

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Нижний Новгород

2024

Работа выполнена на кафедре «Электроэнергетика, электроснабжение и силовая электроника» Федерального государственного бюджетного учреждения высшего образования (ФГБОУ ВО) «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева» (НГТУ им. Р.Е. Алексеева)

Научный руководитель: **Куликов Александр Леонидович**
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Электроэнергетика, электроснабжение и силовая электроника» ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», г. Нижний Новгород

Официальные оппоненты: **Лямец Юрий Яковлевич**
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры Теоретических основ электротехники и релейной защиты и автоматики ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова», г. Чебоксары

Вагапов Георгий Валериянович
доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Электрические станции» имени В.К. Шибанова ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», г. Казань

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», г. Иваново

Защита состоится 23 мая 2024 года в 13:00, в аудитории 1313 на заседании диссертационного совета 24.2.345.05 при ФГБОУ ВО «НГТУ им. Р.Е. Алексеева» по адресу: 603155 г. Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24, корпус 1.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим направлять на имя ученого секретаря диссертационного совета 24.2.345.05 по адресу: 603155, Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24, корпус 1.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГБОУ ВО «НГТУ им. Р.Е. Алексеева» (603950, г. Нижний Новгород, ул. Минина, д. 28Б) и на сайте

<http://www.nntu.ru/content/aspirantura-i-doktorantura/dissertacii> .

Автореферат разослан «___» _____ 2024 г.

Ученый секретарь диссертационного совета 24.2.345.05, к.т.н.



Титов Дмитрий Юрьевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. 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 методов, 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., Вагапов Г.В., 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 диссертации 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. Алексева, 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

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».

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы диссертации, отмечен вклад отечественных и зарубежных ученых по теме диссертации, сформулирована цель работы и поставлены задачи исследований, показаны научная новизна и практическая значимость работы, перечислены методы исследования и основные положения, выносимые на защиту, раскрыта структура диссертации.

В первой главе рассматривается классификация основных методов ОМП в сетях среднего напряжения, проводится их анализ для всех разновидностей замыканий на землю.

Проводится анализ и систематизация основных причин возникновения погрешностей ОМП ЛЭП по параметрам аварийного режима, отмечается возможность их компенсации за счет применения статистических методов, учитывающих множество влияющих факторов, а также за счет использования предварительно полученного по результатам имитационного моделирования закона распределения зависимостей расстояний до мест повреждения от фактических значений.

Во второй главе разрабатывается имитационная модель, позволяющая провести серию экспериментов, для дальнейшей проверки работоспособности исследуемых алгоритмов ОМП ЛЭП и набора статистических данных, необходимых для адекватного представления характера распределения погрешностей полученных алгоритмов. Также вторая глава посвящена исследованию ДвЗЗ, в том числе путем создания условий их кратковременного возникновения.

Множественное имитационное моделирование проводилось в соответствии со схемой, представленной на рисунке 1, для ЛЭП с распределенными параметрами, путем набора конфигураций замыканий в программном комплексе *Matlab* с использованием среды моделирования *Simulink*. В среде *Simulink* реализовано динамическое моделирование с составлением схемы замещения электрической сети в виде системы обыкновенных дифференциальных уравнений. Для получения статистической зависимости исследуемых величин сигналов тока и напряжения от места возникновения повреждения ЛЭП, проводилось моделирование серии из пяти тысяч экспериментов, в которых расстояния до мест повреждений

и значения переходного сопротивления задавались произвольным образом из указанного диапазона величин.

В зависимости от взаимного расположения точек рассматривалось два случая ДвЗЗ: на разных линиях, когда место первого повреждения находится на защищаемой линии, а место второго – «за спиной», и когда оба повреждения находятся на одной линии.

