 20.03.2022).
40. Руководство по эксплуатации АИПБ.656122.006-02 РЭ. Комплектное реле определения места повреждения воздушных линий электропередачи ТОР 100-ЛОК 61. – Чебоксары: ООО «ИЦ «Бреслер», 2013. – 60 с. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.bresler.ru/> (дата обращения: 20.03.2022).
41. Руководство по эксплуатации АИПБ.656122.006-02 РЭ. Микропроцессорное устройство определения места повреждения БРЕСЛЕР-0107.090. – Чебоксары: ООО «НПП «Бреслер», 2015. – 145 с. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.bresler.ru/> (дата обращения: 20.03.2022).
42. Руководство пользователя БРС-0030.01-Д001 ППО. Программный комплекс «WinBres» версия 3 – Чебоксары: НПП «Бреслер», 2011. – 301 с. [Электронный ресурс]. <https://www.bresler.ru/> (дата обращения: 20.03.2022).
43. Патент СССР № 315133 МПК G01R 31/08 (2000.01). Способ определения места однополюсного короткого замыкания линии электропередачи / Шалыт Г.М. Оpubл. 1971.
44. Малый, А.С. Определение мест повреждения воздушных линий электропередачи по параметрам аварийного режима: дис. ... канд. техн. наук: 05.00.00 / Малый Абрам Семенович – Минск, 1969. – 175 с.
45. Малый, А.С. Определение мест повреждения линий электропередачи по параметрам аварийного режима / Малый А.С., Шалыт Г.М., Айзенфельд А.И. // М.: Энергия, – 1972. – 216 с.
46. Патент СССР № 1569752 МПК G01R 31/08 (2000.01). Способ определения расстояния до места двухфазного короткого замыкания / Ванзович Э.П., Саухатас А.-С, С., Гловацкий В.Г., Кузнецов А.П. Оpubл. 07.06.1990.
47. Патент РФ № 2558266 МПК G01R 31/08 (2006.01) Способ определения расстояния до мест замыканий на землю на двух линиях электропередачи в сетях с малыми токами замыкания на землю / Мустафин Р. Г., Хакимзянов Э. Ф., Исаков Р. Г. Оpubл. 27.07.2015г. Бюл. №21
48. Иванов, С.В. Определение мест повреждения двойных замыканий на землю в сетях с изолированной нейтралью / С.В. Иванов, Д.В. Кержаев // Материалы международной конф. «Actual Trends in Development of Power System Protection and Automation», Москва, 2009.
49. Малый, А.С. Определение места замыкания по измерениям с одного конца линии электропередачи // Сборник «Определение мест повреждения воздушных и кабельных линий электропередачи». – М.: Энергия, 1966.
50. Шалыт, Г.М. Определение мест повреждения в электрических сетях: учеб. для вузов. – М.: Энергоиздат, 1982 – 312 с.

51. Гейдерман, Ж.П., О влиянии величины нагрузки на замер расстояния до мест междуфазных коротких замыканий в распределительных сетях 6–10 кВ / Ж.П. Гейдерман, Р.Ф. Стасенко, А.П. Кузнецов // Электрические станции. – 1978. – № 4. с.58–59.
52. Шур, Ю.Б. Определение места замыкания на землю по составляющим повреждения на линиях электропередачи / Ю.Б. Шур, А.Н. Висящев // М.: Энергия, 1964.
53. Stringfield, T. W. Fault Location Methods for Overhead Lines / T. W. Stringfield, D. J. Marihart, R. F. Stevens // AIEE Transactions, Part III. – 1957. – Vol. 76. – P.518–530.
54. Диагностика состояния воздушных линий электропередачи 10–110 кВ в нормальных и аварийных режимах: учебное пособие / А.Н. Висящев. – Иркутск, ИрГТУ, 2012. – 270 с.
55. Приборы и методы определения места повреждения на линиях электропередачи: учебное пособие в 2 ч. Ч. 1 / А.Н. Висящев. – Иркутск, ИрГТУ, 2001. – 188 с.
56. Приборы и методы определения места повреждения на линиях электропередачи: учебное пособие в 2 ч. Ч. 2 / А.Н. Висящев. – Иркутск, ИрГТУ, 2001. – 146 с.
57. Патент РФ 2426998, ПК G01R31/08. Способ определения места повреждения на воздушных линиях электропередачи / Висящев А.Н., Устинов А.А. Оpubл. 20.08.2011. Бюл. №23.
58. Патент РФ 2526095, МПК G01R31/08. Способ определения места повреждения на воздушных линиях электропередачи / Висящев А.Н., Устинов А.А. Оpubл. 20.08.2014. Бюл. №23.
59. Устинов, А. А. Разработка и совершенствование методов определения места повреждения на трехфазных и четырехфазных воздушных линиях электропередачи высокого напряжения: дис. ... к-та техн. наук: 05.14.02 / Устинов Алексей Александрович – Иркутск, Ирниту 2015
60. Патент РФ №2637378 МПК G01R 31/08 (2006.01). Способ дистанционного определения мест однофазного замыкания на землю/ Филатова Г. А., Шуин В. А., Ганджаев Д. И. Оpubл. 04.12.2017. Бюл. №34.
61. Патент РФ №2216749 МПК G01R 31/08 (2000.01) Способ определения расстояния до места однофазного замыкания на землю в распределительных сетях/ Качесов В.Е. Оpubл. 20.11.2003. Бюл. №32.
62. Патент РФ №2499998С1 МПК G01R 31/08 (2006.01) Способ определения дальности до однофазного замыкания на землю в линиях электропередачи / Мустафин Р.Г. Оpubл. 27.11.2013. Бюл. №33.
63. Байбурин, Э.Р. Метод оперативного определения места повреждения электрической сети напряжением 6(10)–35 кВ / Э.Р. Байбурин // Нефтегазовое дело. – 2006.

64. Патент РФ №2305293 МПК G01R 31/08 (2006.01) Способ определения места повреждения электрической сети напряжения 6(10)–35 кВ с изолированной или компенсированной нейтралью / Андрианова Л.П. Байбурин Э.Р. Оpubл. 27.08.2007. Бюл. №24.

65. Патент РФ №2222026 МПК G01R 31/08 (2000.01) Способ определения расстояния до места однофазного замыкания на землю в распределительных сетях / Качесов В.Е. Оpubл. 20.01.2004. Бюл. №2.

66. Киржацких, Е. Р. Дифференциальный метод и устройство контроля возникновения однофазного замыкания на землю и определения его местоположения в воздушных электрических сетях 6-10 кВ с изолированной нейтралью: дис. ... канд. техн. наук: 2.2.8 / Киржацких Елена Ринатовна – Казань, КГЭУ, 2022.

67. Патент РФ №2717697 МПК G01R 31/08 (2006.01) Способ определения места однофазного замыкания на землю в сетях 6–10 кВ с изолированной нейтралью / Козлов В.К. Киржацких Е.Р. Оpubл. 25.03.2020. Бюл. №9.

68. Патент РФ №2308731 МПК G01R 31/08 (2006.01) Способ определения места однофазного замыкания на землю с использованием модели линий электропередачи в аварийном режиме / Андрианова Л.П. Байбурин Э.Р. Оpubл. 20.10.2007. Бюл. №29.

