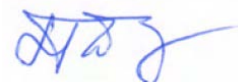


Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
им. Р.Е. Алексева

На правах рукописи



Пелевин Павел Сергеевич

**АВТОМАТИЧЕСКОЕ ПОВТОРНОЕ ВКЛЮЧЕНИЕ
ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ КАБЕЛЬНО-ВОЗДУШНЫХ
ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ С ПРИМЕНЕНИЕМ
ВОЛНОВЫХ МЕТОДОВ**

Специальность 2.4.2 – Электротехнические комплексы и системы

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

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

Нижний Новгород 2023

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|---|----|
| ВВЕДЕНИЕ | 4 |
| 1 АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ АВТОМАТИЧЕСКОГО ПОВТОРНОГО ВКЛЮЧЕНИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА ПОВРЕЖДЕНИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ КАБЕЛЬНО-ВОЗДУШНЫХ ЛЭП..... | 10 |
| 1.1. Классификация видов автоматического повторного включения, особенности автоматического повторного включения кабельно-воздушных ЛЭП | 10 |
| 1.2. Существующие способы селективного автоматического повторного включения кабельно-воздушных ЛЭП | 16 |
| 1.3. Высокочастотные методы определения места повреждения ЛЭП | 27 |
| 1.4. Особенности способов волнового определения места повреждения, применимых на высоковольтных кабельно-воздушных ЛЭП..... | 36 |
| 1.5. Выводы по главе..... | 40 |
| 2 ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ НА ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ КАБЕЛЬНО-ВОЗДУШНЫХ ЛЭП ПРИ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЯХ | 41 |
| 2.1. Методы проводимого исследования и используемые средства | 41 |
| 2.2. Волновые процессы при коротких замыканиях на ЛЭП, особенности процесса на кабельно-воздушных ЛЭП | 41 |
| 2.3. Формирование имитационных моделей ЛЭП для исследования волновых процессов | 45 |
| 2.4. Исследование волновых процессов на имитационной модели КВЛ 220 кВ Тамань – Кафа (Энергомост в Крым), построенной с использованием реальных осциллограмм | 53 |
| 2.5. Выводы по главе..... | 76 |
| 3 РАЗРАБОТКА СПОСОБОВ АВТОМАТИЧЕСКОГО ПОВТОРНОГО ВКЛЮЧЕНИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА ПОВРЕЖДЕНИЯ КАБЕЛЬНО-ВОЗДУШНЫХ ЛЭП, ОСНОВАННЫХ НА КОНТРОЛЕ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ..... | 78 |
| 3.1. Способ определения поврежденного участка кабельно-воздушных ЛЭП, основанный на двусторонних несинхронизированных измерениях амплитуды фронта начальных волн | 78 |
| 3.2. Метод определения поврежденного участка и расстояния до места повреждения кабельно-воздушных ЛЭП с использованием двусторонних синхронизированных измерений времени прибытия фронта начальных волн | 85 |

| | |
|--|-----|
| 3.3. Односторонний способ определения поврежденного участка и расстояния до места повреждения кабельно-воздушных ЛЭП, основанный на распознавании волновых портретов ..88 | 88 |
| 3.4. Алгоритмы цифровой обработки сигналов в задаче автоматического повторного включения и определения места повреждения кабельно-воздушных ЛЭП.....98 | 98 |
| 3.5. Выводы по главе.....105 | 105 |
| 4 ПОЛУНАТУРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ И РЕАЛИЗАЦИЯ СПОСОБОВ АВТОМАТИЧЕСКОГО ПОВТОРНОГО ВКЛЮЧЕНИЯ КАБЕЛЬНО-ВОЗДУШНЫХ ЛЭП, ОСНОВАННЫХ НА ОЦЕНКЕ ВОЛНОВОГО ПРОЦЕССА106 | 106 |
| 4.1. Полунатурные испытания способов автоматического повторного включения и определения места повреждения кабельно-воздушных ЛЭП, основанных на контроле волновых переходных процессов.....106 | 106 |
| 4.2. Реализация способов автоматического повторного включения кабельно-воздушных ЛЭП, основанных на контроле волновых процессов, в опытном устройстве117 | 117 |
| 4.3. Выбор измерительных трансформаторов, обеспечивающих необходимую передаточную характеристику для устройств, реализующих волновые методы125 | 125 |
| 4.4. Выводы по главе.....135 | 135 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....137 | 137 |
| СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ140 | 140 |
| СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ142 | 142 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ А Особенности разработки моделей реальных ЛЭП с использованием осциллограмм аварийных событий с высокой частотой дискретизации157 | 157 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Б Сопоставление реальных сигналов нескольких КЗ на КВЛ 220кВ Тамань-Кафа и сигналов, полученных на имитационной модели КВЛ170 | 170 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ В Функции и алгоритмы программного обеспечения программно-аппаратного комплекса опытного устройства АПВ и ОМП КВЛ.....181 | 181 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Г Вариации корреляционных алгоритмов распознавания волнового портрета при дополнительной предобработке регистрируемого сигнала.....221 | 221 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Д Результаты интеллектуальной деятельности и Акты внедрения....225 | 225 |

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы диссертации. В крупных городах идет тенденция по переносу высоковольтных воздушных линий электропередач (ЛЭП) под землю. При этом, зачастую, линию не делают целиком кабельной, а реализуют кабельную вставку на определенном участке воздушной ЛЭП. В Москве и области находится более 250 кабельно-воздушных ЛЭП (КВЛ) напряжением 110 кВ и выше, в Санкт Петербурге количество таких КВЛ более 100 шт., при этом их количество ежегодно увеличивается. Появляются КВЛ в других городах-миллионниках (Екатеринбург, Нижний Новгород, Новосибирск и др.). Энергомост в Республику Крым, связывающий энергосистему полуострова с ЕЭС России, состоит из четырех КВЛ 220 кВ, в которых кабельный участок пролегает по дну Керченского пролива.

Согласно правил устройства электроустановок (ПУЭ), должно предусматриваться АПВ «...воздушных и смешанных (кабельно-воздушных) линий всех типов напряжением выше 1 кВ. Отказ от применения АПВ должен быть в каждом отдельном случае обоснован...» (ПУЭ, п. 3.3.2). Однако реализуемые на практике алгоритмы АПВ воздушных ЛЭП неэффективны на КВЛ, так как могут приводить к значительным повреждениям и дорогостоящему ремонту кабельной линии (КЛ). Это обусловлено тем, что на высоковольтных кабелях 110 кВ и выше, как правило, отсутствует явление самоустранения повреждения изоляции. Поэтому повторная подача высокого напряжения на поврежденный высоковольтный кабель, проходящий в зоне жилых построек, может привести к существенному ущербу, травмированию и даже гибели людей. Особенно опасна повторная подача напряжения в случае повреждения муфты на переходном пункте ВЛ-КЛ или на участке кабеля вблизи муфты над поверхностью земли.

Таким образом для эффективного АПВ высоковольтных КВЛ необходимо реализовать селективное АПВ. При селективном АПВ КВЛ перед циклом АПВ за время бестоковой паузы определяется поврежденный участок КВЛ и, при определении повреждения на кабеле, АПВ блокируется. В тоже время существующие на текущий момент дифференциальные способы селективного АПВ КВЛ обладают недостатками, снижающими их эффективность. Основные недостатки связаны прежде всего с необходимостью установки дополнительного оборудования как на ПС, так и в месте кабельно-воздушного переходного пункта (трансформаторы тока (ТТ), датчики тока, устройства сбора и передачи информации), организации специального канала связи, что является дорогим решением. При этом число необходимого оборудования прямо пропорционально зависит от числа кабельных участков КВЛ. Надежность таких технических решений снижается с ростом КЛ участков, а технико-экономические затраты на монтаж, наладку и обслуживание увеличиваются. Также на переходном пункте может потребоваться организация питания собственных нужд и обогрева, что приводит к существенному усложнению и удорожанию оборудования ЛЭП.