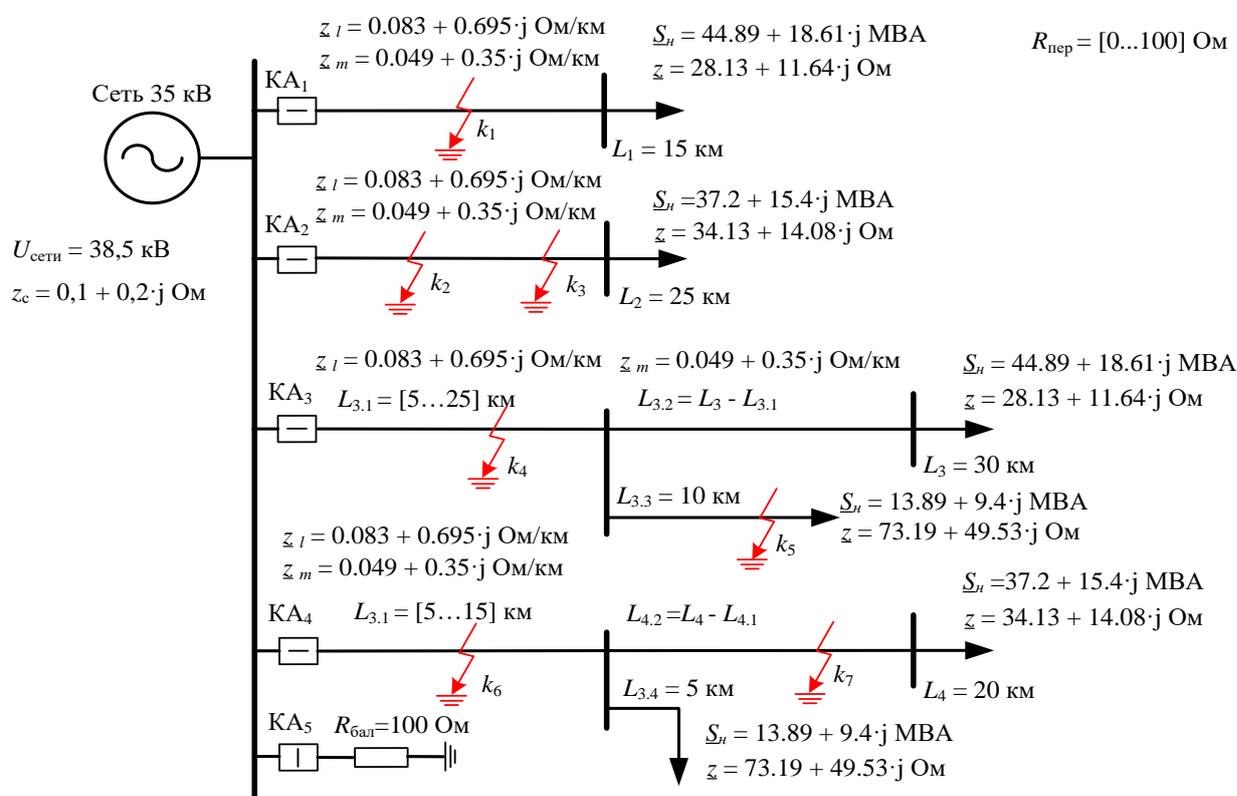


Рисунок 1 – Схема участка электрической сети, используемая при имитационном моделировании

Исследование различных случаев ДвЗЗ в фазных координатах позволило получить расчетные соотношения для определения расстояния до ближней и дальней точек повреждения и разработать соответствующие алгоритмы ОМП ЛЭП при ДвЗЗ на одной и на разных линиях.

На рисунке 2 представлена обобщенная блок-схема алгоритмов ОМП ЛЭП для сетей с изолированной нейтралью, в которой использованы следующие обозначения $U_{\text{пов},y_{\text{кз}}}$ – фазное напряжение соответствующего режима на шинах; $I_{x_{\text{пов}},y_{\text{з}}_{\text{кз}}}$ – ток, в месте установки защиты; $I_{x_{\text{пов}},y_{\text{п}}_{\text{кз}}}$ – ток, в месте повреждения; индекс «x» – обозначает анализируемую линию (1 соответствует линии L_1 , 2 – линии L_2); индекс «y» – указывает фазу (1 – поврежденная фаза анализируемой линии, 2 – поврежденная фаза соседней линии), причем расстояние до ближнего повреждения определяется меньшим значением реактивного сопротивления поврежденных фаз.

Во второй главе рассмотрены два подхода к решению задачи повышения точности ОМП при ДвЗЗ ЛЭП 6–35 кВ. Первый из них подразумевает: множественное имитационное моделирование, получение обучающей выборки, определение критерия для распознавания зависимости погрешности расчета от различных величин и дальнейшую корректировку

предлагаемых алгоритмов ОМП ЛЭП в соответствии с обучающей выборкой.

Идея второго подхода заключается в численном решении систем уравнений, характеризующих аварийный режим, используя итерационное уточнение интересующих параметров, путем учета предыдущих значений.

