На правах рукописи

УБАСЕВА Мария Витальевна

ЦИФРОВОЕ УСТРОЙСТВО ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА ПОВРЕЖДЕНИЯ ЛЭП НА ОСНОВЕ МОДЕЛЕЙ С ГЕТЕРОГЕННОЙ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СТРУКТУРОЙ

Специальность 2.4.3. Электроэнергетика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Чебоксары – 2024

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

Научный руководитель:	доктор технических наук, профессор **Антонов Владислав Иванович**
Официальные оппоненты:	**Лачугин Владимир Федорович,** доктор технических наук, старший научный сотрудник, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ», кафедра релейной защиты и автоматизации энергосистем, профессор **Ермаков Константин Игоревич,** кандидат технических наук, общество с ограниченной ответственностью «НПП Бреслер», сектор определения места повреждения, регистрации аварийных событий, заведующий сектором
Ведущая организация:	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева», г. Нижний Новгород

Защита диссертации состоится 19 декабря 2024 г. в 14.00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.434.04 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова» по адресу г. Чебоксары, ул. Университетская, д. 38, учебный корпус 3, зал заседаний Ученого совета, к. 301.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова» (428034, г. Чебоксары, ул. Университетская, д. 38, корпус 3, (8352) 45-02-07, library@chuvsu.ru) и на сайте www.chuvsu.ru.

Автореферат разослан 18 октября 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.434.04
к.т.н., доцент Г.В. Малинин

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Оперативное определение места повреждения (ОМП) является одной из важнейших задач обеспечения надежности и энергоэффективности электросетевого комплекса, поскольку существенно сокращает время нахождения линии электропередачи в ремонте после ее аварийного отключения.

Несмотря на то, что сегодня в автоматике электрических сетей известны примеры применения новых устройств ОМП, основанных на волновых методах, задача совершенствования алгоритмов ОМП по параметрам аварийного режима все еще остается актуальной. Это объясняется тем обстоятельством, что для волновых ОМП требуется дорогостоящее оборудование для высокочастотных измерений и синхронизации по времени.

Большинство алгоритмов ОМП по параметрам аварийного режима так или иначе основаны на построении алгоритмических моделей контролируемой ЛЭП. Устоявшаяся практика разработки ОМП подразумевает выполнение основных этапов подготовки устройства для каждой конфигурации сети заново, поскольку математическое и программное обеспечение устройств лишены способности изменять архитектуру программной реализации ОМП. Это существенно повышает трудоемкость разработки.

В диссертационной работе предлагается новый подход к математической и программной реализации ОМП, обладающий универсальностью и независимостью от структуры контролируемой ЛЭП. Предпринятый подход предоставляет программной среде возможность свободно конструировать архитектуру программы ОМП, разворачивая алгоритмическую модель сети в темпе развития процесса определения места повреждения. Кроме того, новый подход к построению моделей позволяет отказаться от эквивалентирования всей электрической сети и унифицировать алгоритмические модели сети для устройств ОМП при одно- и двустороннем наблюдении ЛЭП. Предложенные автором новые целевые функции, устанавливающие выполнение принципа диссипативности для условных мощностей поперечных ветвей места повреждения, обеспечивают работу ОМП и при двусторонних несинхронных измерениях электрических величин на ЛЭП.

При разработке ОМП важно учитывать различие режимов заземления нейтрали в электрических сетях. Сети высокого и сверхвысокого напряжения (110 кВ и выше) работают с заземленной нейтралью, в них регламентируется определение всех видов коротких замыканий, в том числе и КЗ при неуспешном АПВ. В то же время в распределительных сетях, работающих с изолированной нейтралью (6 – 35 кВ), необходимо также и определение мест двойного замыкания, для которого характерно замыкание на землю разноименных фаз ЛЭП в двух разнесенных точках сети. Сформулированное автором генеральное свойство алгоритмических моделей поврежденной электрической сети объясняет единство базиса представления моделей независимо от класса напряжения.

Стремление к универсальности метода определения места повреждения требует решения и многих других научных задач, например, задачи обработки электрических сигналов для сетей с быстродействующими выключателями. Особенностью таких сетей является высокая скорость ликвидации повреждения, благодаря чему отключение поврежденной ЛЭП происходит еще на стадии развития переходного процесса в ней. Следовательно, в осциллограмме интервал аварийного режима содержит составляющие свободного движения электрической системы. Фильтр Фурье, применяемый для цифровой обработки сигналов в существующих устройствах ОМП, имеет значительную погрешность при распознавании сигнала переходного режима, что делает его непригодным для этой цели. Решение данной проблемы автор видит в использовании адаптивного структурного анализа сигналов, методы которого основаны на использовании адаптивных фильтров.

Недавно обнаружилось, что использование адаптивного фильтра с гетерогенной распределенной структурой создает благоприятные условия для распознавания структуры сигнала на небольшой выборке отсчетов благодаря раздельной настройке структурных единиц фильтра. Это значительно улучшает характеристики методов распознавания сигнала в быстродействующих приложениях релейной защиты и автоматики.

В то же время современные системы сбора и долгосрочного хранения информации, реализованные на энергообъектах, концентрируют в себе множество файлов осциллограмм от различных цифровых устройств. В связи с этим автор считает возможным использовать преимущества подобных систем для повышения эффективности цифровой обработки сигналов в задачах ОМП за счет использования адаптивной совместной обработки сигналов, полученных от разных устройств.

В связи с этим тема диссертационной работы является актуальной.

Цель работы. Разработка цифрового устройства определения места повреждения ЛЭП на основе моделей с гетерогенной распределенной структурой.

Задачи исследования. Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

1. Анализ и обобщение существующих методов определения места повреждения по параметрам аварийного режима.
2. Совершенствование алгоритмов ОМП при одно- и двустороннем наблюдении ЛЭП за счет использования новых моделей с гетерогенной распределенной структурой как для сигналов, так и для электрической сети.
3. Совершенствование способов определения мест двойного замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью на основе базовых алгоритмических моделей сети при действии в них электрических величин аварийного режима.
4. Разработка способа распознавания основной гармоники на коротком окне наблюдения для целей ОМП в сетях с быстродействующими

выключателями за счет адаптивной совместной обработки измерений электрических величин, полученных от различных устройств РЗА.

5. Разработка и реализация в цифровом устройстве ОМП разработанных алгоритмов и подтверждение их эффективности.

Степень разработанности темы исследования. В нашей стране устройства ОМП появились в конце 50-х – начале 60-х годов прошлого века. В первое время внедрялись исключительно двусторонние алгоритмы ОМП, а с середины 80-х годов началась разработка и односторонних методов. Весомый вклад в разработку и исследование методов ОМП внесли А. И. Айзенфельд, В. И. Антонов, Е. А. Аржанников, Я. Л. Арцишевский, Г. В. Вагапов, В. К. Ванин, Н. А. Дони, К. И. Ермаков, А. С. Засыпкин, П. В. Илюшин, Т. Г. Климова, В. Н. Козлов, А. П. Кузнецов, А. Л. Куликов, В. Ф. Лачугин, Д. Р. Любарский, Ю. Я. Лямец, А. С. Малый, М. В. Мартынов, Р. Г. Минуллин, А. В. Мокеев, В. И. Нагай, В. Г. Наровлянский, В. А. Наумов, К. И. Никитин, Г. С. Нудельман, В. С. Петров, М. Г. Попов, Е. И. Сацук, А. И. Федотов, Г. М. Шалыт, В. А. Шуин, А.-С. С. Саухатас, L. V. Bewley, T. Takagy, M. M. Saha и другие. Несмотря на множество работ, так или иначе связанных с разработкой устройств определения места повреждения, до сих пор не проработаны научные и технические вопросы построения гибкого математического и программного обеспечения устройств, способного обеспечить универсальность и единство подхода к разработке цифрового устройства ОМП. Представленное к защите диссертационное исследование решает эту задачу.

Объектом исследования являются трехфазные воздушные ЛЭП в сетях высокого напряжения и в сетях с изолированной нейтралью в аварийном режиме.