В связи с этим целесообразен поиск более простых (с точки зрения используемого оборудования) способов АПВ КВЛ, использующих измерения токов и напряжений на концах ЛЭП (на одном или двух). Перспективными являются методы на основе оценки высокочастотных (волновых) составляющих сигналов тока и напряжения.

Отдельным аспектом является задача определения места повреждения (ОМП) КВЛ, поскольку задача определения поврежденного участка КВЛ может быть решена посредством точного ОМП. Методы ОМП по параметрам аварийного режима (ПАР) обладают недостаточной точностью для эффективного применения на КВЛ. А существующие способы одностороннего и двустороннего волнового ОМП, применяющиеся на однородных ЛЭП, не применимы на КВЛ без их переработки и адаптации. Поэтому в диссертационной работе дополнительно рассматриваются способы волнового ОМП, применимые на КВЛ.

Степень разработанности темы исследования. Вопросам АПВ КВЛ в последние годы уделяется все большее внимание как в России, так и в других странах. Существенный вклад в изучение указанной проблемы и разработку способов селективного АПВ и ОМП КВЛ внесли российские ученые и специалисты: Алексеев В.Г., Аржанников Е.А., Дмитриев М.В., Догадкин Д.И., Козлов В.Н., Куликов А.Л., Лачугин В.Ф., Линт М.Г., Лямец Ю.Я., Марин Р.С., Мисриханов М.Ш., Нудельман Г.С., Подшивалин А.Н., Хузяшев Р.Г., Шалыт Г.М., Шуин В.А. и др., а также иностранные ученые: Crossley P.A., Burek A., Felipe V.L., Gilany M.I., Guzman A., Kasztenny B., Klomjijt J., Livani H., Naidu O.D., Sadeh J., Zhentao Xin, и др.

В сложившейся российской исследовательской практике для АПВ КВЛ задача классификации поврежденного участка отделена от задачи ОМП на КВЛ. При этом большинство отечественных технических решений АПВ КВЛ основаны на дифференциальном сравнении сигналов (как правило токов) по концам участков кабельной или воздушной линии.

В иностранных исследованиях по теме АПВ КВЛ основной акцент делается на изучение особенностей волновых переходных процессов на КВЛ и разработке методов, основанных на измерениях параметров высокочастотных сигналов переходных процессов при повреждениях на КВЛ. При этом наблюдается тенденция совмещения задачи определения поврежденного участка для АПВ КВЛ и задачи ОМП на КВЛ. Стоит отметить подробное изучение и освещение вопросов цифровой фильтрации и обработки высокочастотных сигналов в иностранных публикациях. Однако наиболее распространенным подходом к фильтрации высокочастотных сигналов является применение вейвлет-преобразований, что нельзя назвать наиболее оптимальным подходом, из-за большой вычислительной нагрузки подобных алгоритмов.

Обоснование соответствия диссертации паспорту научной специальности 2.4.2 – «Электротехнические комплексы и системы»

Диссертационная работа соответствует формуле специальности, поскольку **объектом исследования** являются электротехнические комплексы высоковольтных (110 кВ и выше) кабельно-воздушных ЛЭП.

Предметом исследования являются способы и устройства селективного автоматического повторного включения высоковольтных кабельно-воздушных ЛЭП с использованием волновых методов.

Представленные в диссертационной работе результаты, отвечают следующим пунктам направлений исследований паспорта научной специальности:

- 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...»;

- п.2. «Разработка научных основ проектирования, создания и эксплуатации электротехнических комплексов, систем и их компонентов»;

- п.3. «Разработка, структурный и параметрический синтез, оптимизация электротехнических комплексов, систем и их компонентов, разработка алгоритмов эффективного управления»;

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

Целью исследования является исследование существующих и разработка новых способов селективного автоматического повторного включения высоковольтных кабельно-воздушных ЛЭП.

Задачи исследования:

1. Сопоставительный анализ современных способов селективного АПВ КВЛ;
2. Имитационное моделирование повреждений на различных элементах электротехнических комплексов КВЛ разной конфигурации с последующим исследованием электромагнитных переходных процессов;
3. Разработка новых методов определения поврежденного участка и реализации селективного АПВ КВЛ;
4. Анализ и синтез алгоритмов цифровой обработки высокочастотных несинусоидальных сигналов при волновых переходных процессах на КВЛ;
5. Апробация разработанных методов определения поврежденного участка КВЛ с использованием имитационного моделирования и реальных осциллограмм;
6. Внедрение новых методов селективного АПВ КВЛ в опытные устройства.

Научная новизна и основные результаты.

1. Разработан новый способ волнового АПВ, отличающийся применением односторонних измерений, формированием волновых портретов повреждения КВЛ и распознаванием волновых портретов с использованием коэффициентов корреляции;

2. Разработан упрощенный способ волнового АПВ, отличающийся использованием двусторонних несинхронизированных измерений амплитуды фронта начальных волн, распространяющихся от места повреждения КВЛ;

3. Предложены методы определения поврежденного участка и места повреждения КВЛ, основанные на двусторонних синхронизированных измерениях, отличающиеся от существующих способов двустороннего волнового ОМП тем, что вначале вычисляется время распространения волны от места повреждения до одного из концов КВЛ с последующей итерационной оценкой вычисленного значения и определением поврежденного участка.

4. Проведены полунатурные испытания разработанных способов АПВ и ОМП КВЛ с использованием сигналов реальных осциллограмм пяти случаев КЗ на комплексе КВЛ 220кВ Тамань-Кафа, полученные результаты испытаний показали высокую эффективность разработанных способов.

Теоретическая и практическая значимость работы. Применение АПВ КВЛ является обязательным и определено ПУЭ. В настоящее время отсутствует техническое решение АПВ КВЛ 110- 500 кВ, принятое (аттестованное) в российской эксплуатационной практике. В крупных городах (мегаполисах) явно прослеживаются тенденции к увеличению доли КВЛ 110-500 кВ, численность которых составляет несколько сотен, все они не соответствуют требованиям ПУЭ.

Ярким примером является Энергомост в Республику Крым, связывающий энергосистему полуострова с ЕЭС России через Краснодарский край, состоит из четырех КВЛ 220 кВ, в которых большая часть кабельного участка пролегает по дну Керченского пролива, при этом длина кабельного участка составляет всего около 7% от полной длины ЛЭП, остальная часть – воздушные линии. Без применения селективного АПВ КВЛ в случае безусловного запрета АПВ КВЛ любое самоустраняемое нарушение изоляции ВЛ приводит к значительному простоя одной из цепи энергомоста, а в случае безусловного разрешения АПВ КВЛ появляется вероятность серьезного повреждения КЛ, дорогостоящего ремонта и еще большего простоя цепи энергомоста.

Разработанные новые способы АПВ КВЛ позволяют без установки оборудования на кабельно-воздушных переходах осуществить надежное селективное АПВ КВЛ.

Методология и методы исследования. Разработанные в диссертации научные положения основываются на комплексе теоретических и экспериментальных достижений в

области теоретических основ электротехники, теории электромагнитных переходных процессов, имитационного моделирования, статистического анализа, цифровой обработки сигналов.