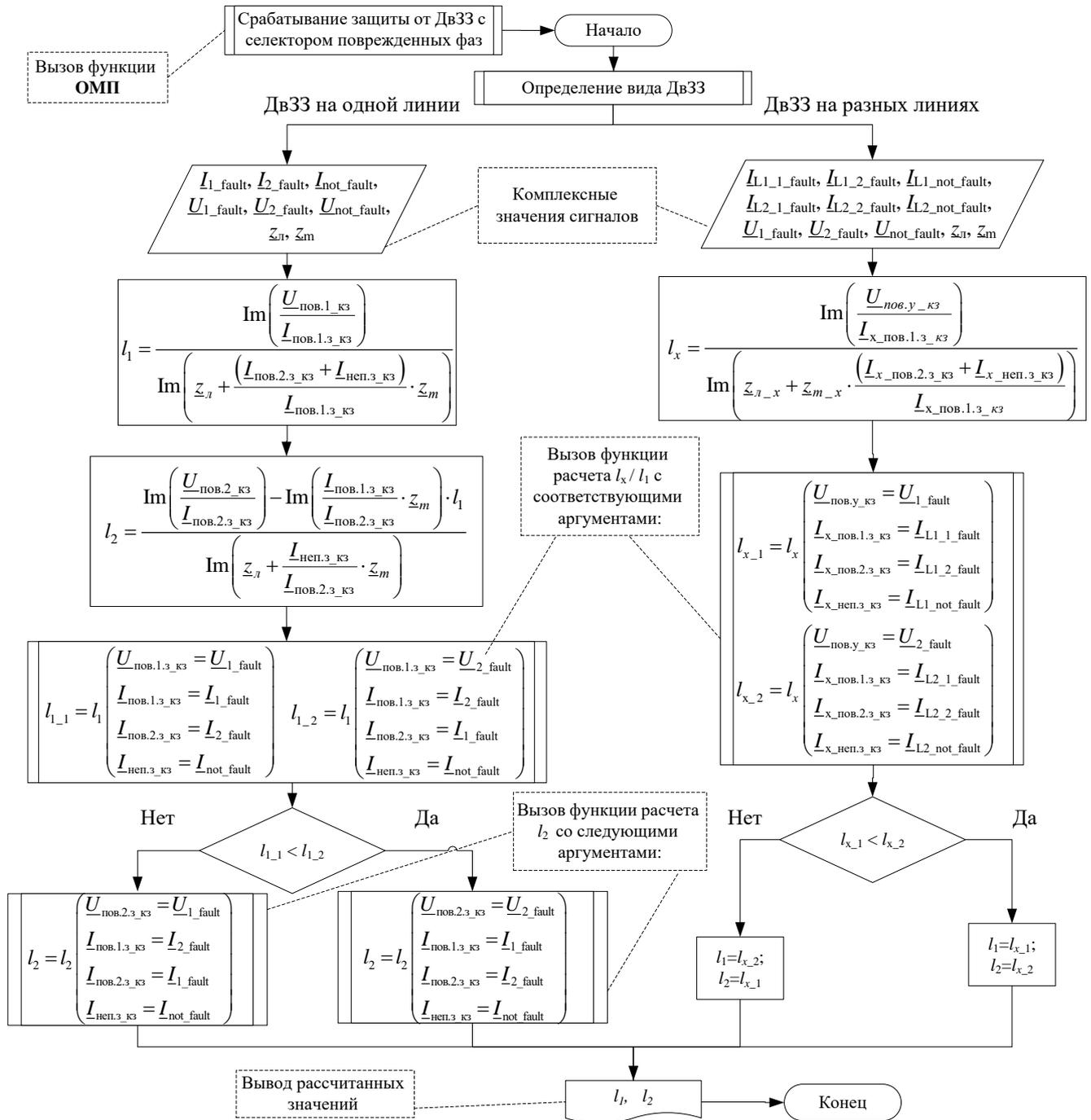
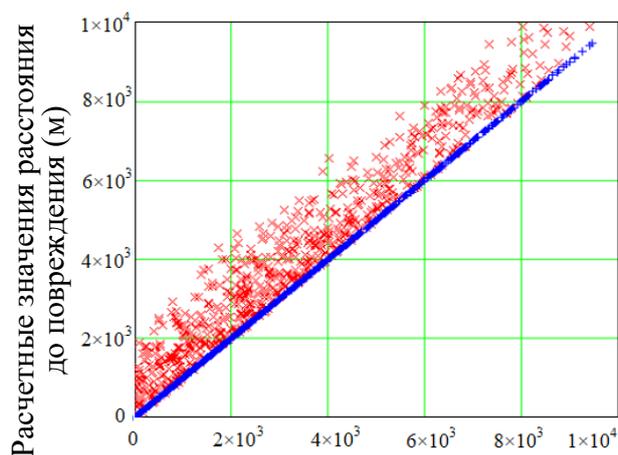