69. Патент РФ №2562931 МПК G01R 31/08 (2006.01) Способ и устройство для определения места замыкания на земля /ЛИ Жун. Оpubл. 10.09.2015. Бюл. №25.

70. Патент РФ №2174690 МПК G01R 31/08 Способ определения поврежденного присоединения и места однофазного замыкания в сети с изолированной нейтралью / Авданин В.В., Никитин К.И., Тупуреин В.Ю. Оpubл. 10.10.2001.

71. Патент РФ №2542745 МПК G01R 31/08 (2006.01) Способ определения места однофазного замыкания фидера на землю / Лямец Ю.Я., Белянин А.А. Оpubл. 27.02.2015. Бюл. №6.

72. Патент РФ №2666169 МПК G01R 31/08 (2006.01) Способ топографического поиска места замыкания на землю в воздушных сетях 10 кВ с изолированной нейтралью / Арцишевский Я.Л., Лхамсурен Э. Оpubл. 06.09.2018. Бюл. №25.

73. Лхамсурэн, Э. Совершенствование технологии поиска замыкания на землю воздушных линий 10кв в сети с изолированной нейтралью: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02 / Лхамсурэн Энхсүх – Москва, МЭИ, 2017.

74. Патент СССР №1478168 МПК G01R 31/08 Способ определения расстояния до места однофазного замыкания на землю в воздушной сети с изолированной нейтралью и устройство для его осуществления / Д.М. Чекарьков. Я.Л. Арцишевский, В.А. Онучин, А.П. Кузнецов, В.Г. Гловацкий, А.И. Селивахин. Оpubл. 07.05.1989. Бюл. №17.

75. Патент РФ №2293342 МПК G01R 31/08 Способ определения места и расстояния до места однофазного замыкания на землю в электрических сетях 6–35 кВ с изолированной или компенсированной нейтралью / Фастунов В.А. Опубл. 02.10.2007. Бюл. №4.

76. Патент СССР №1569753 МПК G01R 31/08 Способ определения расстояния до мест двойных замыканий на землю / Ванзович Э. П., Саухатас А.-С. С. Гловацкий В. Г. Опубл. 07.06.1990. Бюл. № 21

77. Сидоров, С. В. Определение места однофазного замыкания на землю в электрических сетях с изолированной нейтралью: дис. ... канд. техн. наук: 2.4.3 / Киржацких Сидоров Сергей Владимирович – Тюмень, ТИУ, 2023.

78. Аржанников, Е.А. Методы и приборы определения мест повреждения на линиях электропередачи / Е.А. Аржанников, А.М. Чухин. – М.: НТФ "Энергопрогресс", 1998. – 64 с

79. Аржанников, Е.А. Дистанционный принцип в релейной защите и автоматике при замыканиях на землю / Е.А. Аржанников. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 176 с.

80. Повышение эффективности работы энергосистем: Тр. ИГЭУ Вып. 4 / под редакцией В.А. Шуина, М.Ш. Мисриханова – М.: Энергоатомиздат, 2001 – 432 с.

81. Определение места короткого замыкания на высоковольтных линиях электропередачи / Аржанников Е.А., Лукоянов В.Ю., Мисриханов М.Ш. под ред. Шуина, – М.: Энергоатомиздат, 2003 г. – 272 с.

82. Ефремов, В.А. Виды погрешностей ОМП и их влияние на точность замера / В.А. Ефремов // Релейная защита и автоматизация. – 2014. – №2(15).

83. Строгний, Б.С., Оробец Ю.Н., Супруновская Н.И. Методика определения места повреждения ВЛ на базе микропроцессорной системы регистрации. – В кн.: Микропроцессорные системы управления электротехническими объектами. Киев: АН УССР, 1990, ч.1.

84. Рекомендации по вводу в работу и эксплуатации микропроцессорных приборов ОМП типа ИМФ-ЗР. проф., д.т.н. Аржанников, Е.А., инж. Бобров С.Е., вед. инж. Лукоянов В.Ю.

85. Микропроцессорная автоматика и релейная защита электроэнергетических систем : учебное пособие для вузов / А.Ф. Дьяков, Н.И. Овчаренко. – М.: Издательский дом МЭИ, 2008. – 336 с.

86. Фадке, А.Г. Компьютерная релейная защита в энергосистемах / А.Г. Фадке, Д.С. Торп. – 2-е изд., М.: Техносфера, 2019. – 370 с.

87. Лямец, Ю.Я. Обучаемая релейная защита / Ю.Я. Лямец, Д.В. Кержаев // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем: Материалы VII Всероссийской научно-технической конференции — Чебоксары, 2007.— С.185–188.

88. Лямец, Ю.Я. Программный комплекс анализа аварийных процессов и определения места повреждения линии электропередачи / Ю. Я. Лямец, В. А. Ильин, Н. В. Подшивалин // Электричество. – 1996. – № 12. – С. 2–7.
89. Лямец, Ю.Я. Эволюция дистанционной защиты / Ю.Я. Лямец, Г.С. Нудельман, А.О. Павлов // Электричество. – 1999. – №3. – С. 8–15.
90. Описание компонент АРМ СРЗА «Программный комплекс для расчетов электрических величин при повреждениях сети и уставок релейной защиты». – Новосибирск: ПК БРИЗ, 2015 [Электронный ресурс]. www.pk-briz.ru (дата обращения: 15.02.2016).
91. Мартынов, М.В. Исследование и разработка обучаемых модулей микропроцессорных защит линий электропередачи: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02 / Мартынов Михаил Владимирович – Чебоксары. 2014.
92. Шебес, М.Р. Теория линейных электрических цепей в упражнениях и задачах. Учебное пособие для электротехнич. и радиотехнич. специальностей вузов. М., «Высшая школа», 1973. – 656 с.
93. Электрические системы: Электрические сети / В.А. Веников и др.— 2-е изд. перераб. и доп.— М.: Высшая школа, 1998. — 511 с.
94. Папков, Б.В. Токи короткого замыкания в электрических системах / Б.В. Папков. — Нижний Новгород: Типография НГТУ, 2005. — 276 с.
95. Папков, Б.В. Надежность электроснабжения: комплекс учебно-методических материалов / Б.В. Папков. – Нижний Новгород: Нижегород. гос. техн. ун-т. Н. Новгород, 2007, – 210 с.
96. Куликов, А.Л. Совмещение методов симметричных составляющих и двойной записи для повышения надежности цифровой дифференциальной релейной защиты / А.Л. Куликов, Б. В. Папков, В. Ю. Вуколов, А.А. Колесников // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики: Материалы. 90-е заседания Международного научного семинара им. Ю.Н. Руденко. – 2018. – С. 96–105.
97. Вагнер, К. Ф. Метод симметричных составляющих в применении к анализу несимметричных электрических цепей (перевод Л.Е. и М. Е. Сыркиных)/ К. Ф. Вагнер, Р. Д. Эванс. - Ленинград: ККТП Главная Редакция Энергетической Литературы СССР, 1936. – 204 с.
98. Линт, Г.Э. Симметричные составляющие в релейной защите / Г.Э. Линт. — М.: Энергоатомиздат, 1996. – 638 с.
99. Бессонов, Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. – 9-е изд. – М.: «Высшая школа», 1996. – 638 с.
100. Файбисович, Д. Л. Справочник по проектированию электрических сетей / Под ред. Д. Л. Файбисовича. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: ЭНАС, 2012. – 376 с.