Положения, выносимые на защиту:

1. Односторонний способ волнового АПВ КВЛ, основанный на распознавании волновых портретов;
2. Упрощенный двусторонний способ волнового АПВ КВЛ, основанный на сравнении амплитуд волн по концам КВЛ при отсутствии синхронизации времени;
3. Двусторонний способ волнового АПВ, предполагающий синхронизированные измерения параметров волновых процессов и применимый при произвольном числе участков КВЛ;
4. Результаты имитационных экспериментов и полунатурных испытаний волновых методов АПВ КВЛ.

Степень достоверности и апробация результатов. Проведенные исследования на имитационных моделях, точность которых подтверждена высокой корреляцией модельных и реальных сигналов (значение корреляции составило 0,89), показали, что характер протекания волновых процессов при повреждениях на разных участках КВЛ существенно отличается. Это обуславливает возможность определения поврежденного участка КВЛ путем оценки высокочастотных составляющих сигналов тока и напряжения.

Проведены полунатурные испытания разработанных способов АПВ КВЛ с использованием имитационных моделей действительных ЛЭП и реальных осциллограмм аварийных событий, записанных с высокой частотой дискретизации, которые показали высокую эффективность применения разработанных способов селективного АПВ КВЛ. Поврежденный участок КВЛ во всех случаях определяется однозначно, а ошибка ОМП на воздушном участке КВЛ не превысила 200 м (не более длины одного пролета ЛЭП).

Результаты исследования не противоречат результатам работ других авторов по смежным темам и были представлены автором очно на одной региональной, двух всероссийских и восьми международных конференциях. Результаты исследования внедрены в учебный процесс НГТУ им. Р.Е. Алексеева (г. Нижний Новгород), а также в производственный процесс ООО НПП «ОВИСТ» (г. Москва).

Опубликованные работы. По теме диссертации опубликовано 35 работ. Среди них 10 статей в изданиях, индексируемых в международной реферативной базе данных Scopus, 6 статей в изданиях, входящих в перечень рекомендованных ВАК («Электричество», «Электроэнергия. Передача и распределение», «Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева», «Электроника и электрооборудование транспорта»), 2 патента на изобретение и 1 свидетельство на программу для ЭВМ.

Личный вклад автора. Постановка и формализация задач, разработка теоретических и методических положений, разработка методов АПВ КВЛ, синтез алгоритмов цифровой обработки сигналов, имитационное моделирование повреждений электротехнических комплексов, полунатурные испытания, анализ результатов, а также практические рекомендации.

Структура и объем работы. Работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений, списка использованной литературы и 5 приложений. Работа изложена на 156 страницах основного текста, иллюстрирована на 99 рисунках и 15 таблицах.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-90234\20 «Разработка и опытно-промышленное внедрение программно-аппаратного комплекса селективного автоматического повторного включения высоковольтных кабельно-воздушных линий электропередачи с использованием распознавания быстрых переходных процессов».

В работе также используются результаты, полученные автором в ходе научно-исследовательских работ, выполненных при поддержке:

- Фонда содействия инновациям в рамках конкурса УМНИК-НТИ «Энерджинет», проект: «Разработка устройства автоматического повторного включения кабельно-воздушных линий электропередачи 110-330 кВ на основе применения волновых методов», договор №13111ГУ/2018 от 15.05.2018;

- АНО «Нижегородский НОЦ» в рамках конкурса на финансирование научно-технических проектов участников НОЦ Нижегородской области «Техноплатформа 2035», проект: «Разработка устройств для автоматического повторного включения кабельно-воздушных линий электропередачи 110-500 кВ», договор №16-11-2021/50 от 16.11.2021.

1 АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ АВТОМАТИЧЕСКОГО ПОВТОРНОГО ВКЛЮЧЕНИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА ПОВРЕЖДЕНИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ КАБЕЛЬНО-ВОЗДУШНЫХ ЛЭП

1.1. Классификация видов автоматического повторного включения, особенности автоматического повторного включения кабельно-воздушных ЛЭП

Автоматическое повторное включение (АПВ) линий электропередачи (ЛЭП) за многолетнюю, если не сказать вековую, практику его применения показало свою высокую эффективность и применяется на большинстве воздушных ЛЭП (ВЛ). На кабельных ЛЭП (КЛ) АПВ как правило не применяется, поскольку твердая изоляция кабелей, в отличие от газообразной (воздушной), не восстанавливается самостоятельно и междуфазные повреждения на КЛ 6-35 кВ и все повреждения на КЛ 110кВ и выше являются устойчивыми. Исключения составляют однофазные замыкания на землю в кабелях 6-35кВ с бумажно-пропитанной изоляцией, когда значительная часть таких повреждений на этапе своего становления носит самоустраняющийся характер, однако и в этом случае со временем они принимают вид устойчивого повреждения и для восстановления нормальной работы КЛ необходимы ремонтные работы. Тем не менее АПВ на КЛ 6-35кВ применяется как средство борьбы с неселективными действиями релейной защиты и автоматики (РЗА) [1 – 4].

В диссертационной работе рассматриваются только высоковольтные кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена, используемые в сетях 110 кВ и выше.

1.1.1 Классификация видов автоматического повторного включения

Существующие основные виды АПВ ЛЭП классифицируются следующим образом [1 – 4]:

- По числу отключаемых РЗА фаз:
 - трехфазное АПВ;
 - однофазное АПВ.
- По числу циклов АПВ:
 - АПВ однократного действия;
 - АПВ многократного действия.
- По способу обеспечения (проверки) синхронизма (только для трехфазного АПВ):
 - несинхронное АПВ (АПВ без проверки синхронизма);
 - быстродействующее АПВ (осуществление цикла АПВ за малое время, которого недостаточно для сильного расхождения угла генераторов);
 - АПВ с ожиданием синхронизма;
 - АПВ с улавливанием синхронизма;
 - АПВ с самосинхронизацией генераторов.

Все указанные виды АПВ общеизвестны и подробно изложены в литературе (например, [1 – 4]), поэтому здесь их изложение опускается. В случае с применением АПВ на КВЛ к вышеперечисленным видам АПВ добавляются новые, присущие только АПВ КВЛ, и в этом случае классификация видов АПВ может быть расширена добавлением нового основания:

- По наличию контроля поврежденного участка ЛЭП:
 - Селективное АПВ;
 - Неселективное АПВ.

При селективном АПВ перед циклом включения-отключения определяется поврежденный участок ЛЭП и при определении повреждения на участке, где АПВ запрещено (на кабельном участке), АПВ блокируется. Неселективное АПВ реализуется независимо от поврежденного участка ЛЭП.

1.1.2 Политика в отношении автоматического повторного включения кабельно-воздушных ЛЭП в разных странах

Сложности определения поврежденного участка КВЛ привели к тому, что в мире селективное АПВ применяется далеко не всегда. Согласно опубликованному отчету рабочей группы СИГРЭ [5], посвященного вопросам РЗА смешанных ЛЭП, в общем случае для КВЛ есть три варианта политики в отношении АПВ КВЛ:

1. Безусловное разрешение АПВ (повторное включение КВЛ под напряжение производится вне зависимости от того, относится КЗ к участку ВЛ или КЛ), т.е. применение неселективного АПВ КВЛ;
2. Безусловный отказ от АПВ (повторное включение КВЛ запрещено);
3. Селективное АПВ КВЛ (повторное включение КВЛ производится только тогда, когда КЗ приходится на участок ВЛ).