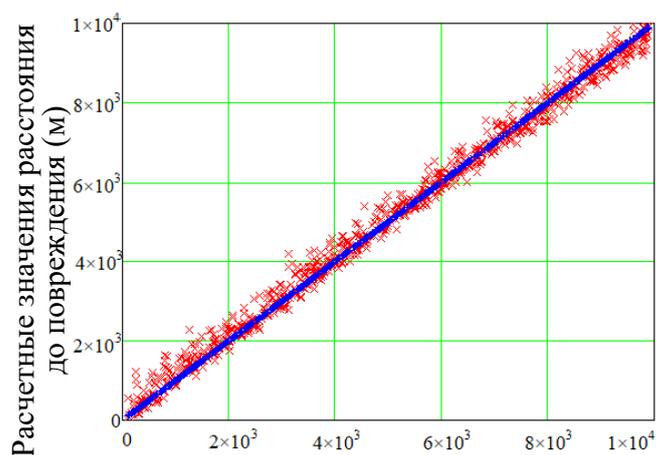
Рисунок 2 – Алгоритм определения места повреждения при ДвЗЗ на одной и на разных линиях

Анализ полученных результатов расчета при ДвЗЗ на разных линиях до и после применения алгоритмов компенсации ошибок ОМП ЛЭП представлен на рисунке 3.



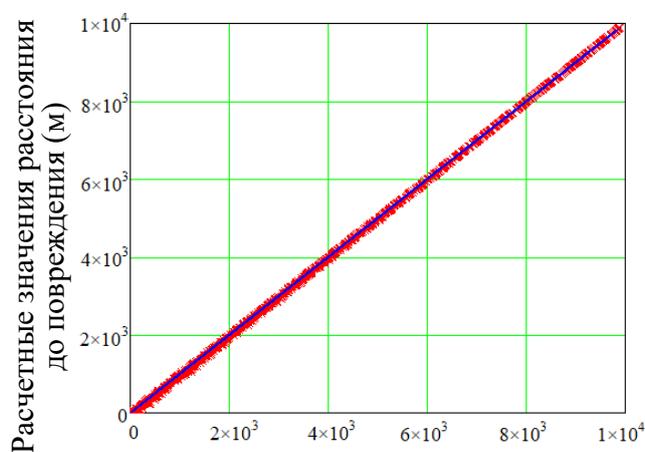
Фактические значения расстояния до повреждения (м)

а) без учета компенсации



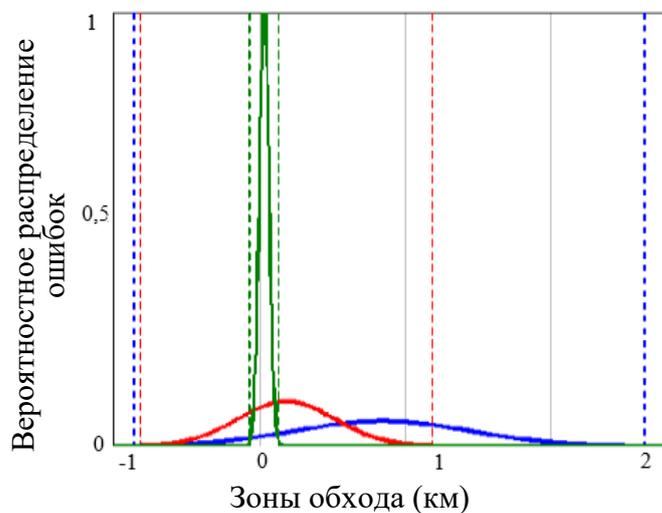
Фактические значения расстояния до повреждения (м)

б) с учетом корректирующего коэффициента



Фактические значения расстояния до повреждения (м)

в) после итерационных процедур



г) вероятностное распределение ошибок в зависимости от используемого алгоритма ОМП

Рисунок 3 – Результаты анализа полученных расчетов при ДвЗЗ на разных линиях до и после использования алгоритмов компенсации ошибок ОМП ЛЭП

Применение статистического имитационного моделирования, с целью определения погрешности разработанных алгоритмов, позволило установить зависимость между значением переходного сопротивления и отклонением расчетных расстояний от фактических значений. Расчетная погрешность устраняется за счет введения корректирующего коэффициента, сформированного по обучающей выборке на основании полученной зависимости, при этом погрешность расчета составляет в самом наихудшем случае не более 15%, вместо 27% (таблица 1). Предлагаемые способы уточнения расстояний, основанные на введении итерационных процедур, позволили точно определить место возникновения повреждения и существенно сократить зону обхода поврежденной линии, независимо от значений переходного сопротивления и несимметрии сети. Погрешность расчетов расстояний до мест повреждения при использовании предложенного метода не превысила 3% (таблица 1).