101. Гусейнов, А.М. Расчет в фазных координатах несимметричных установившихся режимов в сложных системах / А.М. Гусейнов // Электричество. – 1989. № 3. – С.1–7.
102. Лосев, С.Б. Об использовании фазных координат при расчете сложно-несимметричных режимов / С.Б. Лосев // Электричество. – 1979. – №1. – С. 15–23.
103. Берман, А.П. Расчет несимметричных режимов электрических систем с использованием фазных координат / А.П. Берман // Электричество. – 1985, №12
104. Куликов, А.Л. Анализ реализаций информационного подхода в релейной защите / А.Л. Куликов, Д.И. Бездушный // Релейщик. – 2016. – № 2. – С.28–33
105. Типовая инструкция по ликвидации нарушений в работе распределительных электрических сетей 0,38-20 кВ с воздушными линиями электропередачи // РД 34.20.566 – 1987
106. Типовая инструкция по организациям работ на воздушных линиях электропередач, для определения мест повреждений // СТО ПАО «ФСК ЕЭС» 56947007 – 29.240.55.159 – 2013
107. Вентцель, Е.С. Теория вероятностей / Е.С. Вентцель. – Издание четвертое, стереотипное – М.: Наука, 1969. – 576 с.
108. Кельберт, М. Я. Вероятность и статистика в примерах и задачах: Том II. Марковские цепи как отправная точка теории случайных процессов и их приложения / М.Я. Кельберт, Ю.М. Сухов. – М.: МЦНМО, 2009. – 588 с.
109. Черных, И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink / И.В. Черных. – М.: ДМК Пресс, СПб: Питер, 2008. – 288 с.
110. Куликов, А. Л. Моделирование дифференциальной защиты распределительной сети 35 кВ на основе метода двойной записи в программном комплексе PSCAD / А.Л. Куликов, В. Ю. Вуколов, А.А. Хориков, А.А. Колесников // Состояния и перспективы развития электротехнологии: Сборник научных трудов XIX международной научно-технической конференции. Бенардосовские чтения. – Иваново, 2017. – С. 296–298.
111. Гаврилов, Л.П. Расчет и моделирование линейных электрических цепей с применением ПК: Учебное пособие для студентов машиностроительных вузов / Л.П. Гаврилов, Д.А. Соснин. – М.: Солон-пресс, 2009. – 448 с.
98. Гуревич, Ю. Е. Особенности расчетов режимов в энергорайонах с распределенной генерацией: монография / Ю.Е. Гуревич, П.В. Илюшин. – Нижний Новгород: НИУ РАНХиГС, 2018. – 280 с.
112. Дьяконов, В.П. MATLAB 7.*/R2006/R2007: Самоучитель / В.П. Дьяконов. М.:ДМК Пресс, 2008. – 708 с.
113. Схемы принципиальные электрические распределительных устройств подстанций 35–750 кВ. Типовые решения: СТО 56947007 – 29.240.30.010. – 2008. – М.: ОАО «ФСК ЕЭС», 2007.

114. Шнеерсон, Э.М. Цифровая релейная защита / / Э.М. Шнеерсон. – М.: Энергоатомиздат, 2007. – 549 с.
115. Шнеерсон, Э.М. Дистанционные защиты / Э.М. Шнеерсон. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 448 с.
116. Хакимзянов, Э.Ф. Определение расстояния до места повреждения линий электропередачи при двойных замыканиях на землю / Э.Ф. Хакимзянов [и др.] // Энергетика Татарстана. 2014. № 4. – С. 84–88.
117. Хакимзянов, Э.Ф. Способы определения расстояний до мест повреждений при двойных замыканиях на землю в распределительных сетях среднего напряжения / Э.Ф. Хакимзянов, Р.Г. Мустафин, А.И. Федотов // Материалы докладов научно-практической конференции «Релейная защита и автоматизация энергосистем: новые решения и технологии», 2014.
118. Хакимзянов, Э.Ф. Определение расстояний до мест двойных замыканий на землю на линии электропередачи распределительной сети среднего напряжения / Э.Ф. Хакимзянов, Р.Г. Мустафин, А.И. Федотов // Известия вузов. Проблемы энергетики. – 2015. № 3–4. С.132 – 137.
119. Патент РФ №2666174 МПК G01R 31/08 (2006.01) Способ определения расстояния до мест двойных замыканий на землю на линиях электропередачи в сетях с малыми токами замыкания на землю / Куликов А.Л., Осокин В.Ю., Обалин М.Д., Вуколов В.Ю., Лоскутов А.А. Оpubл. 06.09.2018. Бюл. №25.
120. Куликов, А.Л. Способ определения расстояний до мест двойных замыканий на землю / Куликов А.Л., Осокин В.Ю., Обалин М.Д., Шарафеев Т.Р. // Актуальные проблемы электроэнергетики. – 2018. – С 196–201.
121. Куликов, А.Л. Методы анализа кибератак на энергосистему / Куликов А.Л., Шарафеев Т.Р., Осокин В.Ю. // Актуальные проблемы электроэнергетики. – 2018. – С 207 – 213.
122. Kulikov, A.L. Improving accuracy the fault location on transmission line 6–35 kv for double earth fault / A.L. Kulikov, V.J. Osokin, M.D. Obalin // 2018 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). – 2018.
123. Kulikov, A.L. Cyber-Security Problems in Smart Grid. Cyber attacks detecting methods and modelling attack scenarios on electric power systems / A.L. Kulikov, Sharafiev T.R, V.J. Osokin, // 2018 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). – 2018.
124. Патент РФ №2674528 МПК G01R 31/08 (2006.01) Способ определения расстояния до мест замыканий на землю на двух линиях электропередачи в сетях с малыми токами замыкания на землю / Куликов А.Л., Осокин В.Ю., Обалин М.Д., Вуколов В.Ю., Лоскутов А.А. Оpubл. 11.12.2018. Бюл. №35.