Предметом исследования являются способы определения места повреждения по параметрам аварийного режима и алгоритмы адаптивной совместной обработки измерений электрических величин, полученных от различных устройств РЗА для задач ОМП.

Методология и методы исследования. При выполнении диссертационных исследований применялись методы математического моделирования, теоретических основ электротехники и основы теории адаптивной цифровой обработки сигналов. Теоретические исследования проводились в программных средах Matlab и Mathcad, а экспериментальные исследования разработанного в диссертации цифрового устройства ОМП проводились на программно-техническом комплексе моделирования процессов в электроэнергетической системе в реальном масштабе времени фирмы RTDS Technologies Inc. (Канада).

Степень достоверности. Достоверность полученных результатов исследований, основных научных положений и выводов работы подтверждается результатами математического моделирования в программной среде Matlab и результатами испытаний разработанных функций ОМП в составе терминала ЭКРА 200 (НПП «ЭКРА») на программно-

техническом комплексе испытаний в реальном масштабе времени RTDS. Диссертационные исследования прошли неоднократную научную экспертизу с обсуждением результатов работы на международных, всероссийских и республиканских научно-практических конференциях.

Соответствие паспорту специальности. В соответствии с паспортом научной специальности 2.4.3. «Электроэнергетика» (технические науки), данная диссертация посвящена вопросам развития и совершенствования теоретической и технической базы электроэнергетики с целью обеспечения экономичного и надежного производства электроэнергии, ее транспортировки и снабжения потребителей электроэнергией в необходимом для потребителей количестве и требуемого качества. Отражённые в диссертации научные положения соответствуют областям исследования специальности 2.4.3.:

– пункту 8 «Разработка и обоснование алгоритмов и принципов действия устройств релейной защиты и противоаварийной автоматики для распознавания повреждений, определения мест и параметров повреждающих (возмущающих) воздействий в электрических сетях» соответствуют предложенные целевые функции и алгоритмы идентификации мест повреждений ЛЭП при ее одно- и двустороннем наблюдении;

– пункту 13 «Разработка методов обработки сигналов для мониторинга и диагностики состояния электрооборудования электроустановок» соответствует предложенный метод адаптивной совместной обработки измерений электрических величин, полученных от различных устройств РЗА;

– пункту 16 «Разработка методов анализа и синтеза систем автоматического регулирования, противоаварийной автоматики и релейной защиты в электроэнергетике» соответствуют предложенные методы определения места повреждения на основе моделей с гетерогенной распределенной структурой для сигналов и электрической сети.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Способ построения алгоритмических моделей с гетерогенной распределенной структурой для контролируемой ЛЭП при ее одно- и двустороннем наблюдении.
2. Новые целевые функции для определения места повреждения по несинхронным измерениям с двух сторон контролируемой ЛЭП.
3. Метод определения мест двойного замыкания на землю в сети с изолированной нейтралью на основе базовых алгоритмических моделей сети.
4. Способ распознавания основной гармоники на коротком окне наблюдения путем совместной обработки сигналов, полученных от различных устройств РЗА, на основе адаптивных моделей с гетерогенной распределенной структурой для сигналов.

Научная новизна работы:

1. Предложенные алгоритмические модели с гетерогенной распределенной структурой для контролируемой ЛЭП развивают способы самонастройки моделей контролируемой сети и обеспечивают гибкость

процесса определения места повреждения, отличающиеся от известных применением двунаправленных моделей элементов электрической сети.

2. Предложенный способ двустороннего определения места повреждения использует новые целевые функции, устанавливающие выполнение принципа диссипативности для условных мощностей поперечных ветвей места повреждения и обеспечивающие работу ОМП и при несинхронных измерениях электрических величин на ЛЭП.

3. Разработанный способ определения мест двойного замыкания на землю развивает применение методов теории алгоритмических моделей для ОМП в сети с изолированной нейтралью и отличается от известных применением базовых алгоритмических моделей сети при действии в них электрических величин аварийного режима.

4. Предлагаемый способ распознавания слагаемых электрической величины по сигналам, полученным от различных устройств РЗА, позволяет увеличить окно наблюдения, не изменяя при этом длины отрезка входного сигнала, и отличается от известных применением алгоритма совместной обработки сигналов на основе единой модели информационных составляющих и общего фильтра остаточного сигнала.

Теоретическая значимость работы:

1. Теоретически обоснована эффективность применения алгоритмических моделей с гетерогенной распределенной структурой для электрической сети в задачах ОМП и релейной защиты.

2. Разработаны теоретические основы метода адаптивной совместной обработки цифровых сигналов, полученных от различных устройств РЗА, развивающие методы адаптивного структурного анализа сигналов.

3. Сформулировано генеральное свойство алгоритмических моделей поврежденной электрической сети, обобщающее положения теории алгоритмических моделей и устанавливающее единство базиса представления моделей.

Практическая значимость работы:

1. Разработанные алгоритмические модели с гетерогенной распределенной структурой для контролируемой ЛЭП при ее одно- и двустороннем наблюдении могут быть применены при разработке других цифровых устройств релейной защиты и автоматики.

2. Разработанный алгоритм определения мест двойного замыкания на землю в сети с изолированной нейтралью может быть применен при разработке устройств определения мест однофазных замыканий на землю.

3. Разработанный метод определения места повреждения линии электропередачи по несинхронным измерениям с двух сторон контролируемой ЛЭП может быть применен в распределенных системах мониторинга, защиты и управления.

4. Предлагаемый способ распознавания слагаемых электрической величины по измерениям различных устройств может быть применен для компрессии данных в системах сбора и долгосрочного хранения информации,

которые концентрируют в себе множество файлов осциллограмм от различных цифровых устройств РЗА.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы и ее результаты докладывались и обсуждались на следующих международных, всероссийских и республиканских конференциях: Всероссийские научно-технические конференции «Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем» и «Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике» (г. Чебоксары, 2024 – 2020 г.г.), «Энергия Арктики» (г. Архангельск, 2023, 2022 г.г.), Научно-техническая конференция молодых специалистов в рамках форума «РЕЛАВЭКСПО» (г. Чебоксары, 2023, 2021 г.г.), 2021 Ural-Siberian Smart Energy Conference (USSEC), 2020 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon).

Публикации. Содержание диссертационной работы нашло отражение в 22 научных работах, среди которых 4 патента на изобретения и 4 статьи, опубликованные в рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК при Минобрнауки России и изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования.

Реализация и внедрение результатов работы. Результаты диссертационных исследований используются в ООО НПП «ЭКРА» в цифровых устройствах РАС и ОМП ЭКРА 23Х и в ООО «Инженерный центр «Энергосервис» для целей математического моделирования современных интеллектуальных устройств различного функционального назначения. Наряду с этим, теоретические результаты диссертационного исследования внедрены в учебный процесс в ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова» и используются при чтении лекций по курсам «Цифровая обработка электроэнергетических сигналов» и «Автоматическое управление электроэнергетическими системами» направления подготовки магистров 13.04.02 – «Электроэнергетика и электротехника».

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы (73 наименования) и приложений (5 страниц), включает в себя 105 страниц машинного текста, 55 рисунков и 11 таблиц.

II. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении формулируются цель работы и основные задачи исследований, связанных с разработкой цифрового устройства определения места повреждения. Обосновывается актуальность поставленных задач, отмечаются научная новизна темы и практическая ценность результатов работы. Излагается структура представленной диссертации.

В первой главе на основе анализа и обобщения современных методов определения места повреждения формулируются основные научные и технические задачи, связанные с разработкой устройства ОМП.

Выявлено, что фундаментальным свойством места повреждения является принцип диссипативности, заключающийся резистивном характере цепи замыкания и означающим, что в месте повреждения поперечный поток мощности носит чисто активный характер. В самом общем случае целевая функция определяется как сумма реактивных мощностей всех фаз $\nu = \overline{A, B, C}$ в предполагаемом месте повреждения x:

$$F(x) = Q_{\Sigma}(x) = \sum_{\nu=A,B,C} \mathrm{Im}\left[\underline{U}_{\nu}(x)\overset{*}{\underline{I}}_{f,\nu}(x)\right].$$

Следовательно, чтобы определить место замыкания, достаточно найти на поврежденной линии точку, в которой целевая функция $F(x)$ принимает нулевое значение (рисунок 1):

$$F(x) \xrightarrow{x \to x_f} 0.$$

И, если известен вид повреждения, то могут применяться упрощенные целевые функции (таблица 1). А при отсутствии данных предшествующего режима предпочтение отдается косвенным целевым функциям (таблица 2, ξ – особая фаза), основанным на свойстве распределения составляющих обратной и нулевой последовательностей тока короткого замыкания.