Преобладающая политика в отношении АПВ КВЛ и преобладающий вид селективного АПВ КВЛ в случае его применения (в соответствии с классификацией п. 1.2), применяемые в отдельных странах на момент 2014 года, показаны в таблице 1.1. [5]

Таблица 1.1 – Преобладающий вид АПВ КВЛ в отдельных странах

| Страна | Преобладающая политика в отношении АПВ КВЛ | Преобладающий вид селективного АПВ КВЛ |
|----------------------------|--|--|
| 1 | 2 | 3 |
| Австралия и Новая Зеландия | Селективное АПВ | Дистанционный (используются зоны дистанционной защиты) |
| Бельгия | Безусловное разрешение АПВ | нет данных |
| Германия | Безусловное разрешение АПВ | Дифференциальный |
| Дания | Безусловное разрешение АПВ | Дифференциальный |

Продолжение таблицы 1.1

| 1 | 2 | 3 |
|------------|----------------------------|--|
| Испания | Безусловное разрешение АПВ | Дистанционный (используются зоны дистанционной защиты) |
| Канада | Селективное АПВ | Дифференциальный |
| Норвегия | Безусловное разрешение АПВ | нет данных |
| Португалия | Селективное АПВ | Дифференциальный |
| Швеция | Селективное АПВ | Дифференциальный |

1.1.3 Требования к автоматическому повторному включению кабельно-воздушных ЛЭП в России

В России на текущий момент трудно выделить преобладающую политику в отношении АПВ КВЛ, поскольку на некоторых КВЛ применяется неселективное АПВ КВЛ с безусловным разрешением АПВ, на некоторых – АПВ запрещено, а статистических исследований на эту тему не проводилось. Тем не менее, с учетом роста числа КВЛ, обусловленного, помимо факторов, указанных во введении, развитием технологий изготовления и прокладки высоковольтных кабелей [6, 7], складывается определенная система требований в отношении АПВ КВЛ. Рассмотрим основные требования в отношении АПВ КВЛ 110кВ и выше, действующие на настоящий момент на территории России.

Согласно правил устройства электроустановок (ПУЭ) [8, п. 3.3.2], «...Должно предусматриваться автоматическое повторное включение: 1) воздушных и смешанных (кабельно-воздушных) линий всех типов напряжением выше 1 кВ. Отказ от применения АПВ должен быть в каждом отдельном случае обоснован...».

Согласно [9], «...На КВЛ напряжением 35 кВ и выше должно применяться АПВ, если кабельные участки используются только для захода в комплектное распределительное устройство с элегазовой изоляцией (КРУЭ). В иных случаях использовать АПВ КВЛ напряжением 35 кВ и выше при отсутствии на них кабельных участков с непосредственным соприкосновением кабелей разных фаз. Наличие на кабельном участке транспозиционных муфт не оказывает влияния на применение АПВ...».

Согласно [10], «...АПВ должно использоваться на КВЛ 110 кВ и выше если кабельные участки используются только для захода КВЛ в РУ (в том числе в КРУЭ), а также в иных случаях при отсутствии на КВЛ 110 кВ и выше кабельных участков (вставок) с непосредственным соприкосновением кабелей разных фаз. Если КВЛ имеют кабельные участки с непосредственным соприкосновением кабелей разных фаз использование АПВ определяется при проектировании...».

В методических указаниях [11] отражены следующие требования при строительстве КВЛ и переустройстве ВЛ в КВЛ:

- «...3.6.1.2. Методические подходы при проектировании... При проектировании ЛЭП 110 кВ и выше, не применять АПВ для следующих типов ЛЭП:

- КВЛ 110 кВ и выше, выполненных маслонаполненным кабелем высокого давления и маслонаполненным кабелем низкого давления, в виду возможности развития аварийных ситуаций с увеличением объемов повреждаемого оборудования и возникновением пожаров;

- КВЛ 110 кВ и выше, выполненных кабелем из сшитого полиэтилена первого поколения, в виду роста фактической повреждаемости кабельных участков, вызванного ускоренным износом изоляции кабеля, связанным с повышенной гигроскопичностью используемого материала...»;

- «...3.6.3.6. Требования по переустройству ВЛ 35-110-220 кВ в КЛ (КВЛ) 35- 110-220 кВ...

...Для КВЛ 110-220 кВ должны предусматриваться устройства определения места повреждения на кабельном или воздушном участке ЛЭП...

...Переустройство ВЛ в КВЛ должно проводиться с учетом возможности избирательной работы АПВ с его срабатыванием при коротком замыкании на воздушном участке и запретом на включение КВЛ при коротком замыкании на кабельном участке...».

Последние положения особенно интересны, поскольку в них прямо говорится о необходимости применения селективного АПВ КВЛ.

1.1.4 Опасность неселективного АПВ КВЛ и виды переходных пунктов КВЛ

Стоит отметить, что применение неселективного АПВ КВЛ опасно по своей сути. Поскольку повторная подача напряжения на поврежденный высоковольтный кабель может привести к существенному ущербу, а в случае пролегания кабеля в жилой зоне – к травмированию и гибели людей. Особенно опасна повторная подача напряжения в случае повреждения кабельной муфты или ограничителя перенапряжения (ОПН) на переходном пункте (ПП) ВЛ-КЛ или на участке кабеля вблизи муфты над поверхностью земли. Как показано в ряде работ [12-14], при КЗ, а также при ударах молнии в воздушный участок на КВЛ могут возникать перенапряжения на обозначенных элементах ПП и с течением времени эксплуатации повышается риск повреждения именно концевых муфт и ОПН.

Для примера на рисунке 1.1 показан ПП ВЛ-КЛ на опоре №15 КВЛ 110 кВ «Канавинская». Как видно из рисунка 1.1 опора ПП расположена на придомовой территории, а надземные участки кабелей, концевые муфты и ОПН находятся в непосредственной близости от пешеходной дорожки и парковочной зоны. В случае повторного включения этой КВЛ при поврежденной муфте или ОПН могут пострадать люди, например, осуществляющие выгул домашних животных

вблизи опоры (как видно из рисунка 1.1, подход к опоре ничем не ограничен), или находящиеся у своего автомобиля, да и просто прохожие на тротуаре. Причем на рассматриваемой КВЛ используется неселективное АПВ с безусловным разрешением АПВ. С учетом вышеизложенного целесообразен повсеместный переход к применению селективного АПВ КВЛ.



Рисунок 1.1 – Переходный пункт ВЛ-КЛ на опоре №15 КВЛ 110 кВ «Канавинская»

Тип ПП, показанный на рисунке 1.1, является довольно распространенным, однако существуют и другие виды ПП. Можно классифицировать существующие типы ПП ВЛ-КЛ по следующим основаниям [15]:

- По характеру установки оборудования:

- Наземные ПП с установкой оборудования на открытой площадке (рисунок 1.2) или в здании;

- ПП с установкой оборудования на опоре, при этом бывают ПП с эксплуатационными площадками (рисунок 1.3) и без таковых (рисунок 1.1).

- По количеству оборудования различного типа:

- Простые ПП, на которых установлены только кабельные концевые муфты и ОПН. Так ПП на рисунках 1.1–1.3 можно по этому признаку отнести к простым;

- Сложные ПП, на которых помимо концевых муфт и ОПН установлено коммутационное и (или) измерительное оборудование, например, датчики тока [16]. Также на таких ПП могут устанавливаться низковольтные шкафы и щиты с оборудованием различного назначения, например, с устройствами измерения и связи, а также с элементами питания собственных нужд. Ярким примером такого типа ПП являются ПП довольно футуристического вида, представленные на рисунке 1.4 [17].

Как будет показано далее при реализации некоторых способов селективного АПВ КВЛ, которым необходимо дополнительное оборудование в местах ВЛ-КЛ перехода, требуется использование сложных ПП.