125. Куликов, А.Л. Алгоритмы подавления апериодической составляющей в аварийных токах / А.Л. Куликов, В.А. Фальшина, П.А. Колобанов // *Электричество*. — 2014. — №11. — С. 26–35.
126. Куликов, А.Л. Применение имитационного моделирования ЛЭП 6–35 кВ для повышения точности определения расстояния до двойных замыканий на землю / А.Л. Куликов, М.Д. Обалин, В.Ю. Осокин, Т.Р. Шарафеев // *Вестник ИГЭУ*. — 2018. — №1. — С. 40–49.
127. Куликов, А. Л. Комплексные алгоритмы определения места повреждения линии электропередачи на базе статистических методов / А.Л. Куликов, М.Д. Обалин, П.А. Колобанов // *Энергетик*. — 2012. — № 1. — С. 7–9.
128. Куликов, А.Л. Методы обнаружения кибератак и анализа сценариев кибернападений на электроэнергетические системы/ А.Л. Куликов, Т.Р. Шарафеев, В.Ю. Осокин, / *Вестник НГИЭУ*. — 2017. — №10 (77). — С. 53–63.
129. Куликов, А.Л. Сокращение времени восстановления поврежденной линии электропередачи 6–35 кВ при двойных замыканиях на землю с применением итерационных процедур определения места повреждения / А.Л. Куликов, М.Д. Обалин, В.Ю. Осокин // *Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. вып. 69. Надежность развивающихся систем энергетики. В 2-х книгах. отв. ред. Н.И. Воропай. 2018. — Иркутск, 2018. — С. 106–115.*
130. Kulikov, A.L. Recovery time reduction of a damaged 6–35 kV transmission line after double earth fault applying the iteration fault location method / A.L. Kulikov, V.J. Osokin, M.D. Obalin // *E3S Web Conf. Rudenko International Conference «Rudenko International Conference «Methodological problems in reliability study of large energy systems» (RSES 2018)»*. — 2018. — Vol.58.
131. Куликов, А.Л. Повышение точности алгоритмов определения места повреждения ЛЭП 6–35 кВ при двойных замыканиях на землю с помощью введения итерационных процедур/ А.Л. Куликов, В.Ю. Осокин, М.Д. Обалин // *Электроэнергия. Передача и распределение*. — 2019. — №1 (52). — С. 54–59.
132. Гусенков, А.В. Режимы заземления нейтрали и защиты от замыканий на землю, основанные на использовании переходных процессов, в электрических сетях 6–10 кВ / А.В. Гусенков, В.А. Шуин // *Вестник ИГЭУ*. — 2001. — № 1. — С. 32–41.
133. Шуляк, В.Г. Исследование релейных защит от однофазных замыканий на землю в сетях с изолированной нейтралью: автореф. дис. ... канд. техн. наук 05.14.06 / Шуляк Виктор Григорьевич. — Новочеркасск: Новочеркасск. политехн. ин-т, 1968. — 22 с.
134. Горюнов, В. Однофазное замыкание на землю. Можно ли решить проблему? / В. Горюнов // *Новости Электротехники*. — 2017. — 2(104)–3(105). — С. 12–16.

135. Патент РФ №2685746 МПК G01R 31/08 (2006.01) Способ определения места и расстояния до места однофазного замыкания на землю в электрических сетях 6–35 кВ с изолированной или компенсированной нейтралью / Куликов А.Л., Осокин В.Ю., Лоскутов А.А. Оpubл. 23.04.2019. Бюл. №12.

136. Патент РФ №2685747 МПК G01R 31/08 (2006.01) Способ определения места и расстояния до места однофазного замыкания на землю в электрических сетях 6–35 кВ с изолированной или компенсированной нейтралью / Куликов А.Л., Осокин В.Ю., Лоскутов А.А. Оpubл. 23.04.2019. Бюл. №12.

137. Патент РФ №2719278 МПК G01R 31/08 (2006.01) Способ определения места и расстояния до места однофазного замыкания на землю в электрических сетях 6–35 кВ с изолированной или компенсированной нейтралью / Куликов А.Л., Осокин В.Ю., Бездушный Д.И., Лоскутов А.А., Петров А.А. Оpubл. 17.04.2020. Бюл. №11.

138. Патент РФ №2737237 МПК G01R 31/08 (2006.01) Способ определения места и расстояния до места однофазного замыкания на землю в электрических сетях 6–35 кВ с изолированной или компенсированной нейтралью / Куликов А.Л., Осокин В.Ю. Оpubл. 26.11.2020. Бюл. №33.

139. Куликов, А.Л. Определение места повреждения при однофазных замыканиях на землю с использованием кратковременных двойных замыканий / А.Л. Куликов, В.Ю. Осокин, Д.И. Бездушный, А.А. Петров // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. вып. 70. Методические и практические проблемы надежности систем энергетики. В 2-х книгах. отв. ред. Н.И. Воропай. – 2019. – Ташкент, 2019. – С. 35–43.

140. Куликов, А.Л. Применение метода опорных векторов при реализации многомерной релейной защиты / А.Л. Куликов, Д.И. Бездушный, М.В. Шарыгин, В.Ю. Осокин // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. вып. 70. Методические и практические проблемы надежности систем энергетики. В 2-х книгах. отв. ред. Н.И. Воропай. 2019. – Ташкент, 2019. – С. 25–34.

141. Куликов, А.Л. Применение кратковременного двойного замыкания на землю для реализации алгоритма определения места повреждения ЛЭП 6–35 кВ при однофазных замыканиях на землю / А.Л. Куликов, В.Ю. Осокин, Д.И. Бездушный, А.А. Петров // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2020. – №2 (59). – С. 35–41.

142. Куликов, А.Л. Реализация алгоритма определения места повреждения лэп 6–35 кв при однофазных замыканиях на землю с использованием балластного сопротивления / А.Л. Куликов, В.Ю. Осокин // Материалы XV Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2020». Т3. Часть 1. Иваново: Ивановск. Гос. Энерг. ун-т – 2020. – С. 59.

143. Kulikov, A.L. Determining single-phase earth fault location with applying short-term double earth fault / A.L. Kulikov, V.Ju. Osokin, D.I. Bezdushniy // E3S Web Conf. Rudenko International Conference «Methodological problems in reliability study of large energy systems» (RSES 2019). – 2019. – Vol.139.

144. Kulikov, A.L. The support vector machine application in the implementation of multidimensional relay protection / A.L. Kulikov, D.I. Bezdushniy, M.V. Sharygin, V.Yu. Osokin // E3S Web Conf. Rudenko International Conference «Methodological problems in reliability study of large energy systems» (RSES 2019). – 2019. – Vol.139.

145. Руководство по эксплуатации АИПБ.656122.011 РЭ1. Терминал защиты и автоматики типа «ТОР300». – Чебоксары: ООО «ИЦ «Бреслер», 2015. – 68 с. [Электронный ресурс]. URL: <https://relematika.ru> (дата обращения: 20.02.2022).

146. Руководство по эксплуатации ЭКРА.656453.049РЭ. Шкаф дистанционной и токовой защит линии типа ШЭ2607 021021 (версия021_200) «ЭКРА». – Чебоксары: ООО «ЭКРА», 2015. – 161 с. [Электронный ресурс]. URL: www.ekra.ru (дата обращения: 20.02.2022).

147. Руководство пользователя ЭКРА.656132.091Д7. Определение места повреждения. – Чебоксары: ООО «ЭКРА», 2011. – 16 с. [Электронный ресурс]. URL: www.ekra.ru (дата обращения: 20.02.2022).

148. Патент РФ №2746693 МПК G01R 31/52 (2020.01) Способ защиты трехфазной сети с изолированной нейтралью при однофазном замыкании на землю / Арцишевский Я.Л., Лачугин В.Ф., Мунхтулга Д. Опубл. 19.04.2021

149. Патент РФ №2550348 МПК H02H 3/16 (2006.01) Устройство защиты от однофазных замыканий на землю воздушных и кабельных линий распределительных сетей 6–35 кв / Лачугин Я.Л., Иванов С.В., Белянин А.А. Опубл. 10.05.2015. Бюл. №13

150. Иванов, С. В. Информационный анализ линий электропередачи и способов их защиты: автореф. дис. ... к-та техн. наук: 05.14.02/ Иванов Сергей Владимирович. – Чебоксары, 2005.