Таблица 1 – Сводная таблица результатов расчета разработанных алгоритмов ОМП по ПАВ при двойных замыканиях на землю.

| | Вид алгоритма | Погрешность расчета /зона обхода линии | Преимущества | Недостатки |
|--|--|---|--|---|
| Не применимы на линиях с ответвлениями | ОМП при ДвЗЗ на одной линии с использованием метода симметричных составляющих (МСС) | Ближняя точка повреждения: 27% /36% | – простота реализации; – возможность произведения ручного расчета ОМП; | – отсутствие возможности учета несимметрии сети; – низкая точность алгоритма ОМП; – невозможность применения на линиях с ответвлениями |
| | | Дальняя точка повреждения: 17% / 20% | | |
| | ОМП при ДвЗЗ на разных линиях с использованием МСС | Ближняя и дальняя точки повреждения: 16% / 26% | | |
| | ОМП при ДвЗЗ на одной линии с использованием фазных координат | Ближняя точка повреждения: 27% / 36% | – простота реализации; – возможность учета несимметрии сети; – возможность применения различных методов уточнения. | – сложность в ручной реализации; – низкая точность алгоритма ОМП; – невозможность применения на линиях с ответвлениями |
| | | Дальняя точка повреждения: 16% / 20% | | |
| | ОМП при ДвЗЗ на разных линиях с использованием фазных координат | Ближняя и дальняя точка повреждения: 15% / 26% | | |
| | 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 – невозможность применения на линиях с ответвлениями |
| 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 | |

Третья глава посвящена возможности адаптации разработанных алгоритмов ОМП при ДвЗЗ, для решения задачи ОМП при ОЗЗ на ЛЭП 6–35 кВ. Для решения поставленной задачи использовалось кратковременное подключение балластного сопротивления к резервной ячейке секции шин распределительного устройства 6–35 кВ (рисунок 4). В резервной ячейке устанавливается выключатель с пофазным приводом, выводы неподвижной токоведущей части которого замыкаются накоротко между собой и соединяются с землей через балластное сопротивление. При возникновении ОЗЗ проводится коммутация одной из неповрежденных фаз выключателя, обеспечивая кратковременное протекание через балластное сопротивление ограниченного по величине и времени тока короткого замыкания, тем самым имитируя двойное замыкание. После регистрации протекающего через балластное сопротивление тока, выключатель отключается и режим работы сети при ОЗЗ восстанавливается.

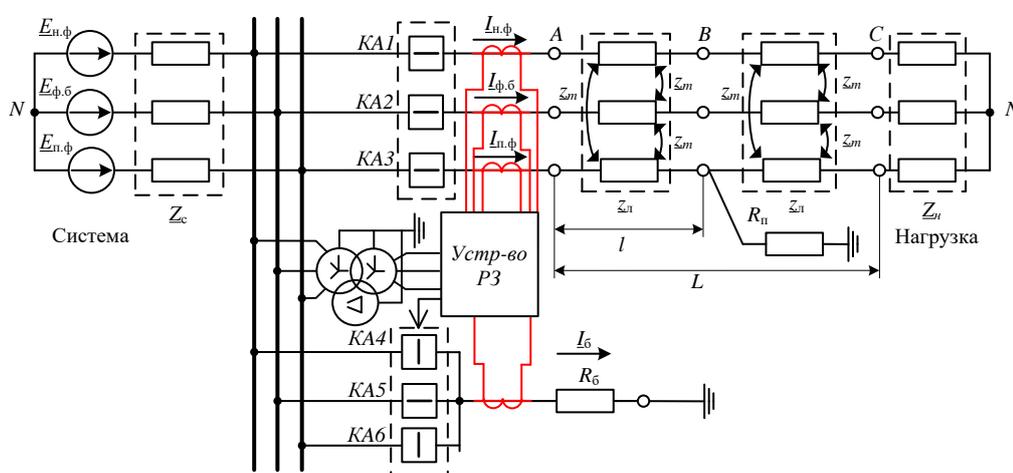


Рисунок 4 – Схема замещения участка электрической сети в режиме ОЗЗ с искусственным введением ДвЗЗ на ЛЭП 6–35 кВ

Кратковременное подключение балластного сопротивления, позволяет осуществить имитацию ДвЗЗ произошедшего на разных линиях 6–35 кВ.