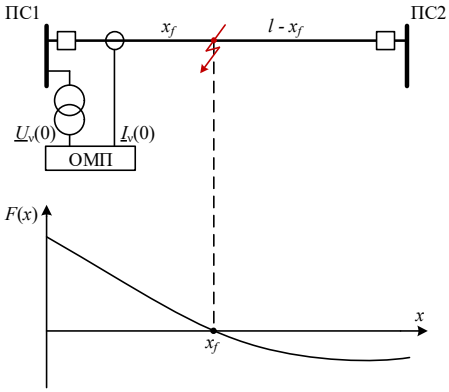

Рисунок 1 – Зависимость целевой функции $F(x)$ от координаты x предполагаемого места повреждения. Истинному месту повреждения x_f соответствует точка, в которой целевая функция $F(x)$ принимает нулевое значение

Таблица 1 – Пофазные целевые функции [1]

Вид повреждения	Пофазная целевая функция
$K^{(1)}$	$\mathrm{Im}\left[\underline{U}_{\xi}(x)\overset{*}{\underline{I}}_{f,\xi}(x)\right]$
$K^{(2)}$	$\mathrm{Im}\left[\underline{U}_{(\xi-1)(\xi+1)}(x)\overset{*}{\underline{I}}_{f,(\xi-1)}(x)\right]$
$K^{(1,1)}$	$\mathrm{Im}\left[\underline{U}_{(\xi-1)}(x)\overset{*}{\underline{I}}_{f,(\xi-1)}(x)+\underline{U}_{(\xi+1)}(x)\overset{*}{\underline{I}}_{f,(\xi+1)}(x)\right]$
$K^{(3)}$	$\sum_{\nu=A,B,C}\mathrm{Im}\left[\underline{U}_{\nu}(x)\overset{*}{\underline{I}}_{f,\nu}(x)\right]$

[1] Таблицы 1 и 2 приведены для сохранения полноты картины об алгоритмах цифрового устройства ОМП, разработанного в рамках диссертационного исследования (заимствовано из: Лямец Ю. Я. Диагностика линий электропередачи / Ю. Я. Лямец, В. И. Антонов [и др.] // Электротехнические микропроцессорные устройства и системы. Чебоксары: Изд-во Чуваш ун-та, 1992. – С. 9-32)

Таблица 2 – Косвенные целевые функции

Вид повреждения	Косвенная целевая функция
$K^{(1)}$	$\mathrm{Im}\left[\underline{U}_{f,\xi}(x)\overset{*}{\underline{I}}_{2,\xi}(x-)\right]$ или $\mathrm{Im}\left[\underline{U}_{f,\xi}(x)\overset{*}{\underline{I}}_{0,\xi}(x-)\right]$
$K^{(2)}$	$\mathrm{Im}\left[-j\underline{U}_{(\xi-1)(\xi+1)}(x)\overset{*}{\underline{I}}_{2,\xi}(x-)\right]$
$K^{(1,1)}$	$\mathrm{Im}\left[\left(\underline{U}_{(\xi-1)}(x)+\underline{U}_{(\xi+1)}(x)\right)\overset{*}{\underline{I}}_{0,\xi}(x-)\right]$
$K^{(3)}$	$\mathrm{Im}\left[\underline{U}_{f,A}(x)\overset{*}{\underline{I}}_{1}(x-)\right]$

Отмечается, что в электрических сетях с несложной конфигурацией в основном применяют формульные методы ОМП, основанные на измерении реактивного сопротивления петли КЗ и не требующие знаний о предшествующем режиме.

Впервые формулируется генеральное свойство алгоритмических моделей поврежденной электрической сети, заключающееся в единстве их представления в виде совокупности базовых моделей. Вид электрических величин, действующих в базовых моделях, зависит от типа питания сети: при одностороннем питании в моделях действуют аварийные величины (рисунки 2, 4), а при двухстороннем – чисто аварийные (рисунки 3, 5).

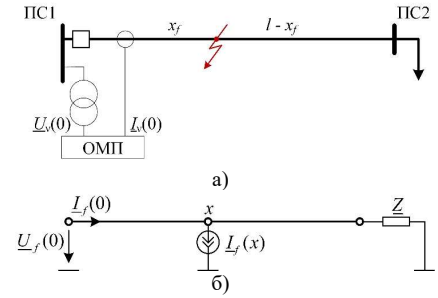

Рисунок 2 – Схема (а) и алгоритмическая модель (б) для сети с односторонним питанием

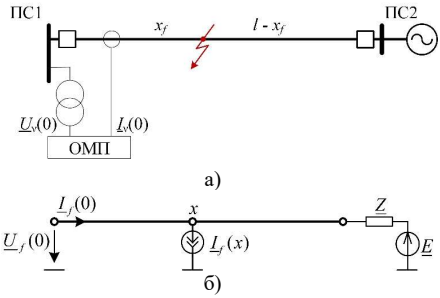

Рисунок 3 – Схема (а) и алгоритмическая модель (б) для сети с двухсторонним питанием

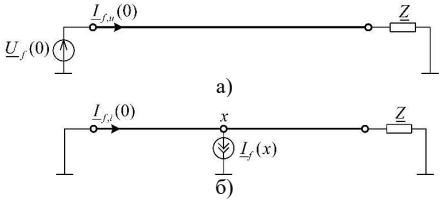

Рисунок 4 – Базовые алгоритмические модели сети с односторонним питанием: а) модель неповрежденной сети при действии на ее входе источника напряжения аварийного режима; б) модель сети при действии источника тока замыкания

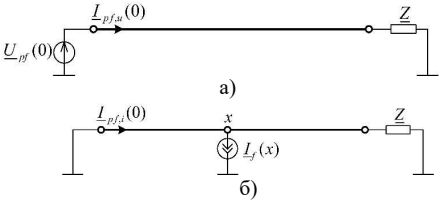

Рисунок 5 – Базовые алгоритмические модели сети с двухсторонним питанием: а) модель неповрежденной сети при действии на ее входе источника напряжения чисто аварийного режима; б) модель сети при действии источника тока замыкания

Во второй главе предлагаются алгоритмические модели с гетерогенной распределенной структурой для контролируемой ЛЭП, развивающие способы автоматизированного построения моделей контролируемой сети и обеспечивающие гибкость процесса определения места повреждения. Вводятся в рассмотрение новые целевые функции для способа двустороннего определения места повреждения, устанавливающие выполнение принципа диссипативности для условных мощностей поперечных ветвей места повреждения и обеспечивающие работу ОМП и при несинхронных измерениях электрических величин на ЛЭП.

Особенностью алгоритмической модели с гетерогенной распределенной структурой, создаваемой или для каждой последовательности симметричных составляющих $\chi = \sigma = \overline{1,2,0}$, или для фазных величин $\chi = \nu = \overline{A,B,C}$, является представление контролируемой ЛЭП в виде каскада моделей участков однородности (модели 1 – 3 на рисунке 6, а), которые, в свою очередь, состоят из двух одинаковых внутренних моделей. Первая из них преобразует входные напряжение и ток слева направо:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}^{L}_{n,\chi} \\ \underline{I}^{L}_{n,\chi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{U}^{L}_{\text{in},\chi} \\ \underline{I}^{L}_{\text{in},\chi} \end{bmatrix} \prod_{m=1}^{n} \underline{\mathbf{B}}_{m,\chi} ,$$

а вторая – справа налево:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}^{R}_{n,\chi} \\ \underline{I}^{R}_{n,\chi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{U}^{R}_{\text{in},\chi} \\ \underline{I}^{R}_{\text{in},\chi} \end{bmatrix} \prod_{m=n}^{N} \underline{\mathbf{B}}_{m,\chi} .$$

Причем матрица преобразования $\underline{\mathbf{B}}_{n,\chi}$ для обеих внутренних моделей n-го участка идентична; здесь $n = \overline{1,N}$ – номер участка однородности, N – число участков.