151. Воронов П. И. Информационные аспекты защиты и локации повреждений электрической сети: автореф. дис. ... к-та техн. наук: 05.14.02/ Воронов Павел Ильич. – Чебоксары, 2015.

152. Руководство по эксплуатации ДИВГ.648228.039-10.02 РЭ. Блок микропроцессорный релейной защиты БМРЗ-156-Д-ОМП-01. – Санкт-Петербург: «НТЦ «Механотроника», 2015 – 39 с. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.mtrele.ru> (дата обращения: 20.02.2022).

153. Передача и распределение электрической энергии: учебное пособие / А.А. Герасименко, В.Т. Федин – Ростов н/Д: Феникс, 2008. – 715 с.

154. Куликов, А.Л. Анализ применения метода опорных векторов в многомерной релейной защите / А.Л. Куликов, Д.И. Бездушный, М.В. Шарыгин, В.Ю. Осокин // Известия РАН. Энергетика. – 2020. – №2. – С. 123–132.

155. Шуин, В.А. Информационные параметры электрических величин переходного процесса для определения места замыкания на землю в распределительных кабельных сетях напряжением 6–10 кВ / В.А. Шуин, Г.А. Филатова, Е.А. Воробьева, Д.И. Ганджаев // Вестник ИГЭУ, 2017, № 2, с. 34–42.

156. Лачугин, В.Ф. Методика и результаты расчета токов и напряжений в цепях измерительного органа устройства защиты линии электропередачи, основанного на контроле переходных процессов / В.Ф. Лачугин, А.Л.Куликов, П.С.Платонов, В.Ю. Вуколов // Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2017. – № 2. – С. 117–127.

157. Колобанов, П. А. Совершенствование дистанционного принципа определения повреждений в электротехнических комплексах с использованием метода наложения: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / Колобанов Петр Алексеевич – Нижний Новгород, НГТУ, 2019.

158. Патент РФ №2750421 МПК G01R 31/08 (2006.01) Способ определения расстояния до мест двойных замыканий на землю на линиях электропередачи в сетях с малыми токами замыкания на землю / Куликов А.Л., Осокин В.Ю., Лоскутов А.А., Севостьянов А.А., Бездушный Д.И. Оpubл. 28.06.2021. Бюл. №19.

159. Патент РФ №2753838 МПК G01R 31/52 (2020.01) Способ определения расстояния до мест замыканий на землю на двух линиях электропередачи в сетях с малыми токами замыкания на землю / Куликов А.Л., Осокин В.Ю., Лоскутов А.А., Севостьянов А.А. Оpubл. 24.08.2021. Бюл. №24.

160. Куликов, А.Л. Исследование возможности применения метода наложения для реализации алгоритмов определения мест повреждений в сетях с изолированной нейтралью / А.Л. Куликов, В.Ю. Осокин, Д.И. Бездушный, А.А. Лоскутов // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. вып. 71. Надежность энергоснабжения потребителей в условиях их цифровизации. В 3-х книгах. отв. ред. Н.И. Воропай. – Казань, 2020. – С. 153–160.

161. Куликов, А.Л. Применение метода k-ближайших соседей в задаче распознавания режимов электрических сетей / А.Л. Куликов, Д.И. Бездушный, В.Ю. Осокин, А.А. Севостьянов // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. вып. 71. Надежность энергоснабжения потребителей в условиях их цифровизации. В 3-х книгах. отв. ред. Н.И. Воропай. – Казань, 2020. – С. 143 – 152.

162. Лоскутов, А.А. Повышение распознаваемости режимов работы интеллектуальных электрических сетей на основе методов машинного обучения / А.А. Лоскутов, П.С. Пелевин,

В.Ю. Осокин, В.Ю. Вуколов // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. вып. 71. Надежность энергоснабжения потребителей в условиях их цифровизации. В 3-х книгах. отв. ред. Н.И. Воропай. – Казань, 2020. – С. 161 – 170.

163. Лоскутов, А.А. Повышение распознаваемости режимов функционирования системы электроснабжения на основе методов машинного обучения / А.А. Лоскутов, М. Метрович, В.Ю. Осокин // Релейная защита и автоматизация. – 2020. – №4(41). – С. 26 – 34.

164. Kulikov, A.L. Research of the possibility of application of the superposition method for implementation of algorithms for determining damage locations in networks with isolated neutral / A.L. Kulikov, V.Ju. Osokin, D.I. Bezdushniy, A.A. Loskutov // E3S Web Conf. Rudenko International Conference «Rudenko International Conference «Methodological problems in reliability study of large energy systems» (RSES 2020)». – 2020. – Vol.216.

165. Kulikov, A.L. K-nearest neighbors algorithm application in the electrical grid states recognition problems / A.L. Kulikov, D.I. Bezdushniy, V.Yu. Osokin, A.A. Sevostyanov // E3S Web Conf. Rudenko International Conference “Rudenko International Conference «Methodological problems in reliability study of large energy systems» (RSES 2020)». – 2020. – Vol.216.

166. Куликов, А.Л. Применение линейного дискриминантного анализа для классификации аварийных режимов электрической сети / А.Л. Куликов, Д.И. Бездушный, В.Ю. Осокин, В.Ю. // Вестник ИГЭУ. – 2020. – №5. – С. 38–47.

167. Куликов, А.Л. Применение метода наложения для решения задачи определения места повреждения в сетях среднего напряжения / А.Л. Куликов, В.Ю. Осокин, Д.И. Бездушный, А.А. Лоскутов // Электричество. – 2021. – №9. – С. 38–44.

168. Куликов, А.Л. Анализ и оценка последствий отключения потребителей электроэнергии / А.Л. Куликов, Б.В. Папков, М.В. Шарыгин // Библиотечка электротехника. – 2014. – № 8 (188). – С. 1–84.

169. Обалин, М.Д. Применение адаптивных процедур в алгоритмах определения места повреждения ЛЭП / М.Д. Обалин, А.Л. Куликов // Промышленная энергетика. – 2013. – № 12. – С. 35–39.

170. Шарыгин, М.В. Обеспечение селективности релейной защиты в системах электроснабжения на основе байесовского метода проверки гипотез / М.В. Шарыгин, А.Л. Куликов // Электричество. – 2017. – № 9. – С. 24–33.

171. Куликов, А.Л. Развитие программного обеспечения для поддержки принятия решения при ликвидации повреждения на линиях электропередачи / А.Л. Куликов, М.Д. Обалин // Известия высших учебных заведений. – Электромеханика. – 2015. – № 2. – С. 70–75.