Рисунок 1.2 – ПП наземного типа на открытой площадке [wikimaria.org]



Рисунок 1.3 – ПП на опоре с эксплуатационной площадкой [www.streamer.ru]



Рисунок 1.4 – Футуристические ПП на опоре с эксплуатационной площадкой сложного типа [www.streamer.ru]

1.2. Существующие способы селективного автоматического повторного включения кабельно-воздушных ЛЭП

Рассмотрим существующие способы селективного АПВ КВЛ.

1.2.1 Классификация способов селективного автоматического повторного включения кабельно-воздушных ЛЭП

Существующие на текущий момент способы селективного АПВ КВЛ можно классифицировать на две большие группы (рисунок 1.5) на основании используемого принципа измерения контролируемых электрических сигналов при определении поврежденного участка [18, 19]:

1. Дифференциальные, определяющие поврежденный участок путем измерения электрических сигналов непосредственно по концам контролируемых зон (участков) КВЛ (как правило реализуют измерения по концам кабельных участков).

2. Дистанционные, основанные на измерении электрических сигналов по одному или двум концам ЛЭП (при этом оценка поврежденного участка может осуществляться путем определения расстояния от места измерений до места повреждения или путем вычисления иных параметров, связанных с поврежденным участком, например, оценка амплитуды сигналов).



Рисунок 1.5 – Классификация методов селективного АПВ КВЛ

Дифференциальные методы разделяются на:

- а) Основанные на контроле токов в фазах;
- б) Основанные на контроле токов в экранах кабелей.

Дистанционные методы разделяются на:

а) Пассивные, при которых производятся измерения «естественных» электрических сигналов без влияния на них, разделяются на:

- Односторонние;
- Двусторонние (или многосторонние, например, при большом числе ответвлений ЛЭП).

Двусторонние методы разделяются на методы с синхронизацией времени и методы без синхронизации времени.

б) Активные, при которых производятся измерения искусственных электрических сигналов (например, активное зондирование).

1.2.2 Дифференциальные методы

Дифференциальные методы основаны на сравнении сигналов (как правило токов) по концам кабельных или воздушных участков. Существующие способы АПВ КВЛ используют измерения по концам кабельных участков.

Рассмотрим технические решения, которые относятся к виду АПВ КВЛ, при котором определение поврежденного участка КВЛ осуществляется путем сравнения фазных токов по концам кабельных участков КВЛ.

Одним из таких способов является зарубежное техническое решение [20], использующее специальные оптические датчики тока (ДТ), принцип работы которых основан на эффекте Фарадея. Оптический сигнал, содержащий информацию об измеряемом токе, с датчиков поступает в соединительные коробки и по специальной волоконно-оптической линии связи (ВОЛС) передается на главное электронно-оптическое устройство (специальный терминал РЗ), расположенное на ПС. Схема, поясняющая идею способа показана на рисунке 1.6. На основе этого технического решения был реализован пилотный проект в Новой Зеландии компанией Smart Digital Optics (является филиалом компании ARTECHЕ в Австралии) [21].

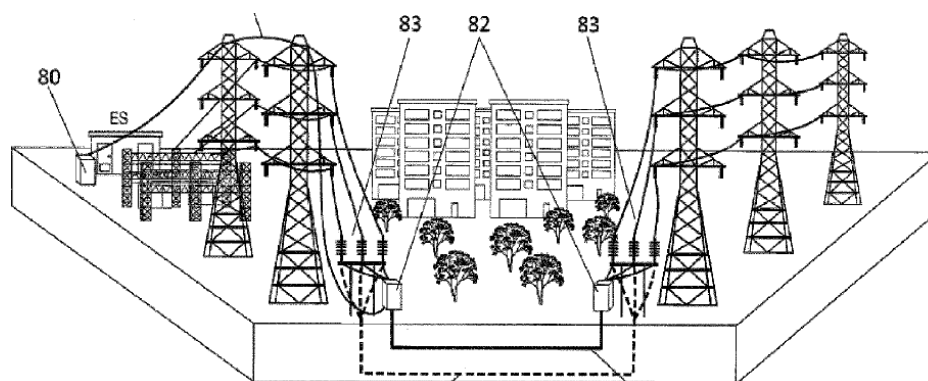


Рисунок 1.6 – Поясняющая схема дифференциального способа АПВ КВЛ (измерения фазных токов) [20]

Другим способом АПВ КВЛ, относящимся к рассматриваемому виду АПВ КВЛ (т.е. АПВ КВЛ, основанное на сравнении фазных токов по концам кабельных участков КВЛ), является отечественное техническое решение [22, 23]. Структурная схема способа показана на рисунке 1.7. В этом техническом решении используются электромагнитные трансформаторы тока (ТТ), закрепляемые поверх изоляции силового кабеля (пофазно) под концевой муфтой. К ТТ подключаются терминалы специального исполнения (на рисунке 1.7 имеют обозначение «ДТ»), которые передают информацию о токах по специальному каналу связи (как указано в описании

способа, могут использоваться различные виды связи) на главное устройство, установленное на ПС. При обнаружении повреждения в зоне КЛ АПВ блокируется. А при обнаружении повреждения в зоне ВЛ запускается устройство ОМП методом активного зондирования. Если КЗ устойчивое, то АПВ также блокируется. Этот способ АПВ КВЛ прошел эксплуатационные испытания на КВЛ 110 кВ Костино-Горенки с отпайкой на ПС «Балашиха».

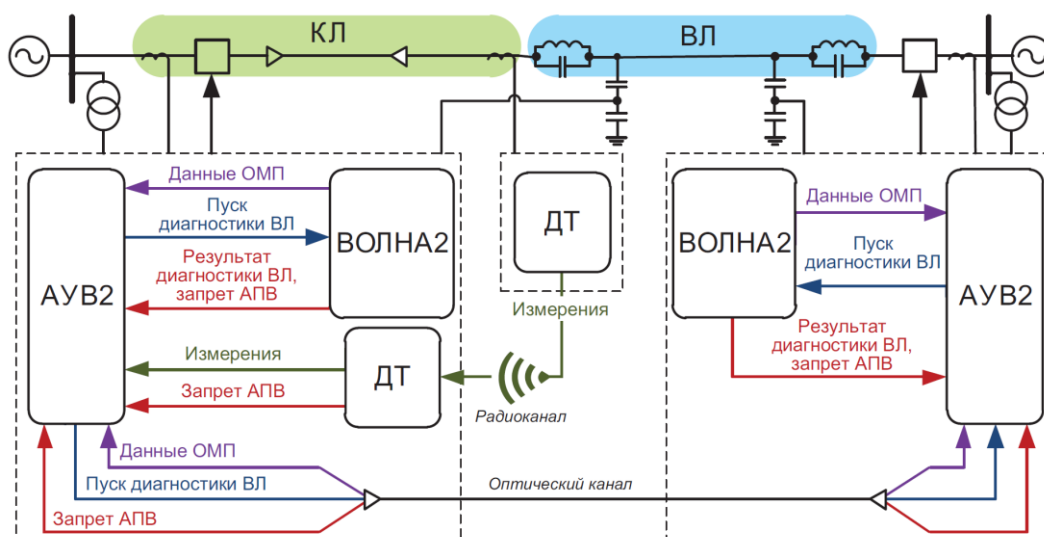


Рисунок 1.7 – Структурная схема дифференциального способа АПВ КВЛ (измерения фазных токов [23])



Рисунок 1.8 – ТТ с размыкаемым сердечником, подключенные поверх кабеля и поверх проводника заземляющего устройства [23]

Дифференциальный метод с контролем токов в фазах, подобный вышеприведенным, рассмотрен зарубежными исследователями в статье [24].