В работе обосновывается вывод, что такой подход к формированию алгоритмической модели позволяет оптимально организовать программную среду цифрового устройства ОМП, поскольку расчет электрических величин в предполагаемом месте повреждения требует определения соответствующих величин на выходах первой и второй внутренних моделей каждого участка однородности только один раз. Это обеспечивает определение электрических величин в предполагаемом месте повреждения лишь заменяя модель участка однородности на модель поврежденного участка (рисунок 6, б) и подводя к ее входам уже известные электрические величины с выходов моделей соседних участков.

Демонстрируется способ двустороннего определения места повреждения на основе новых целевых функций, которые подразумевают расчет условной реактивной мощности в предполагаемом месте повреждения $\underline{Q}_f(x)$ с использованием тока замыкания $\underline{I}_{f,\chi}(x)$.

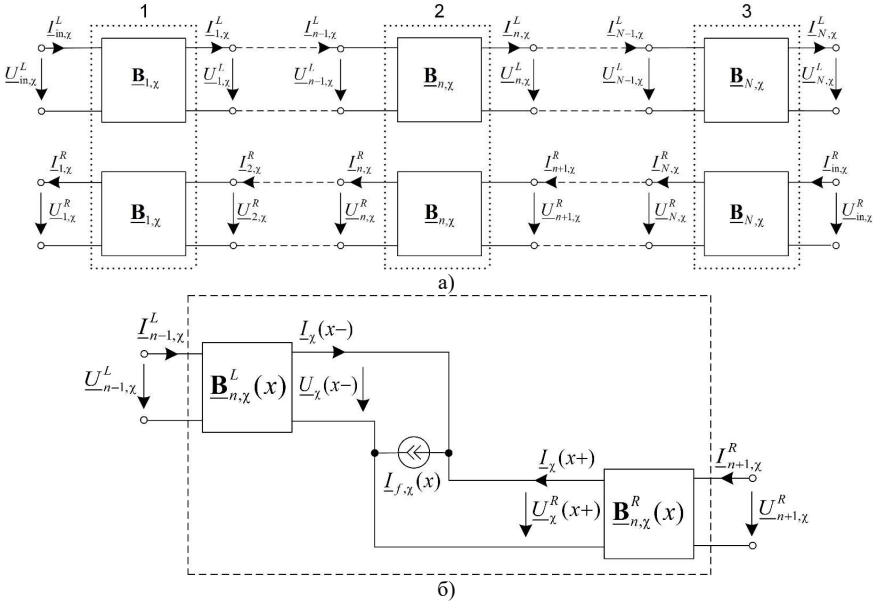

Рисунок 6 – Алгоритмические модели для устройства двухстороннего ОМП: а) модель с гетерогенной распределенной структурой контролируемой ЛЭП для расчета электрических величин на границах участков однородности; б) модель поврежденного участка

Но, если ток замыкания при синхронных измерениях можно определить как сумму токов слева и справа от места повреждения

$$\underline{I}_{f,\chi}(x) = \underline{I}_{s,\chi}(x-) + \underline{I}_{r,\chi}(x+),$$

то при несинхронных измерениях необходимо предварительно синхронизировать токи на выходе моделей ЛЭП слева и справа от предполагаемого места повреждения x.

Причем угол рассинхронизации токов определяют как разность фаз напряжений моделей справа и слева:

$$\varphi_\chi(x) = \arg\left(\underline{U}_{r,\chi}(x)\right) - \arg\left(\underline{U}_{s,\chi}(x)\right).$$

Тогда, если при расчете тока замыкания синхронизировать ток справа от предполагаемого места повреждения, т.е. применить правило

$$\underline{I}_{fs,\chi}(x) = \underline{I}_{s,\chi}(x-) + \underline{I}_{r,\chi}(x+)e^{-j\varphi_\chi},$$

то целевая функция, представляющая собой модуль условной реактивной мощности поперечной ветви замыкания, будет вычисляться по следующей формуле:

$$F(x) = \left|Q_{fr}(x)\right| = \left|\sum_\chi \mathrm{Im}\left[\underline{U}_{r,\chi}(x)\,\underline{I}^*_{fr,\chi}(x)\right]\right|,$$

а если синхронизировать ток слева от предполагаемого места повреждения, т.е. вычислить ток по правилу

$$\underline{I}_{fr,\chi}(x) = \underline{I}_{r,\chi}(x+) + \underline{I}_{s,\chi}(x-)e^{j\varphi_\chi},$$

то целевая функция примет следующий вид:

$$F(x) = \left|Q_{fs}(x)\right| = \left|\sum_{\chi} \mathrm{Im}\left[\underline{U}_{s,\chi}(x)\,\underline{I}^{*}_{fs,\chi}(x)\right]\right|.$$

С целью сокращения числа локальных минимумов целевой функции – особенно в случае, когда суммарная реактивная мощность одной из групп имеет больше переходов через нулевое значение чем суммарная реактивная мощность другой группы – применяют целевую функцию в виде совокупности абсолютных значений суммарных реактивных мощностей групп

$$F(x) = \left|Q_{fs}(x)\right| + \left|Q_{fr}(x)\right|.$$

В главе показывается, что если целевая функция имеет множество локальных минимумов, то выбор решения, близкого к истинному месту повреждения, может быть обоснован решением вспомогательной функции, минимум которой, совпадающий с одним из локальных минимумов целевой функции $F(x)$, свидетельствует о достижении реального места повреждения x_f.

Отмечается, что при синхронных измерениях можно использовать упрощенный способ определения места повреждения, основанный на равенстве оценок напряжений, полученных по измерениям с разных сторон ЛЭП. Согласно способу, за место повреждения принимается точка, в которой невязка

$$\varepsilon = \left|\underline{\hat{U}}_{s,1}(l) - \underline{U}_{r,1}(l)\right| + \left|\underline{\hat{U}}_{s,2}(l) - \underline{U}_{r,2}(l)\right|$$

принимает минимальное значение. Здесь $\underline{U}_{r,1}(l)$ и $\underline{U}_{r,2}(l)$ – измеренные напряжения прямой и обратной последовательностей с правой стороны ЛЭП, а $\underline{U}_{s,1}(l)$ и $\underline{U}_{s,2}(l)$ – оценки этих напряжений, полученные в моделях с гетерогенной распределенной структурой (рисунок 6, а).

В работе также демонстрируется способ одностороннего ОМП на основе моделей с гетерогенной распределенной структурой для электрической сети. В ней электрические величины на выходах вторых внутренних моделей формируются путем преобразования ими единичного тока и напряжения, создаваемого им на сопротивлении $\underline{Z}_\sigma$ системы противоположного конца (рисунок 7, а). Такое применение алгоритмической модели вызвано недоступностью измерений с правой стороны ЛЭП.