172. Павленков, М.Н. Методы и модели принятия управленческого решения в экономических системах / М.Н. Павленков М.Н., А.Л. Куликов – Н. Новгород: Изд-во Волго-Вятской академии государственной службы. – 2004. – 322с.
173. Папков, Б.В. Вопросы рыночной электроэнергетики. / Б.В. Папков, А.Л. Куликов – Н. Новгород: Изд-во Волго-Вятской академии государственной службы. – 2005. – 282с.
174. . Куликов, А.Л. Централизованная дифференциальная защита распределительных сельских сетей 6–35 кВ с применением метода двойной записи / А.Л. Куликов А.Л., В.Ю. Вуколов, А.А. Колесников // Вестник НГИЭИ. – 2017. – № 2 (69). – С. 71–81.
175. . Куликов, А.Л. Региональный рынок электрической энергии: формирование и развитие. – Н. Новгород: Изд-во Волго-Вятской академии государственной службы. – 2004. – 318с.
176. Куликов, А.Л. Определение места повреждения линии электропередачи по мгновенным значениям осциллограмм аварийных событий // А.Л. Куликов А.Л., И.А. Лукичева / Вестник ИГЭУ. – 2016. – № 5. – С. 16–21.
177. Куликов, А.Л. Принципы организации релейной защиты в микросетях с объектами распределённого генерирования электроэнергии / А.Л. Куликов А.Л., М.В. Шарыгин, П.В. Илюшин // Электрические станции. – 2019. – № 7 (1056). – С. 50–56.
178. Куликов, А.Л. Алгоритм идентификации поврежденного участка на кабельно-воздушных линиях электропередачи на основе распознавания волновых портретов /А.Л. Куликов, А.А. Лоскутов, П.С. Пелевин // Электричество. – 2018. – № 3. – С. 11–17.
179. Фальшина, В.А. Алгоритмы упрощенной цифровой фильтрации электрических сигналов промышленной частоты / В.А. Фальшина, А.Л. Куликов // Промышленная энергетика. – 2012. – № 5. – С. 39–46.
180. Шарыгин, М.В. Статистические методы распознавания режимов в релейной защите и автоматике сетей электроснабжения / М.В. Шарыгин, А.Л. Куликов // Электрические станции. – 2018. – № 2 (1039). – С. 32–39.
181. Куликов, А.Л. Статистические методы оценки параметров аварийного режима энергорайонов с объектами распределенной генерации / А. Л. Куликов, П.В. Илюшин // Электричество. – 2019. – № 5. – С. 4–11.
182. Куликов, А.Л. Стохастические алгоритмы защит дальнего резервирования распределительных электроустановок потребителей / А.Л. Куликов, А.Н. Клюкин // Промышленная энергетика. – 2012. – № 5. – С. 32–38.
183. Куликов, А.Л. Применение цифровой обработки сигналов в задаче повышения точности ОМП ЛЭП по параметрам аварийного режима // А.Л. Куликов, М.Д. Обалин, В.А. Петрова / Электрические станции. – 2016. – № 4 (1017). – С. 39–44.

184. Куликов, А.Л., Метод имитирования случайного графика нагрузки с заданными параметрами для обучения автоматики электроснабжения / А.Л. Куликов, М.В. Шарыгин, В.Ю. Вуколов // Вестник НГИЭИ. – 2017. – № 3 (70). – С. 40–49.

185. Куликов, А.Л. Применение методов определения места повреждения в цифровой дистанционной защите линии электропередач / А.Л. Куликов, П.А. Колобанов, М.Д. Обалин // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2014. – № 1. – С. 83–87.

186. Куликов, А.Л. Применение статистических критериев распознавания режима релейной защиты сетей электроснабжения / Куликов А.Л., Шарыгин М.В. // Электротехника. – 2019. – № 2. – С. 58–64.

187. Куликов, А.Л. Упрощенные цифровые измерительные органы дистанционной защиты / А.Л. Куликов. П.А Колобанов, В.А. Фальшина // Промышленная энергетика. – 2013. – № 12. – С. 30–35.

188. Руководящие указания по релейной защите. Выпуск 7. Дистанционная защита линий 35–220 кВ [Составлено всесоюзным государственным проектно-изыскательским и научно исследовательским институтом Энергосетьпроект МЭиЭ СССР]. – М.: Энергия, 1966. – 172 с.

189. Федосеев, А. М. Релейная защита электроэнергетических систем: учеб. для вузов / А.М. Федосеев, М.А. Федосеев. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1992, – 528 с.

190. Чернобровов, Н.В. Релейная защита энергетических систем: учебное пособие / Н.В. Чернобровов, В.А. Семенов. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 800 с.

191. Шабад, М. А. Расчеты релейной защиты и автоматики распределительных сетей: монография / М. А. Шабад. – 4-е изд., перераб. и доп. – СПб.: ПЭИПК, 2003. – 350 с.

192. Шабад М.А. Защита и автоматика электрических сетей агропромышленных комплексов. - Л.: Энергоатомиздат, 1987 – 120 с.

193. Андреев, В.А. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения: учебник для вузов / В.А. Андреев. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. Шк., 2006. – 639 с.

194. Бринкис, К. Методика выбора уставок дистанционных защит и токовых защит нулевой последовательности фирмы Siemens в электросети 110 ÷ 220кВ / К. Бринкис. – Рига, 2007. – 96 с.

195. Вуколов В.Ю. Управление конфигурацией распределительных электрических сетей 6–35 кВ / В.Ю. Вуколов, А.А. Колесников, Е.Р. Пнев, Б.В. Папков // Электричество. – 2019. №2. – С.10–17.

196. Куликов А.Л. Централизованная дифференциальная защита распределительных сельских сетей 6–35 кВ с применением метода двойной записи /А.Л. Куликов, В.Ю. Вуколов, А.А. Колесников //Вестник НГИЭУ. –2017. – №2 (69). С.71–81.

197. Колесников, А.А. Особенности сбора и обработки данных для расчета надежности современной релейной защиты / А.А. Колесников, Б.В. Папков // Вестник НГИЭУ. – 2022. – №3 (130). С.50–64.

198. Вуколов, В.Ю. Управление конфигурацией распределительных электрических сетей 6–35 кВ по критерию надёжности / В.Ю. Вуколов, А.А. Колесников, С.Е. Кочеров, Б.В. Папков // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. вып. 69. Надежность развивающихся систем энергетики. В 2-х книгах. отв. ред. Н.И. Воропай. – Иркутск, 2018. – С. 89 – 98.

199. Папков, Б. В. Элементы теории графов в задачах электроэнергетики: учебное пособие / Б. В. Папков, А. Л. Куликов. – Нижний Новгород: НИУ РАНХиГС. – 2019. – 175 с.

200. Яблоков А.А. Физико-математическое моделирование дистанционного определения места повреждения по синхронизированным векторным измерениям / А.А. Яблоков, И.Е. Иванов, А.В. Панащатенко, А.Р. Тычкин, Ф.А. Куликов, А.Ю. Мурзин, В.Ф. Лачугин // Электрические станции. 2022. №3 (1088). С.21–32.

201. Головщиков, В.О. Цифровая подстанция – основной элемент цифровой электроэнергетической системы / В.О. Головщиков // Современные технологии и научно-технический прогресс. – 2019. – №6. – С. 224–225.