Основное преимущество рассмотренных выше методов – практически абсолютная селективность определения повреждения на кабеле внутри контролируемой зоны (между ТТ, установленными по концам кабеля). Однако в случае установки ТТ поверх кабеля как на рисунке 1.8 повреждения концевой муфты не входят в контролируемую зону и АПВ не будет заблокировано, что очень опасно. Однозначно решить эту проблему возможно лишь при

установке ТТ на воздушном участке вблизи концевой муфты, что приводит к применению более сложных и дорогих ТТ и усложнению переходного пункта ВЛ-КЛ.

К другому виду дифференциального АПВ КВЛ, при котором определение поврежденного участка КВЛ осуществляется путем сравнения токов в экранах кабелей, относится отечественное техническое решение [25-27]. На рисунках 1.9 и 1.10 показаны структурные схемы при различном заземлении экранов кабеля. В рассматриваемом способе используются трансформаторы тока, устанавливаемые на заземлителях экранов кабелей (САПВ-Д). Вторичный сигнал ТТ подается на измерительное устройство (САПВ-И). Измерительные устройства одного кабельного участка подключаются «врасщечку» оптоволоконной петли, подключенной к оптическому каналу (ОК) центрального устройства системы селективного АПВ (САПВ-Ц), установленного на ПС. Для каждого кабельного участка КВЛ используется своя оптоволоконная петля. САПВ-Ц на выходе оптического канала формирует непрерывный световой поток. САПВ-И прерывает световой поток при превышении значения суммарного тока, стекающего с экранов трех фаз в месте заземления, значения уставки. При повреждениях на воздушном участке оптический сигнал не прерывается, а при повреждениях на кабельном участке сигнал прерывается и АПВ КВЛ блокируется. Этот способ АПВ КВЛ прошел эксплуатационные испытания на КВЛ 500 кВ Очаково-Западная.

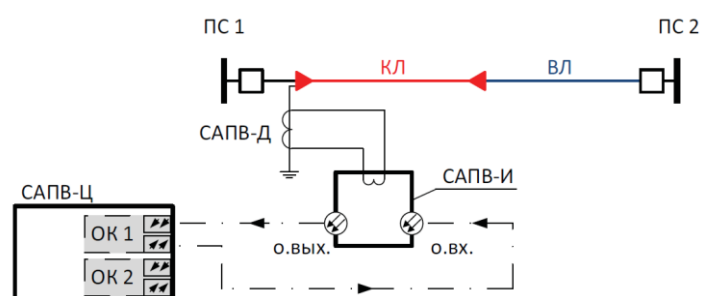


Рисунок 1.9 – Структурная схема дифференциального метода (контроль тока в экранах кабеля) при одностороннем заземлении экрана

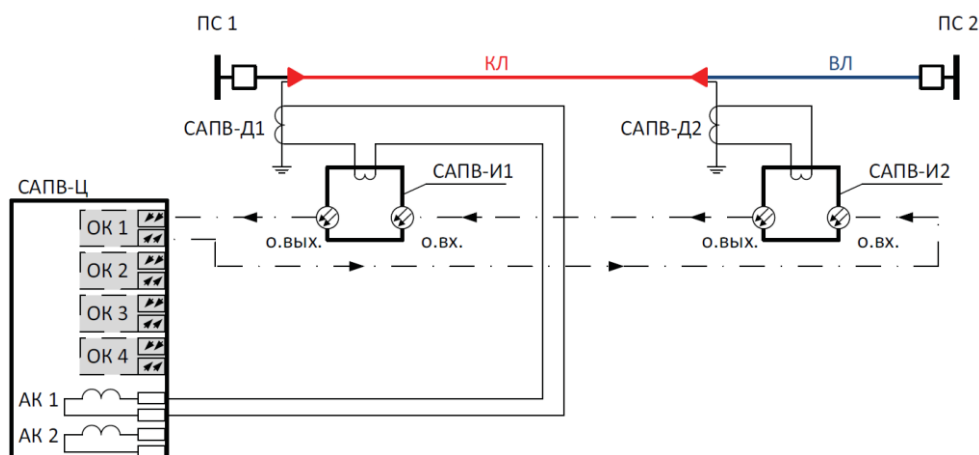


Рисунок 1.10 – Структурная схема дифференциального метода (контроль тока в экранах кабеля) при двустороннем заземлении экрана

Основное преимущество рассмотренного метода – абсолютная селективность определения повреждения на кабеле. Однако, как и в случае предыдущих рассмотренных способов стоит сделать оговорку. Не вполне очевидно, как будет работать система в случае повреждения концевой муфты, поскольку на текущий момент нет опытных данных на сей счет.

Преимуществом дифференциальных способов селективного АПВ КВЛ можно назвать практически абсолютную селективность определения поврежденного участка и применимость для КВЛ с любым числом участков КЛ. Основные недостатки связаны прежде всего с усложнением ПП ВЛ-КЛ из-за необходимости установки дополнительного оборудования в месте кабельно-воздушного перехода (ГТ, датчики тока, устройства сбора и передачи информации), а также с необходимостью организации связи между всеми измерительными устройствами на ПП и главным устройством селективного АПВ на ПС. Такая связь может быть реализована посредством ВОЛС, встроенной в грозозащитный трос ВЛ (также могут использоваться ВОЛС иных типов, применяемые на ВЛ), и ВОЛС, встроенной в КЛ или же прокладываемой вместе с КЛ. Также на переходном пункте КЛ-ВЛ может потребоваться организация питания собственных нужд и обогрева, что приводит к еще большему усложнению и удорожанию оборудования ЛЭП. Еще одной особенностью дифференциальных способов является пропорциональная зависимость числа необходимого оборудования от числа кабельных участков КВЛ. Все указанные выше обстоятельства ведут к увеличению затрат и снижению общей надежности электротехнического комплекса АПВ КВЛ.

Более выгодными с точки зрения технико-экономических затрат на монтаж, наладку и обслуживание являются дистанционные методы АПВ КВЛ.

1.2.3 Дистанционные методы

Дистанционные методы АПВ КВЛ по своему принципу действия характеризуются тем, что измерения контролируемых сигналов осуществляются не на концах КЛ или ВЛ участков, а по концам КВЛ на ПС. По типу контролируемых сигналов дистанционные методы классифицируются на пассивные и активные. В пассивных методах контролируются естественные токи и напряжения переходного процесса при повреждении КВЛ (например, [28 – 33]). При этом решение о поврежденном участке может приниматься по рассчитываемому расстоянию до места повреждения или путем применения иных алгоритмов определения поврежденного участка.

Для простейшей реализации одностороннего дистанционного пассивного принципа возможно использовать измерительные органы (ИО) дистанционной защиты [5]. Однако такой способ обладает рядом существенных недостатков, основным из которых является блокирование АПВ на большей части воздушных участков ввиду необходимости отстройки уставок

срабатывания ИО из-за их недостаточной точности. Среди прочих недостатков можно также выделить зависимость от переходного сопротивления в месте КЗ.

Другим направлением, позволяющим исключить указанные недостатки, является использование методов контроля волновых переходных процессов и волнового ОМП [28 – 33], имеющих большую точность. Именно такие методы и способы будут рассматриваться далее.