В модели поврежденного участка (рисунок 7, б) искомый ток замыкания формируется блоком 3, а подводимый к нему ток чисто аварийного режима справа $\underline{I}^{R}_{\sigma}(x+)$ формируется блоком 2 путем умножения нормированного тока справа $\underline{I}^{R(U)}_{\sigma}(x+)$ на коэффициент приведения $\underline{K}_\sigma$:

$$\underline{I}^{R}_{\sigma}(x+) = \underline{K}_\sigma \underline{I}^{R(U)}_{\sigma}(x+).$$

Коэффициент приведения формируется блоком 1 исходя из условия, что напряжения слева и справа от места повреждения должны быть равны:

$$\underline{K}_{\delta} = \frac{\underline{U}^{L}_{pf,\sigma}(x-)}{\underline{U}^{R(U)}_{\sigma}(x+)}.$$

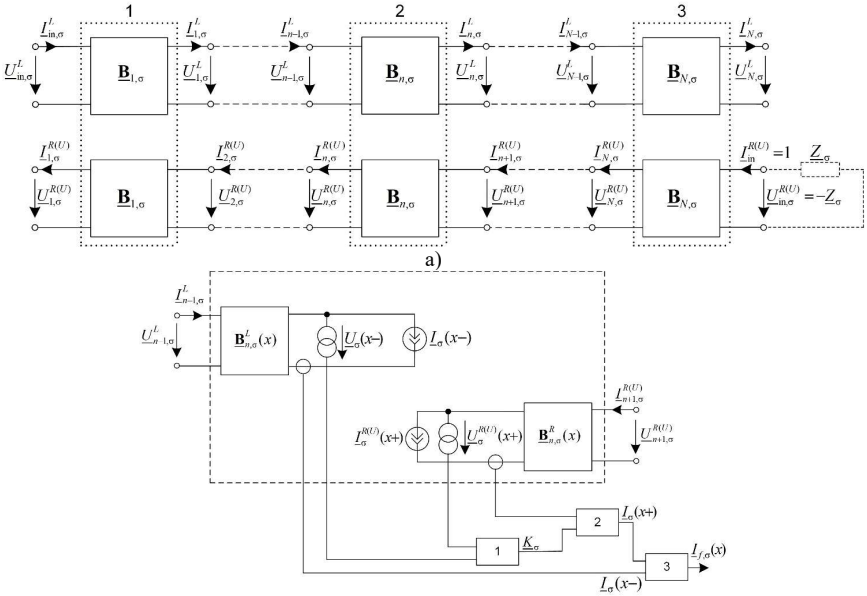

Рисунок 7 – Алгоритмические модели для устройства одностороннего ОМП: а) модель с гетерогенной распределенной структурой для контролируемой ЛЭП; б) модель поврежденного участка

В третьей главе предлагается новый способ определения мест двойного замыкания на землю в сети с изолированной нейтралью (рисунок 8), использующий те же базовые алгоритмические модели сети, что и для сетей высокого и сверхвысокого напряжения (рисунок 4), и отличающийся тем, что его работоспособность и точность не зависят от величин переходных сопротивлений в местах замыканий R_B и R_C .

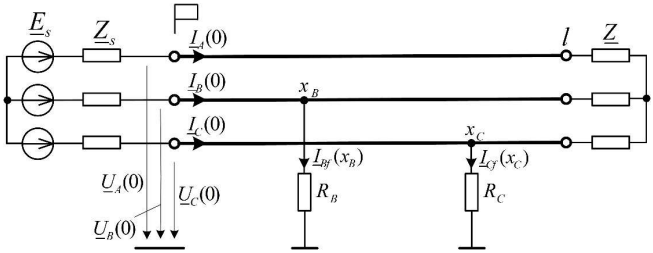

Рисунок 8 – Схема сети при двойном замыкании на контролируемой ЛЭП длиной l: $\underline{E}_s$ и $\underline{Z}_s$ – ЭДС и сопротивление эквивалентной системы за спиной устройства. Флажком на рисунке обозначено место установки устройства

Показано, что при локализации мест двойного замыкания на землю в сети с изолированной нейтралью к базовым алгоритмическим моделям сетей

высокого и сверхвысокого напряжения добавляется еще одна базовая модель электрической сети при действии источника тока.

Первая базовая модель, как и ранее, представляет собой модель неповрежденной сети при действии на ее входах измеренных фазных напряжений в аварийном режиме (рисунок 9). В ней рассчитывают токи фаз в месте измерения:

$$\underline{I}_{\text{v},n}(0)=\frac{\underline{U}_{\text{v}}(0)-\underline{U}_{0}(0)}{\underline{Z}_{\text{in}}},$$

где $\underline{Z}_{\text{in}}$ – входное сопротивление прямой последовательности контролируемого объекта.

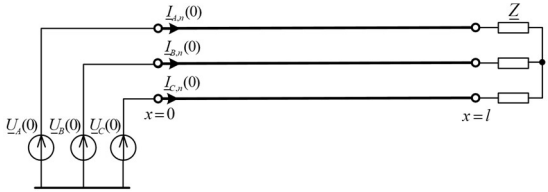

Рисунок 9 – Первая базовая алгоритмическая модель неповрежденной сети для контролируемого участка при действии на ее входах фазных напряжений, измеренных в аварийном режиме сети

В общем случае расчет электрических величин производится в алгоритмической модели сети с гетерогенной распределенной структурой (рисунок 10).

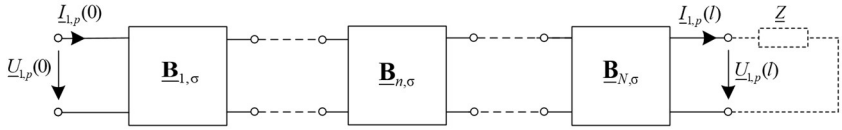

Рисунок 10 – Модель с гетерогенной распределенной структурой для электрической сети с изолированной нейтралью

Особенность предложенного способа определения мест двойного замыкания на землю заключается в использовании двух базовых моделей электрической сети при действии источника тока в каждом из мест замыкания (рисунок 11, а и б).

Выявлено правило, действующее во вторых базовых моделях сети и определяющее токи замыканий (источников тока):

$$\underline{I}_{Bf}(x)=\frac{\underline{I}_{A,pf}(x)\ -\ \underline{I}_{B,pf}(x)}{\left[\underline{k}_{d,nz}(x)+\dfrac{\underline{k}_{d,0}(x)}{2}\right]-1},$$

$$\underline{I}_{Cf}(x)\ =\ \frac{\underline{I}_{A,pf}(x)-\underline{I}_{C,pf}(x)}{\left[\underline{k}_{d,nz}(x)+\dfrac{\underline{k}_{d,0}(x)}{2}\right]-1},$$

где $\underline{I}_{\text{v},pf}(0)=\underline{I}_{\text{v}}(0)-\underline{I}_{\text{v},n}(0)$ – чисто аварийные токи фаз; $\underline{k}_{d,nz}(x)$ – коэффициент связи между безнулевыми составляющими тока источника тока

$\underline{I}_{Bf,nz}(x)$ и тока фазы справа от него $2\underline{I}''_{B,nz}(x)$ при действии только ближайшего к месту измерения источника тока (рисунок 11, а); $\underline{k}_{d,0}(x)$ – коэффициент связи между составляющими нулевой последовательности тока источника тока $\underline{I}_{Bf,0}(x)$ и тока фазы справа от него $2\underline{I}''_{B,0}(x)$ при действии только ближайшего к месту измерения источника тока (рисунок 11, б).

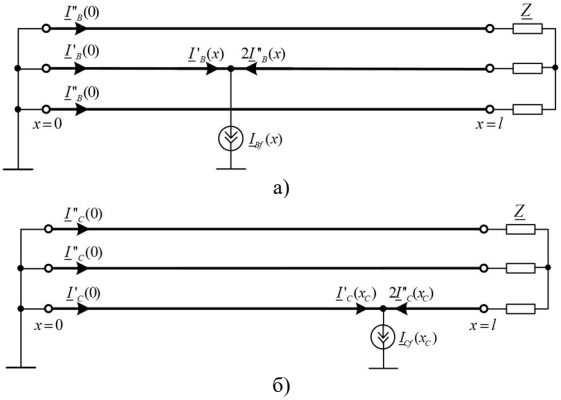

Рисунок 11 – Вторые базовые алгоритмические модели сети при действии источника тока замыкания: а) в фазе *B*; б) в фазе *C*

Необходимые для расчета целевой функции фазные напряжения в предполагаемом месте замыкания $\underline{U}_{\text{v}}(x)$ определяются как сумма безнулевых составляющих $\underline{U}_{\text{v},nz}(x)$ и составляющих нулевой последовательности $\underline{U}_0(x)$

$$\underline{U}_{\text{v}}(x) = \underline{U}_{\text{v},nz}(x) + \underline{U}_0(x)$$

с учетом распределенности параметров

$$\underline{U}_{\text{v},nz}(x) = \underline{U}_{\text{v},nz}(0)\operatorname{ch}(\underline{\gamma}_1 x) - \underline{Z}_{C1}\underline{I}_{\text{v},nz}(0)\operatorname{sh}(\underline{\gamma}_1 x),$$

$$\underline{U}_0(x) = \underline{U}_0(0)\operatorname{ch}(\underline{\gamma}_0 x) - \underline{Z}_{C0}\underline{I}_0(0)\operatorname{sh}(\underline{\gamma}_0 x),$$

где $\underline{Z}_{C1}$, $\underline{\gamma}_1$ и $\underline{Z}_{C0}$, $\underline{\gamma}_0$ – характеристическое сопротивление и коэффициент распространения прямой и нулевой последовательности соответственно.