202. Алексинский, С.О. Варианты архитектурных решений системы релейной защиты и автоматики Цифровой подстанции 110–220 кВ/ С.О. Алексинский // Вестник ИГЭУ. – 2011. – №.1 – С. 1–5

203. Стандарт организации ПАО «Россети». Цифровая электрическая сеть. Требования к проектированию цифровых распределительных электрических сетей 0,4–220 кВ. СТО 34.01-21-005 – 2019. – М.: ПАО «Россети», 2019 – 96 с.

204. Анкушев, А.В. Переход от традиционных подстанций к цифровым подстанциям с помощью протокола МЭК / А.В. Анкушев, Б.В. Жеребцов, А.С. Кизуров // Сборник статей II Всероссийской (национальной) научно-практической конференции "Современные научно-практические решения в АПК "Государственный аграрный университет Северного Зауралья". – 2018

205. Беляев, Ю.С. Актуальные вопросы определения мест повреждения воздушных линий электропередачи / Ю.С. Беляков // Библиотечка электротехника. – 2010. – №11(143). – С. 1–75.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

ПРИМЕР РЕАЛИЗАЦИИ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ СЕТЕВОГО РАЙОНА

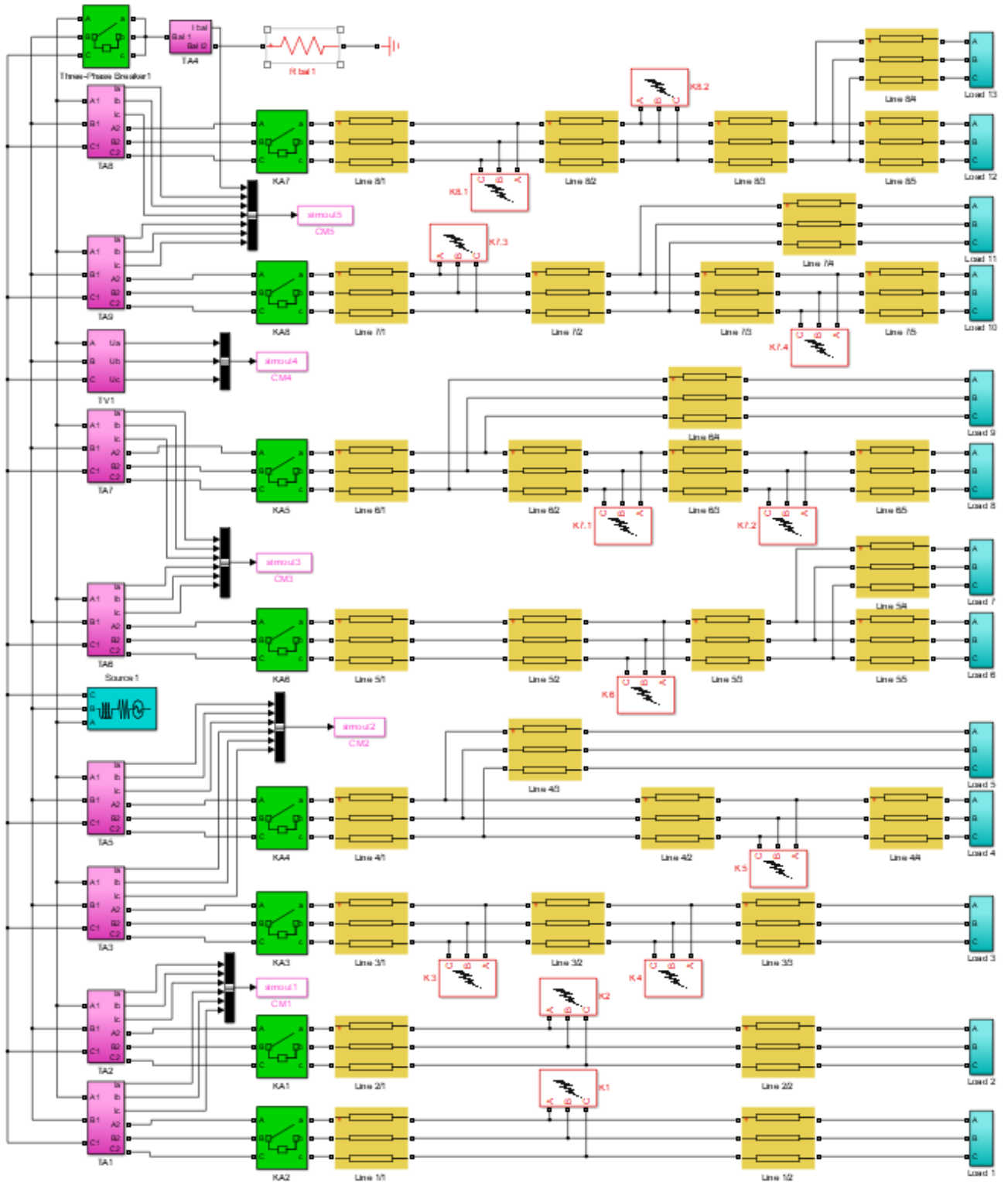


Рисунок А.1 – Имитационная модель сетевого района напряжением 35 кВ с активно-индуктивной нагрузкой

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

РЕЗУЛЬТАТЫ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ И АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2666174

**Способ определения расстояния до мест двойных замыканий
на землю на линиях электропередачи в сетях с малыми
токами замыкания на землю**

Патентообладатель: *федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
"Нижегородский государственный технический
университет им. Р.Е. Алексеева" (НГТУ) (RU)*

Авторы: *см. на обороте*

Заявка № 2017144843

Приоритет изобретения 20 декабря 2017 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 06 сентября 2018 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 20 декабря 2037 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2674528

**Способ определения расстояния до мест замыканий на
землю на двух линиях электропередачи в сетях с малыми
токами замыкания на землю**

Патентообладатель: *федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
"Нижегородский государственный технический
университет им. Р.Е. Алексеева" (НГТУ) (RU)*

Авторы: *см. на обороте*

Заявка № 2017144848

Приоритет изобретения 20 декабря 2017 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 11 декабря 2018 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 20 декабря 2037 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2685746

**Способ определения места и расстояния до места
однофазного замыкания на землю в электрических сетях
6-35 кВ с изолированной или компенсированной нейтралью**

Патентообладатель: *федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
"Нижегородский государственный технический
университет им. Р.Е. Алексева" (НГТУ) (RU)*

Авторы: *Куликов Александр Леопидович (RU), Осокин
Владислав Юрьевич (RU), Лоскутов Антон Алексеевич (RU)*

Заявка № 2018132884

Приоритет изобретения 17 сентября 2018 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 23 апреля 2019 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 17 сентября 2038 г.



*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Г.П. Излиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2685747

**Способ определения места и расстояния до места
однофазного замыкания на землю в электрических сетях
6-35 кВ с изолированной или компенсированной нейтралью**

Патентообладатель: *федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
"Нижегородский государственный технический
университет им. Р.Е. Алексева" (НГТУ) (RU)*

Авторы: *Куликов Александр Леонидович (RU), Осокин
Владислав Юрьевич (RU), Лоскутов Антон Алексеевич (RU)*

Заявка № 2018132894

Приоритет изобретения 17 сентября 2018 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 23 апреля 2019 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 17 сентября 2038 г.