Примером пассивного метода АПВ КВЛ на основе волнового ОМП, адаптированного для работы на КВЛ, является способ с использованием двусторонних синхронизированных измерений [28, 29]. Рассчитанное расстояние до места повреждения используется для принятия решения о запрете или разрешении цикла АПВ. Подобные двусторонние методы АПВ КВЛ обладают преимуществами по сравнению с дифференциальными, связанными с независимостью от конфигурации КВЛ, поскольку количество используемого оборудования не зависит от количества и удаленности кабельных вставок. Количество необходимого оборудования также невелико по сравнению с дифференциальными методами и устанавливается только на ПС, поэтому нет проблем с усложнением ПП. Однако среди недостатков можно выделить неполную селективность из-за необходимости отстройки по длине блокируемой зоны, необходимость наличия канала связи между ПС с низкой задержкой передачи данных, а также организации точной синхронизации по времени между устройствами (как правило синхронизация реализуется через навигационные спутниковые системы). Указанный метод волнового ОМП более подробно изложен в п. 1.4.

Другим примером дистанционных способов АПВ КВЛ являются способы дистанционного пассивного АПВ КВЛ на основе контроля волновых процессов, разработанные в ходе научно-исследовательской работы [30 - 33]. Основная идея при их разработке была следующей.

Ввиду наличия на КВЛ кабельно-воздушных переходов, при распространении по КВЛ электромагнитных волн возникают многократные переотражения и в контролируемых сигналах появляются дополнительные высокочастотные составляющие. Эти составляющие содержат в себе информацию как о поврежденном участке КВЛ, так и о месте повреждения. Проведенные исследования на достоверных имитационных моделях показали, что характер протекания волновых процессов при повреждениях на разных участках КВЛ существенно отличается. Это делает возможным определение поврежденного участка КВЛ путем распознавания (или классификации) сигналов тока и напряжения переходного процесса.

В разработанном способе одностороннего дистанционного АПВ КВЛ [30 - 31] используются измерения только на одной ПС и применен принцип распознавания образов. Сущность метода заключается в цифровой фильтрации сигналов тока или напряжения переходного процесса и формировании волнового портрета (понятие волнового портрета раскрыто в главе 2). Который затем сравнивается с эталонными портретами, полученными

заранее с применением имитационного моделирования повреждений на конкретной КВЛ. При этом используется корреляционная обработка сигналов. Этот способ раскрыт в главе 3.

Основным преимуществом этого способа по сравнению с остальными методами АПВ КВЛ является отсутствие необходимости установки дополнительного силового оборудования, использования каналов связи и оборудования связи. Как будет показано далее, независимо от конфигурации КВЛ, используя такой способ, достаточно одностороннего замера, чтобы с достаточной точностью и надежностью распознать поврежденный участок. Также новый метод применим для целей волнового одностороннего ОМП на ЛЭП любой конфигурации. Таким образом применяя этот способ одно устройство может выполнять как функции АПВ КВЛ, так и функции волнового ОМП. Основными недостатками являются относительно большая вычислительная нагрузка на устройство из-за применения более сложных алгоритмов цифровой обработки сигналов, а также необходимость создания точной модели КВЛ.

Воплощением другого подхода к решению задачи селективного АПВ КВЛ, основанного на контроле электромагнитного волнового процесса, является способ с использованием двусторонних несинхронизированных измерений [32 - 33]. Принцип работы основан на простом факте, что электромагнитные волны, распространяясь от места повреждения по ЛЭП с неоднородными участками (такими, как КВЛ), подвергаются дополнительному затуханию, связанному с рассогласованностью волновых сопротивлений разных участков. В зависимости от поврежденного участка КВЛ и места повреждения электромагнитные волны претерпевают различное затухание на пути к ПС и месту измерения. Поэтому, измерив и оценив амплитуду фронта волнового сигнала по концам ЛЭП, можно косвенно определить поврежденный участок. В соответствии с предложенной реализацией способа [33] вычисляется отношение сигналов токов или напряжений по двум концам КВЛ, что позволяет практически селективно определить поврежденный участок. Способ обладает теми же преимуществами и недостатками, что и двусторонний метод с использованием синхронизированных измерений, за исключением отсутствия необходимости организации точной синхронизации по времени между устройствами, за счет чего надежность схемного решения увеличивается. Этот способ раскрыт в главе 3.

Общим недостатком всех дистанционных пассивных методов селективного АПВ КВЛ является необходимость запрета АПВ на некотором участке ВЛ вблизи ВЛ-КЛ перехода, связанная с введением запаса по длине из-за погрешности используемых методов. Однако при применении волновых методов этот участок не превышает нескольких сотен метров (1-2 пролета ВЛ). При этом однозначно блокируется АПВ при повреждении концевой муфты КЛ или ОПН.

К активным методам дистанционного селективного АПВ КВЛ относятся такие, при которых в линию или в отдельный ее участок посылаются специальные сигналы, а контроль

поврежденного участка осуществляется через параметры искусственного сигнала (наличие, отсутствие, энергия сигнала, время отражения импульса и т.д.).

Примером активных методов является способ АПВ КВЛ с индуцированием наложенного сигнала в экран кабеля [34]. Согласно способу к экрану кабеля со стороны подстанции через специальный индуктивный трансформатор подключается генератор колебаний. В экран индуцируется сигнал на выбранной частоте кратных высших гармоник. Таким образом на экране кабеля образуется наложенное электрическое колебание. В нормальном режиме функционирования КВЛ и при внешних (вне кабельного участка) повреждениях отсутствует контур для протекания тока и наложенное напряжение вне экрана кабеля практически не индуцируется. Напротив, при повреждении изоляции кабеля и замыкании токопроводящего сердечника кабеля на экранирующий проводящий слой наложенное колебание распространяется на поврежденную фазу и может быть измерено на подстанции устройством РЗА (при этом необходима достаточно высокая частота дискретизации аналого-цифрового преобразования (АЦП) устройства, например, 80–256 отсчетов на период промышленной частоты).

Стоит отметить, что с увеличением частоты наложенного колебания сопротивление внешней системы увеличивается, поэтому целесообразно измерять напряжение наложенного сигнала вместо тока. При этом частота сигнала ограничивается полосой пропускания ТН и частотой дискретизации цифрового устройства РЗА. Из недостатков такого способа можно отметить необходимость использования специального генератора и ограничение по конфигурации КВЛ (только конфигурации «КЛ-ВЛ» и «КЛ-ВЛ-КЛ»).

1.2.4 Сопоставление методов селективного автоматического повторного включения кабельно-воздушных ЛЭП

Сопоставим разные методы селективного АПВ КВЛ, рассмотренные выше.

Для сравнения методов АПВ КВЛ с точки зрения надежности технического решения целесообразно рассмотреть соответствующие схемные решения (или иначе – ЭТК) АПВ КВЛ [35-37]. Поскольку оценка надежности алгоритмов определения поврежденного участка затруднительна и зависит от учета частных случаев и вероятностей их событий, то оцениваться способы АПВ КВЛ будут по сочетанию элементов, составляющих ЭТК АПВ КВЛ. Для проведения такой оценки на рисунках 1.11–1.13 изображены схемные решения АПВ КВЛ для трех конфигураций КВЛ: «КЛ+ВЛ», «ВЛ+КЛ+ВЛ», «КЛ+ВЛ+КЛ». На рисунках 1.11–1.13 показаны дифференциальные методы АПВ КВЛ (а, б) и дистанционные: пассивные (в, г, д) и активный (е). Методы АПВ КВЛ приведены на рисунках в порядке их изложения в тексте. При этом в случае конфигурации КВЛ «ВЛ+КЛ+ВЛ» дистанционный активный метод [34] нецелесообразно применять ввиду сложности организации передатчика на КЛ–ВЛ переходе, отстоящем от ПС.