Использование разработанных во второй главе алгоритмов ОМП для замыканий на землю на разных ЛЭП 6–35 кВ позволяет определять расстояние до места ОЗЗ с точностью аналогичной алгоритмам при ДвЗЗ. Было получено расчетное соотношение для более точного ОМП ЛЭП 6–35 кВ, которое не требует осуществления процедуры компенсации ошибки и учитывает в расчетной формуле информацию о величине балластного сопротивления:

$$l = \operatorname{Im} \left[\frac{\left(\underline{I}_{п.ф} + \underline{I}_{б} \right) \cdot \left(\underline{U}_{ф.б} - \underline{U}_{н.ф} \right) + \underline{I}_{ф.б} \cdot \left(\underline{U}_{н.ф} - \underline{U}_{п.ф} \right) + \underline{I}_{н.ф} \cdot \left(\underline{U}_{п.ф} - \underline{U}_{ф.б} \right)}{\underline{I}_{б} \cdot \left(z_m - z_l \right) \cdot \left(\underline{I}_{н.ф} - \underline{I}_{ф.б} \right)} \right], \quad (1)$$

где $\underline{U}_{н.ф}$, $\underline{I}_{н.ф}$ – напряжение и ток неповрежденной фазы; $\underline{U}_{ф.б}$, $\underline{I}_{ф.б}$ – напряжение и ток фазы, замкнутой на балластное сопротивление; $\underline{U}_{п.ф}$, $\underline{I}_{п.ф}$ – напряжение и ток фазы, на которой произошло ОЗЗ; $\underline{I}_{б}$ – ток, протекающий через балластное сопротивление.

Следует заметить, что в ходе формирования итогового соотношения (1), в формуле расчета удалось избавиться от переходного сопротивления. 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 выражения (1) от балластного сопротивления подчеркивает, что его введение необходимо лишь для обеспечения требуемого диапазона фиксации токов и напряжений при кратковременном ДвЗЗ. Реализация разработанного алгоритма представлена на рисунке

5.

Повреждение фиксируется устройством релейной защиты, выявляющем факт возникновения ОЗЗ, осуществляющим функцию избирателя поврежденной фазы и определяющим поврежденный фидер.

Автоматически по факту фиксации замыкания на землю, 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.

Выбор времени протекания и величины тока короткого замыкания определяется параметрами термической стойкости провода ЛЭП. В соответствии с рекомендациями по выбору предельно допустимого тока линии, например, ток не должен превышать 100 А при продолжительности не более 1 сек. Во время протекания тока двойного замыкания проводится регистрация токов и напряжений, необходимых для реализации предложенного метода и в последующем автоматически проводится расчет расстояния до места ОЗЗ ЛЭП.

Метод позволяет с высокой точностью определять расстояние до места ОЗЗ в электрических сетях 6–35 кВ с изолированной нейтралью за счет использования информации о напряжениях поврежденной и замкнутой через балластное сопротивление фазах, а также компенсации влияния нагрузки на точность оценки расстояния до места ОЗЗ путем её учета в соответствующих расчетных выражениях. Результаты расчетов представлены в таблице 1.

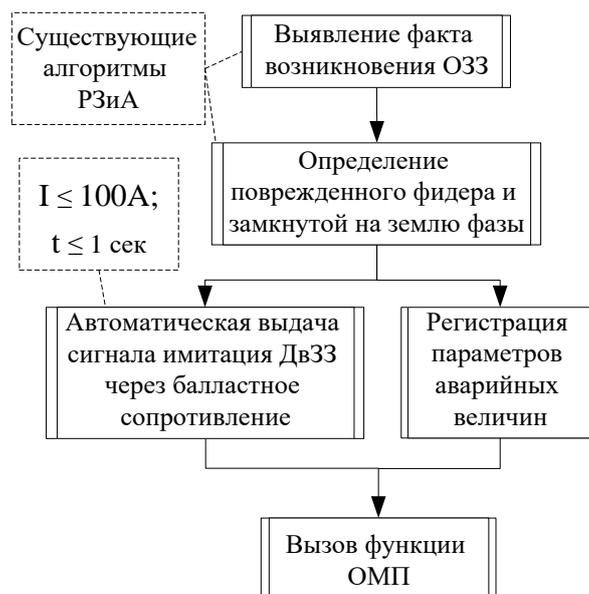


Рисунок 5 – Структурная схема алгоритма определения места повреждения при ОЗЗ

В четвертой главе рассмотрены преимущества применения метода наложения для решения ОМП ЛЭП при двойных и однофазных замыканиях на землю.