Фаза и координата x_η первого места замыкания определяются целевой функцией для $\text{К}^{(1)}$ из таблицы 1 той из фаз $\eta = \overline{B, C}$, координата точки перехода через нуль которой расположена ближе к месту измерения (рисунок 12).

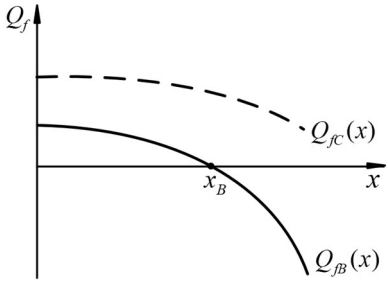

Рисунок 12 – Изменение целевых функций фаз *B* и *C* в зависимости от предполагаемой координаты расположения первого места повреждения

Второе место замыкания определяется аналогично первому на основе алгоритмической модели сети для контролируемого участка справа от первого места замыкания (рисунок 13). Но при поиске второго места замыкания алгоритмическую модель сети (рисунок 13) представляют в виде двух базовых моделей: первой базовой модели неповрежденной сети для контролируемого участка справа от первого места замыкания при действии на ее входах фазных напряжений, вычисленных уже для первого места замыкания (рисунок 14), и второй базовой модели сети для контролируемого участка справа от первого места замыкания (рисунок 15) при действии источника тока $\underline{I}_{Cf}(x)$.

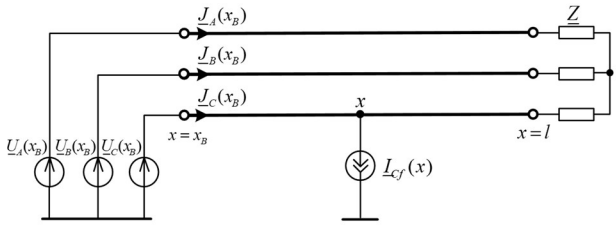

Рисунок 13 – Алгоритмическая модель сети для контролируемого участка справа от первого места замыкания: $\underline{J}_{\nu}(x_B)$ – фазные токи справа от первого места замыкания $x = x_B$

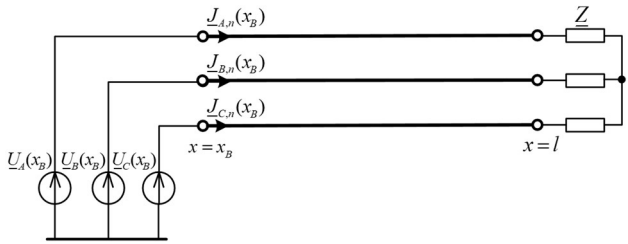

Рисунок 14 – Первая базовая модель неповрежденной сети для контролируемого участка справа от первого места замыкания. На ее входах действуют фазные напряжения первого места замыкания

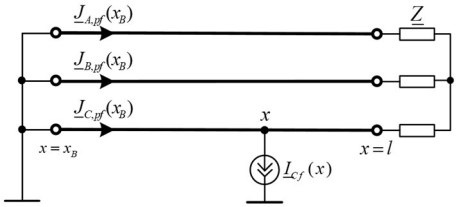

Рисунок 15 – Вторая базовая модель сети для контролируемого участка справа от первого места замыкания при действии в ней только источника тока замыкания

Таким образом подтверждается генеральное свойство алгоритмических моделей поврежденной электрической сети, заключающееся в единстве их представления в виде совокупности базовых моделей независимо от класса напряжения электрической сети.

В четвертой главе предлагается способ распознавания основной гармоники входных сигналов ОМП в сетях с быстродействующими выключателями, использующий преимущества совместной обработки сигналов. Разрабатываются теоретические основы совместной обработки цифровых сигналов, полученных для целей ОМП от различных устройств РЗА, развивающие методы адаптивного структурного анализа сигналов.

Основу совместной обработки цифровых сигналов составляет модель с гетерогенной распределенной структурой для сигнала (рисунок 16). Она представляет собой каскад из модели информационных составляющих, включающей в себя последовательно соединенные адаптивные канонические фильтры компонентов $C_1^n - C_{N_C}^n$ (N_C – число распознаваемых компонентов), и фильтра остаточного сигнала F_r^n. Такая структура модели создает благоприятные условия для распознавания компонентов сигнала на небольшой выборке отсчетов за счет раздельной настройки структурных единиц фильтра. Это позволяет сократить необходимое для распознавания структуры сигнала окно наблюдения.

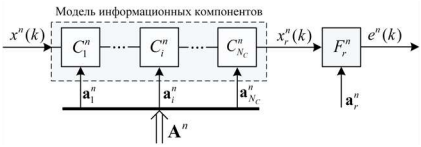

Рисунок 16 – Модель с гетерогенной распределенной структурой для сигнала $x^n(t)$

Предлагаются методы совместного распознавания электрической величины по сигналам, полученным от различных устройств РЗА (рисунок 17), исключающие множественность решения задачи за счет использования единой модели информационных составляющих.

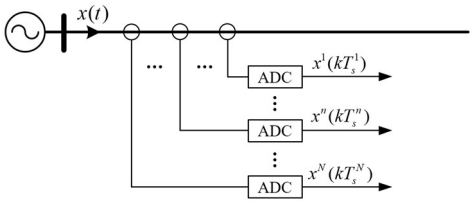

Рисунок 17 – Измерение электрической величины $x(t)$ – тока ЛЭП – разными устройствами релейной защиты. Тракт АЦП (ADC) каждого устройства преобразует электрическую величину в цифровой сигнал $x^n(kT_s^n)$, n – номер сигнала

В приложениях ОМП для сетей с быстродействующими выключателями предлагается настраивать фильтр основной гармоники C_1 и фильтр остаточного сигнала F_r в общих блоках настройки S_1 и S_r соответственно (рисунок 18).

В общем случае настройка фильтров осуществляется итерационно на каждом этапе σ добиваясь оптимальности решения. В едином блоке настройки, например фильтра остаточного сигнала S_r, вектор коэффициентов $\mathbf{a}_{r,\sigma}$ ищут как решение системы

$$\aleph_{r,\sigma}\mathbf{a}_{r,\sigma} = \boldsymbol{\beta}_{r,\sigma},$$

при этом траекторную матрицу

$$\aleph_{r,\sigma} = \begin{bmatrix} \mathbf{X}_{r,\sigma}^{1} \\ \vdots \\ \mathbf{X}_{r,\sigma}^{N} \end{bmatrix}$$

и вектор наблюдения

$$\boldsymbol{\beta}_{r,\sigma} = \begin{bmatrix} \mathbf{b}_{r,\sigma}^{1} \\ \vdots \\ \mathbf{b}_{r,\sigma}^{N} \end{bmatrix}$$

получают путем вертикальной конкатенации траекторных матриц, полученных для всех остаточных сигналов

$$\mathbf{X}_{r,\sigma}^{n} = \begin{bmatrix} x_{r,\sigma}^{n}(k-M_r-L_r+1) & x_{r,\sigma}^{n}(k-M_r-L_r+2) & \cdots & x_{r,\sigma}^{n}(k-L_r) \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ x_{r,\sigma}^{n}(k-M_r) & x_{r,\sigma}^{n}(k-M_r+1) & \cdots & x_{r,\sigma}^{n}(k-1) \end{bmatrix} \in \mathbf{R}^{L_r \times M_r},$$

и векторов наблюдения

$$\mathbf{b}_{r,\sigma}^{n} = \left[x_{r,\sigma}^{n}(k-L_r+1), x_{r,\sigma}^{n}(k-L_r+2), \ldots, x_{r,\sigma}^{n}(k) \right]^T \in \mathbf{R}^{L_r},$$

где M_r – порядок фильтра остаточного сигнала, L_r – число уравнений. Такой подход увеличивает окно наблюдения, не изменяя при этом длины отрезка входного сигнала, что позволяет минимизировать количество отсчетов, необходимое для распознавания структуры сигнала.