*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2719278

**Способ определения места и расстояния до места
однофазного замыкания на землю в электрических сетях
6-35 кВ с изолированной или компенсированной нейтралью**

Патентообладатель: *федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
"Нижегородский государственный технический
университет им. Р.Е. Алексеева" (НГТУ) (RU)*

Авторы: *см. на обороте*

Заявка № 2019134999

Приоритет изобретения 31 октября 2019 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 17 апреля 2020 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 31 октября 2039 г.



*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2737237

**Способ определения места и расстояния до места
однофазного замыкания на землю в электрических сетях
6-35 кВ с изолированной или компенсированной нейтралью**

Патентообладатель: *федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
"Нижегородский государственный технический
университет им. Р.Е. Алексеева" (НГТУ) (RU)*

Авторы: *Куликов Александр Леонидович (RU),
Осокин Владислав Юрьевич (RU)*

Заявка № 2020115669

Приоритет изобретения 12 мая 2020 г.

Дата государственной регистрации в
Государственном реестре изобретений
Российской Федерации 26 ноября 2020 г.

Срок действия исключительного права
на изобретение истекает 12 мая 2040 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Излиев Г.П. Излиев



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2750421

Способ определения расстояния до мест двойных замыканий на землю на линиях электропередачи в сетях с малыми токами замыкания на землю

Патентообладатель: *федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева" (НГТУ) (RU)*

Авторы: *Куликов Александр Леонидович (RU), Осокин Владислав Юрьевич (RU), Лоскутов Антон Алексеевич (RU), Севостьянов Александр Александрович (RU), Бездушный Дмитрий Игоревич (RU)*

Заявка № 2020142154

Приоритет изобретения 21 декабря 2020 г.

Дата государственной регистрации в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 28 июня 2021 г.

Срок действия исключительного права на изобретение истекает 21 декабря 2040 г.

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

Г.П. Ислиев



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2753838

**Способ определения расстояния до мест замыканий на
землю на двух линиях электропередачи в сетях с
малыми токами замыкания на землю**

Патентообладатель: *федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
"Нижегородский государственный технический
университет им. Р.Е. Алексеева" (НГТУ) (RU)*

Авторы: *Куликов Александр Леонидович (RU), Осокин
Владислав Юрьевич (RU), Лоскутов Антон Алексеевич (RU),
Севостьянов Александр Александрович (RU)*

Заявка № 2020142617

Приоритет изобретения **23 декабря 2020 г.**

Дата государственной регистрации
в Государственном реестре изобретений

Российской Федерации **24 августа 2021 г.**

Срок действия исключительного права
на изобретение истекает **23 декабря 2040 г.**

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Г.П. Иванев



«УТВЕРЖДАЮ»

директор департамента РЗА АО «НИПОМ»

Зинин Владимир Михайлович



«24» апреля 2022 г.

АКТ**о внедрении результатов диссертационной работы****Осокина Владислава Юрьевича на тему**

«Методы повышения точности определения места повреждения воздушных линий электропередачи при замыканиях на землю в сетях с изолированной нейтралью»

Комиссия АО «НИПОМ» в составе директора департамента РЗиА Зинина Владимира Михайловича и руководителя отдела разработки РЗиА Петрова Антона Александровича подтверждает, что результаты диссертационной работы Осокина Владислава Юрьевича были использованы в разработке и производстве терминалов РЗА, в частности:

- разработанная методика проведения множественных модельных экспериментов, позволяющая получить набор статистических данных, используется при отладке разрабатываемых пусковых органов релейной защиты, а также при проведении внутривзаводских функциональных испытаний устройств РЗА;

- предложенная методика использования компонентов нормального режима и выделения чисто аварийной схемы нашла отражение при разработке алгоритмов ОМП в терминале защиты ЛЭП класса напряжения 110-220 кВ.

руководитель отдела разработки РЗА Петров Антон Александрович

Научно-производственное предприятие
«Автоматические Локационные Искатели Мест
Повреждений»



603126, г. Н. Новгород, ул. Родионова, 188 В, кв.32
info@alimp.org ИНН 5260252908 КПП 526001001
Р/счет 40702810700890000711 БИК 049205805
К/счет 30101810000000000805 ПАО «АК Барс» Банк г. Казань

« 11 » марта 2024 г.

АКТ

внедрения результатов кандидатской диссертации

Осокина Владислава Юрьевича

Настоящим актом удостоверяю, что результаты диссертации Осокина Владислава Юрьевича на тему «Методы повышения точности определения места повреждения воздушных линий электропередачи при замыканиях на землю в сетях с изолированной нейтралью», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.2 – «Электротехнические комплексы и системы» используются в научно-исследовательской и производственной практике ООО НПП «АЛИМП».

Имитационные модели, приведенные в работе, используются при генерации осциллограмм для проверки терминалов РЗА.

Материалы диссертационной работы учтены в качестве направлений совершенствования разрабатываемых устройств релейной защиты в части алгоритмов определения места повреждения при замыканиях на землю в сетях 6-35кВ, формирования перспективных пусковых органов, позволяющих с высокой точностью определить расстояния до мест возникновения двойных и однофазных замыканий на землю с возможностью их применения в сетях сложной конфигурации.

Генеральный директор
ООО НПП «АЛИМП»



Терехин А. В.

подпись м.п.

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
 федеральное государственное бюджетное
 образовательное учреждение высшего образования
 «Нижегородский государственный технический
 университет им. Р.Е. Алексеева»



УТВЕРЖДАЮ
 Проректор по образовательной
 деятельности НГТУ

Ивашкин Е.Г.

АКТ

« 5 » февраля 2024 г.

№ _____

г. Нижний Новгород

О внедрении в учебный процесс результатов кандидатской диссертации Осокина В.Ю.


Мы, нижеподписавшиеся, начальник учебного отдела ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева» (НГТУ) Мухина И.В., директор образовательно-научного института электроэнергетики НГТУ, д.т.н., доцент Дарьенков А.Б., заведующий кафедрой «Электроэнергетика, электроснабжение и силовая электроника» НГТУ, к.т.н., доцент Севостьянов А.А., составили настоящий акт о том, что материалы диссертационной работы Осокина В.Ю.: «Методы повышения точности определения места повреждения воздушных линий электропередачи при замыканиях на землю в сетях с изолированной нейтралью» внедрены в учебный процесс кафедры «Электроэнергетика, электроснабжение и силовая электроника» НГТУ.

Материалы диссертационной работы используются при чтении лекций по курсам «Цифровая обработка сигналов», «Релейная защита ЭЭС», «Современная релейная защита» для магистров по направлению 13.04.02 "Электроэнергетика и электротехника" и при выполнении выпускных квалификационных работ.

Начальник учебного
 отдела НГТУ

 Мухина И.В.

Директор образовательно-научного
 института электроэнергетики НГТУ,
 д.т.н., доцент

 Дарьенков А.Б.

Заведующий кафедрой
 «Электроэнергетика,
 электроснабжение и силовая
 электроника» НГТУ, к.т.н., доцент

 Севостьянов А.А.