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 (рисунок 6).

Фиксация аварийного режима проводится в момент возникновения повреждения. Алгоритмы цифровой обработки сигналов позволяют выделить из аварийного сигнала периодическую составляющую, подавляя как высшие гармоники, так и аperiodическую составляющую.

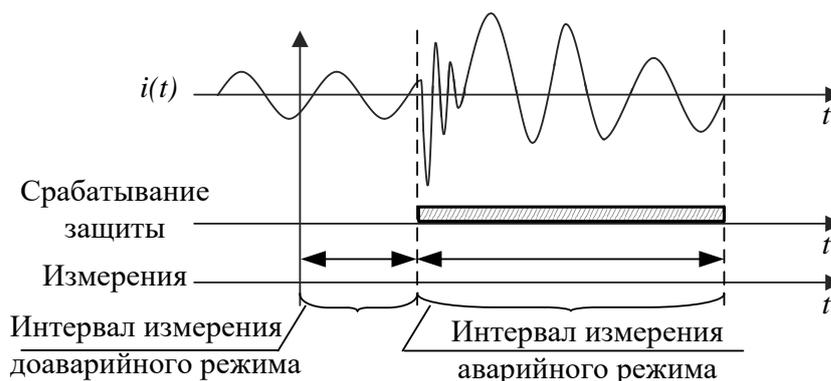


Рисунок 6 – Фиксация предшествующего и аварийного режимов

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. Принцип работы метода поясняется на рисунке 7, на котором наблюдаемая модель системы представлена в виде активных и пассивных (не содержащих источников ЭДС) многополюсников (рисунок 7а).

Для получения чисто аварийной схемы рассматриваются схемы замещения нормального и аварийного режимов. В рассматриваемой схеме замещения нормального режима (рисунок 7б) в место предполагаемого повреждения подключается фиктивная ветвь ЭДС, равная напряжению в точке замыкания и не меняющая токораспределения линии, при этом аварийная схема (рисунок 7в), напротив, не содержит ЭДС в месте предполагаемого КЗ. Вычитая по законам Кирхгофа из уравнений аварийной схемы, уравнения доаварийного режима, получают чисто аварийную схему (рисунок 7г), которая содержит одну ЭДС, расположенную в месте замыкания и представляющую в неискаженном виде всю необходимую информацию для распознавания повреждения.

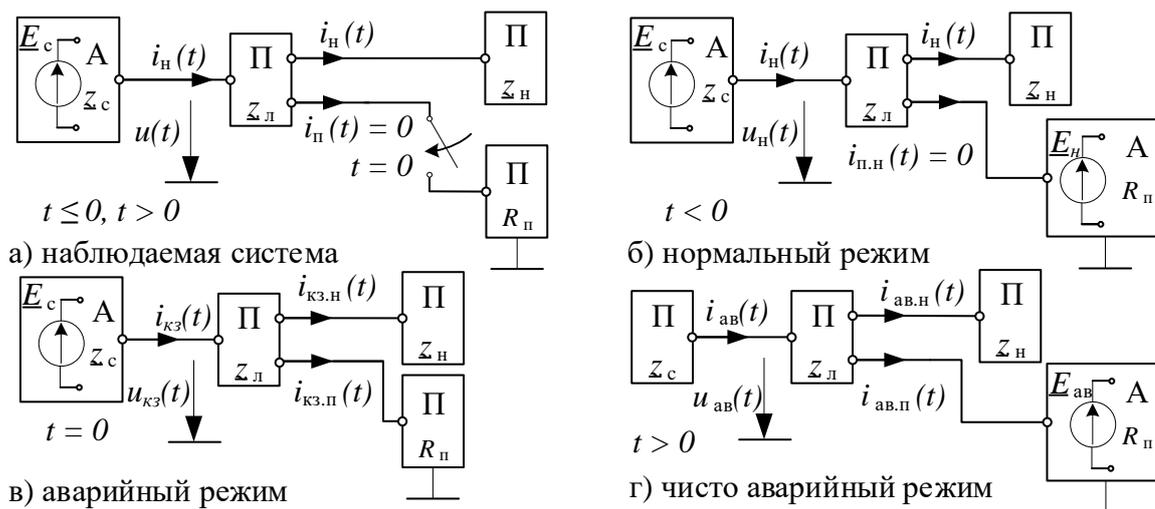


Рисунок 7 – Пояснение к применению метода наложения

Применение метода наложения при оценке параметров аварийного и нормального режимов при замыканиях на землю позволило получить расчетные соотношения для определения мест повреждений ЛЭП, не зависящие от топологии электрической сети. Полученные результаты расчета сведены в таблицу 2.