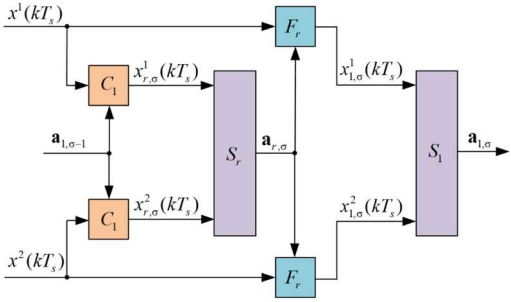

Рисунок 18 – Схема совместной обработки измерений для ОМП в сетях с быстродействующими выключателями

Качество настройки адаптивного фильтра контролируют по уровню целевой функции $E(\sigma)$, которую задают, например, в виде абсолютного значения разности евклидовых норм векторов коэффициентов адаптивного фильтра на текущей σ и предыдущей (σ–1) итерациях настройки:

$$E(\sigma) = \sum_{i=1}^{M_r} \left| \left\| \mathbf{a}_i^{\sigma} \right\|_E - \left\| \mathbf{a}_i^{\sigma-1} \right\|_E \right|.$$

Считается, что достигнут необходимый уровень качества настройки, если значение целевой функции $E(\sigma)$ не превышает заданного порога $E_{\text{th}} > 0$.

Преимущества совместной обработки сигналов демонстрируются на примере распознавания основной гармоники электрической величины

$$x(t) = 2{,}73\cos(2\pi 50{,}18t + 2{,}77) + 0{,}089\cos(2\pi 150{,}54t + 2{,}02) + 2{,}29e^{-72t},$$

по измерениям двух различных устройств $x_1(kT_s) = x(kT_s) + w_1(kT_s)$ и $x_2(kT_s) = x(kT_s) + w_2(kT_s)$. Шум измерений $w_1(kT_s)$ и $w_2(kT_s)$ моделировался добавлением к электрической величине $x(t)$ белого шума. Мощность шумов выбиралась исходя из свойств входных сигналов устройств при эксплуатации и сказывается в четвертом знаке отсчета. Минимальная ширина окна наблюдения при оценке частоты основной гармоники с точностью 0,1 Гц составляет всего 18 отсчетов, в то время как при отдельной обработке сигналов от каждого из устройств необходимо 24 отсчета.

Таким образом, применение единой модели информационных составляющих и общих блоков настройки моделей как распознаваемых компонентов, так и остаточного сигнала, использующих совокупность отсчетов всех цифровых сигналов позволяет минимизировать число отсчетов, необходимых для распознавания структуры сигнала. Это свойство способа создает условия для эффективного применения моделей с гетерогенной распределенной структурой для распознавания сигналов в задачах ОМП и релейной защиты.

В пятой главе рассматриваются практические вопросы разработки цифрового устройства определения места повреждения ЛЭП на основе моделей с гетерогенной распределенной структурой для сигналов и самой контролируемой электрической сети.

Предлагаемые алгоритмы одностороннего и двухстороннего ОМП на основе моделей с гетерогенной распределенной структурой реализованы в цифровых устройствах РАС и ОМП на базе терминалов серии ЭКРА 200 и защищены патентами на изобретение.

Разработанное микропроцессорное устройство ЭКРА 233 09XX было испытано в центре моделирования и расчетов НПП «ЭКРА» с использованием программно-технического комплекса испытаний в реальном масштабе времени RTDS Simulator (RTDS Technologies Inc., Канада) (рисунки 19 и 20). Результаты испытаний подтверждают правильность функционирования устройства ОМП.

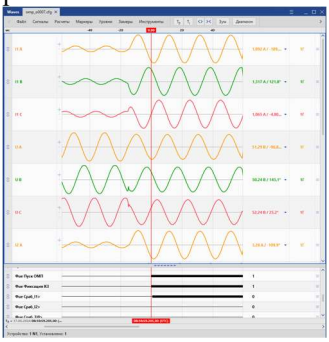

Рисунок 19 – Пример осциллограммы испытаний терминала ЭКРА 233 09XX

Рисунок 20 – Пример отчета с результатами ОМП на терминале ЭКРА 233 09XX (КЗ на расстоянии 96.25 км)

В приложениях приводятся модели в среде Simulink, тестовые сигналы и акты внедрений результатов исследований в диссертационной работе.

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Научные и практические результаты работы заключаются в следующем:

1 Предложены алгоритмические модели с гетерогенной распределенной структурой для контролируемой ЛЭП, которые развивают способы самонастройки моделей контролируемой сети и обеспечивают гибкость процесса определения места повреждения, отличающиеся от известных применением двунаправленных моделей элементов электрической сети.

2 Сформулировано генеральное свойство алгоритмических моделей поврежденной электрической сети, обобщающее положения теории алгоритмических моделей и устанавливающее единство базиса представления моделей независимо от класса напряжения.

3 Разработан способ двустороннего определения места повреждения на основе новых целевых функций, устанавливающих выполнение принципа диссипативности для условных мощностей поперечных ветвей места повреждения и обеспечивающих работу ОМП и при несинхронных измерениях электрических величин на ЛЭП.

4 Разработан способ определения мест двойного замыкания на землю в сети с изолированной нейтралью на основе базовых алгоритмических моделей сети, который развивает применение методов теории алгоритмических моделей для ОМП в сети с изолированной нейтралью.

5 Разработаны способы совместной обработки цифровых сигналов, полученных от различных устройств РЗА, использующие гетерогенные распределенные модели для сигналов и развивающие методы адаптивного структурного анализа сигналов. Предложен способ распознавания основной гармоники входных сигналов ОМП в сетях с быстродействующими выключателями, использующий преимущества совместной обработки сигналов.

6 Результаты работы используются:

в ООО НПП «ЭКРА» (г. Чебоксары) в цифровых устройствах РАС и ОМП ЭКРА 23Х;

в ООО «Инженерный центр «Энергосервис» (г. Архангельск) для целей математического моделирования современных интеллектуальных устройств различного функционального назначения.

7 Теоретические результаты диссертационного исследования внедрены в учебный процесс в ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова» (г. Чебоксары) и используются при чтении лекций по курсам «Цифровая обработка электроэнергетических сигналов» и «Автоматическое управление электроэнергетическими системами» направления подготовки магистров 13.04.02 – «Электроэнергетика и электротехника».

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК при Минобрнауки России и изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования

1. *Убасева М. В.* Распознавание электрической величины по измерениям от различных цифровых устройств релейной защиты и автоматики / М. В. Убасева, Е. С. Воробьев, В. И. Антонов [и др.] // Электрические станции. – 2024. – № 6(1115). – С. 44-50 (0,81 п.л./0,16 п.л.).

2. *Убасева М. В.* Целевые функции определителей места повреждения при двусторонних несинхронных измерениях / М. В. Убасева, В. С. Петров, В. И. Антонов, А. А. Ильин // Электрические станции. – 2023. – № 6(1103). – С. 47-50. – DOI 10.34831/EP.2023.1103.6.008 (0,46 п.л./0,15 п.л.).

3. *Убасева, М. В.* Определение мест двойного замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью / М. В. Убасева, В. С. Петров, В. А. Наумов [и др.] // Релейная защита и автоматизация. – 2021. – № 4(45). – С. 40-46 (0,81 п.л./0,16 п.л.).

4. Vorobyev, E. S. Adaptive Distributed Structure Models for Recognizing Input Signals in High-Speed Relay-Protection Applications / Vorobyev, E.S., *Ubaseva, M.V.*, Antonov, V.I. et al. // Russian Electrical Engineering. – October 2023. – Vol. 94 – P. 539–545. – ISSN: 1068-3712. – DOI 10.3103/S106837122308014X (0,81 п.л./0,16 п.л.).

Патенты на изобретения

5. Патент № 2801742 C1 Российская Федерация, МПК H02H 3/38. Способ выделения слагаемых электрической величины по измерениям различных устройств : № 2023103914 : заявл. 21.02.2023 : опубл. 15.08.2023 / М. В. Убасева, Е. С. Воробьев, В. И. Антонов [и др.] ; заявитель Общество с ограниченной ответственностью научно-производственное предприятие "ЭКРА" (1,62 п.л./0,27 п.л.).

6. Патент № 2790790 C1 Российская Федерация, МПК G01R 31/08. Способ одностороннего определения места повреждения линии электропередачи с использованием её моделей : № 2022115962 : заявл. 14.06.2022 : опубл. 28.02.2023 / М. В. Убасева, В. И. Антонов, А. В. Солдатов [и др.]; заявитель Общество с ограниченной ответственностью научно-производственное предприятие "ЭКРА" (1,85 п.л./0,37 п.л.).

7. Патент № 2775149 C1 Российская Федерация, МПК G01R 31/08. Способ определения места повреждения линии электропередачи с использованием ее модели при двустороннем наблюдении : № 2021132977 : заявл. 12.11.2021 : опубл. 28.06.2022 / М. В. Убасева, В. С. Петров, В. И. Антонов, В. А. Наумов ; заявитель Общество с ограниченной ответственностью научно-производственное предприятие "ЭКРА" (1,62 п.л./0,41 п.л.).

8. Патент № 2737234 C1 Российская Федерация, МПК G01R 31/08. Способ определения мест двойного замыкания на землю в сети с изолированной нейтралью : № 2020111296 : заявл. 18.03.2020 : опубл. 26.11.2020 / М. В. Убасева, В. С. Петров, В. И. Антонов, В. А. Наумов ; заявитель Общество с ограниченной ответственностью научно-производственное предприятие "ЭКРА" (3,47 п.л./0,87 п.л.).

Публикации в других изданиях

9. Fedorov, A. Adaptive Single-End Fault Location Method / A. Fedorov, V. Petrov, *M. Ubaseva* and V. Naumov // 2021 Ural-Siberian Smart Energy Conference (USSEC), 2021, pp. 1-5, – DOI 10.1109/USSEC53120.2021.9655725 (0,58 п.л./0,15 п.л.).

10. *Ubaseva, M.* The Novel Method for Determining Locations of a Double Ground Fault in Networks with Isolated Neutral / M. Ubaseva, V. Petrov and V. Antonov // 2020 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), 2020, pp. 394-399, – DOI 10.1109/UralCon49858.2020.9216306 (0,69 п.л./0,23 п.л.).

11. *Убасева, М. В.* Алгоритмические модели с распределенной структурой для электрической сети / М. В. Убасева // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике: материалы XIV Всероссийской научно-технической конференции, Чебоксары, 6–8 июня 2024 года. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2024. – С. 392-395 (0,23 п.л.).

12. *Убасева, М. В.* Генеральное свойство алгоритмических моделей электрической сети / М. В. Убасева // Энергия Арктики - 2023 : сборник материалов Всероссийской научно-технической конференции, Архангельск, 19–21 декабря 2023 года. – Архангельск: ООО "Консультационное информационно-рекламное агентство", 2024. – С. 65-68 (0,23 п.л.).

13. *Убасева, М. В.* Распознавание слагаемых электрической величины на малом числе отсчетов сигнала / М. В. Убасева, Е. С. Воробьев, В. И. Антонов, А. В. Солдатов // Актуальные проблемы электроэнергетики : Сборник научно-технических статей IX Всероссийской (XLII Региональной) научно-технической конференции, Нижний Новгород, 21 декабря 2023 года. – Нижний Новгород: Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева, 2023. – С. 312-318 (0,41 п.л./0,2 п.л.).

14. *Убасева, М. В*. Распознавание основной гармоники по сигналам от разных измерителей на коротком окне наблюдения / М. В. Убасева, Е. С. Воробьев, А. В. Солдатов, В. И. Антонов // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем: материалы XV Всероссийской научно-технической конференции. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2023. – С. 58-62 (0,29 п.л./0,15 п.л.).

15. *Убасева, М. В.* Распознавание слагаемых электрической величины по измерениям от различных устройств / М. В. Убасева, Е. С. Воробьев, В. С. Петров, В. И. Антонов // Современные тенденции развития цифровых систем С23 релейной защиты и автоматики: материалы науч.-техн. конф. молодых специалистов форума «РЕЛАВЭКСПО-2023». – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2023. – С. 134-139 (0,35 п.л./0,17 п.л.).

16. *Убасева, М. В.* Унификация алгоритмических моделей ЛЭП при одно- и двустороннем наблюдении / М. В. Убасева // Энергия Арктики - 2022 : Сборник материалов Всероссийской научно-технической конференции, Архангельск, 21–23 декабря 2022 года / Сост. Б.Ф. Кузнецов. – Архангельск: Общество с ограниченной ответственностью "Консультационное информационно-рекламное агентство", 2023. – С. 49-52 (0,23 п.л.).

17. Христофоров, В. А. Применение электромагнитного трансформатора тока в волновой РЗА / В. А. Христофоров, *М. В. Убасева*, А. О. Федоров, В. С. Петров // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике: материалы XIII Всероссийской научно-технической конференции, Чебоксары, 03 июня 2022 года. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2022. – С. 396-398 (0,17 п.л./0,08 п.л.).

18. *Убасева, М. В.* Алгоритмическое моделирование поврежденной линии с магнитной связью / Убасева М. В. // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике: материалы XIII всероссийской научно-технической конференции, Чебоксары, 03 июня 2022 года. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2022. – С. 392-395 (0,23 п.л.).

19. *Убасева, М. В.* Двустороннее определение места повреждения ЛЭП по несинхронным измерениям / М. В. Убасева, В. С. Петров, В. И. Антонов // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике : материалы XIII Всероссийской научно-технической конференции, Чебоксары, 03 июня 2022 года. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2022. – С. 388-392 (0,29 п.л./0,15 п.л.).

20. *Убасева, М. В.* Двустороннее определение места повреждения ЛЭП без учета модели короткого замыкания / М. В. Убасева, В. С. Петров // Современные тенденции развития цифровых систем релейной защиты и автоматики : Материалы научно-технической конференции молодых специалистов в рамках форума «РЕЛАВЭКСПО-2021», Чебоксары, 20–22 апреля 2021 года. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2021. – С. 57-60 (0,23 п.л./0,12 п.л.).

21. *Убасева, М. В.* Определение места повреждения ЛЭП при двустороннем наблюдении / М. В. Убасева, В. С. Петров // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем : материалы XIV Всероссийской научно-технической конференции, Чебоксары, 04 июня 2021 года / Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2021. – С. 412-415 (0,23 п.л./0,12 п.л.).

22. *Убасева, М. В.* Определение мест двойного замыкания на землю в сети с изолированной нейтралью / Убасева М.В., Петров В.С., Наумов В.А., Антонов В.И. // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике: материалы XII Всероссийской научно-технической конференции. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2020. С. 407-413 (0,41 п.л./0,21 п.л.).

Личный вклад: Постановка задач исследования и анализ результатов работы обсуждались с научным руководителем. Разработка и реализация методов и моделей выполнялись лично автором. В работах, опубликованных в соавторстве, соискателю принадлежат результаты, которые непосредственно относятся к теме диссертации. Исследования по решению практических задач выполнялись автором лично. Авторские права на изобретения распределены поровну.

УБАСЕВА Мария Витальевна

ЦИФРОВОЕ УСТРОЙСТВО ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА ПОВРЕЖДЕНИЯ ЛЭП НА ОСНОВЕ МОДЕЛЕЙ С ГЕТЕРОГЕННОЙ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СТРУКТУРОЙ

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 15.10.2024 г. Формат 60×84 1/16. Печ. л. 1,25.
Бумага офсетная. Печать оперативная. Тираж 100 экз. Заказ № 1178.

Отпечатано с готового оригинал-макета в типографии
ФГБОУ ВО «ЧГУ им. И.Н. Ульянова»
428015, г. Чебоксары, пр. Московский, д.15