Таблица 2 – Результаты применения алгоритмов ОМП ЛЭП 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% |
| ОМП при ДвЗЗ на разных линиях | Ближняя точка повреждения: 10% / 12% | Ответвления до повреждений: | 10% / 16% |
| | | | Дальняя точка повреждения: 10% / 11% |
| ОМП при ОЗЗ с кратковременным введением ДвЗЗ | 7% / 9% | Ответвление до повреждения: 10% / 16% | |
| | | Ответвления после повреждения: 10% / 14% | |

Для обоснования преимуществ использования чисто аварийного режима имитировались замыкания на землю на линиях различной конфигурации. Обработка результатов показала, что полученные соотношения позволяют существенно снизить отклонения расчетных расстояний от фактических значений и определять расстояния до места повреждения даже на линиях, содержащих ответвления.

Применение разработанных алгоритмов совместно с индикаторами обнаружения места повреждения, установленными на ответвлениях, позволит ремонтной бригаде безошибочно выбрать необходимый маршрут при движении к месту повреждения. Уменьшение величины ошибок ОМП ЛЭП достигается за счет снижения влияния токораспределения на линиях с ответвлениями, а также нагрузочной составляющей при введении чисто аварийного режима.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Вариантный анализ различных методов ОМП с использованием отечественных и зарубежных источников показал перспективность применения множественного имитационного моделирования с последующей статистической обработкой результатов расчета расстояний до 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.

3. Предложенные алгоритмы ОМП ЛЭП 6–35 кВ при ДвЗЗ 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 замыкания в электрической сети с изолированной нейтралью за счет использования информации о напряжениях поврежденной и замкнутой через балластное сопротивление фазах. Потенциальная ошибка ОМП ЛЭП 6–35 кВ при таком техническом решении может быть не более 4%.

5. Применение метода наложения при оценке параметров аварийного и нормального режимов при замыканиях на землю позволило получить расчетные соотношения для ОМП, не зависящие от структуры распределительной электрической сети. Обработка результатов имитационных экспериментов показала, что применение метода наложения для ОМП ЛЭП 6–35 кВ позволяет до 2,5 раз снизить погрешность расчета. 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 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 поврежденный участок сети и построить необходимый маршрут.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях перечня ВАК:

1. 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.
2. 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.
3. 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. 36–41.
4. 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.
5. 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.
6. Куликов, А.Л. Применение линейного дискриминантного анализа для классификации аварийных режимов электрической сети / А.Л. Куликов, Д.И. Бездушный, **В.Ю. Осокин** // Вестник ИГЭУ. – 2020. – №5. – С. 38–47.
7. 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.
8. Лоскутов, А.А. Повышение распознаваемости режимов функционирования системы электроснабжения на основе методов машинного обучения / А.А. Лоскутов, М. Митрович, **В.Ю. Осокин** // Релейная защита и автоматизация – 2020. – № 4(41). – С.26–34.
9. Куликов А.Л. Определение местоположения двойных замыканий на землю в распределительных сетях с изолированной нейтралью / А.Л. Куликов, **В.Ю. Осокин** // Интеллектуальная Электротехника. 2024. – № 1. С. 58-69.

В изданиях Scopus:

10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. 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.
14. 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.
15. 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.
16. 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.

Патенты:

17. 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. Опубл. 06.09.2018.Бюл. №25.
18. 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

19. 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.

20. 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.

21. 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.

22. 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.

23. 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.

24. 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.

Публикации в других изданиях:

25. 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.

26. 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. – Иркутск, 2018. – С. 106–115.

27. Куликов, А.Л. Методы анализа кибернападений на энергосистему / Куликов А.Л., Шарафеев Т.Р., **Осокин В.Ю.** // Актуальные проблемы электроэнергетики. – 2018.–С 207–213.
28. 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. – Ташкент, 2019. – С. 35–43.
29. 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. – Ташкент, 2019. – С. 25–34.
30. 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.
31. 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.
32. 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.
33. 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.