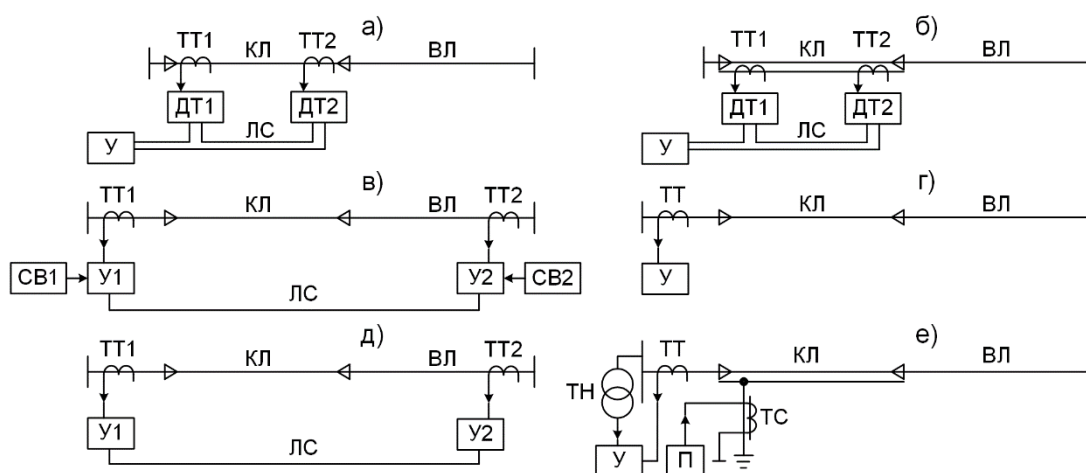


Рисунок 1.11 – ЭТК АПВ КВЛ в случае конфигурации КВЛ «КЛ+ВЛ»

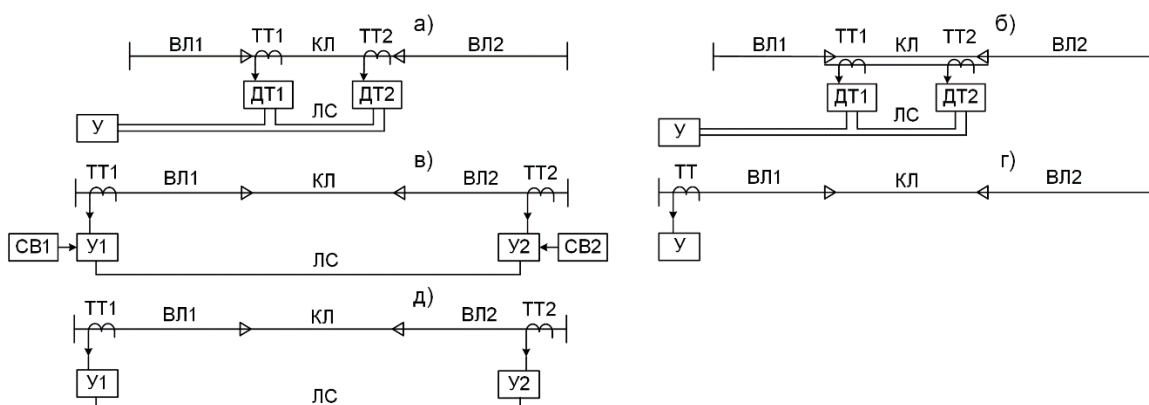


Рисунок 1.12 – ЭТК АПВ КВЛ в случае конфигурации КВЛ «ВЛ+КЛ+ВЛ»

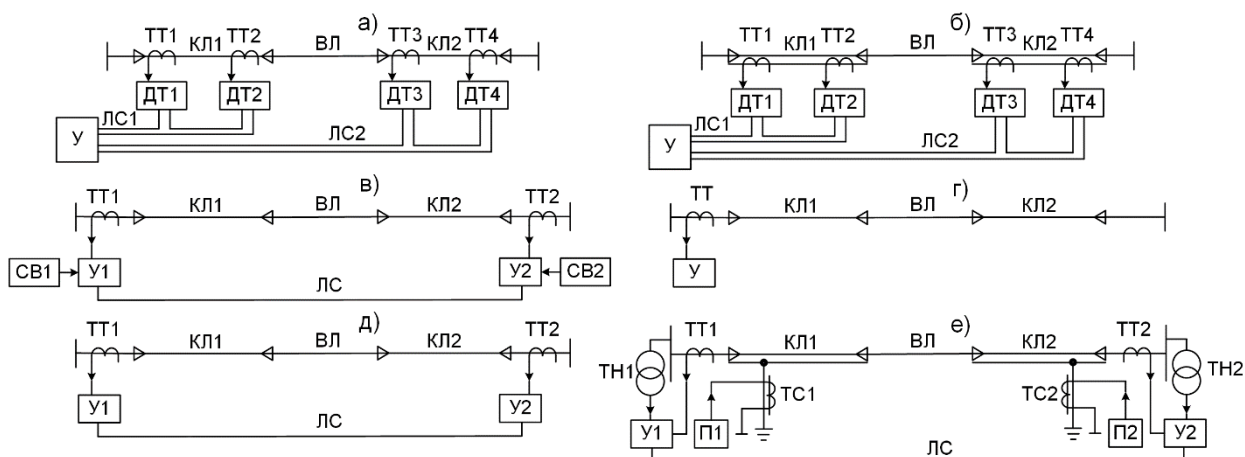


Рисунок 1.13 – ЭТК АПВ КВЛ в случае конфигурации КВЛ «КЛ+ВЛ+КЛ»

На рисунках 1.11–1.13 приняты следующие обозначения: ДТ – датчик тока (устройство измерения, обработки и передачи сигнала); У – основное устройство АПВ КВЛ; ЛС – линия связи; П – передатчик (генератор наложенного сигнала); ТС – трансформатор специального сигнала; СВ – устройство синхронизации времени.

Запишем выражения вероятности безотказной работы для схемных решений АПВ КВЛ (рисунки 1.11–1.13, а–е). При этом считаем, что с точки зрения надежности элементы схемы соединены последовательно. Также допускаем, что элементы независимы по отказам. Тогда для схем на рисунках 1.11–1.13, а–е можно записать выражения 1.1–1.14.

Для конфигурации КВЛ «КЛ+ВЛ»:

$$P_{cx.a,\delta} = P_Y \cdot P_{TT1} \cdot P_{TT2} \cdot P_{DT1} \cdot P_{DT2} \cdot P_{ЛС}; \quad (1.1)$$

$$P_{cx.в} = P_{Y1} \cdot P_{Y2} \cdot P_{TT1} \cdot P_{TT2} \cdot P_{CB1} \cdot P_{CB2} \cdot P_{ЛС}; \quad (1.2)$$

$$P_{cx.г} = P_Y \cdot P_{TT}; \quad (1.3)$$

$$P_{cx.д} = P_{Y1} \cdot P_{Y2} \cdot P_{TT1} \cdot P_{TT2} \cdot P_{ЛС}; \quad (1.4)$$

$$P_{cx.e} = P_Y \cdot P_{TT} (P_{TH}) \cdot P_{П} \cdot P_{ТС}. \quad (1.5)$$

Для конфигурации КВЛ «ВЛ+КЛ+ВЛ»:

$$P_{cx.a,\delta} = P_Y \cdot P_{TT1} \cdot P_{TT2} \cdot P_{DT1} \cdot P_{DT2} \cdot P_{ЛС}; \quad (1.6)$$

$$P_{cx.в} = P_{Y1} \cdot P_{Y2} \cdot P_{TT1} \cdot P_{TT2} \cdot P_{CB1} \cdot P_{CB2} \cdot P_{ЛС}; \quad (1.7)$$

$$P_{cx.г} = P_Y \cdot P_{TT}; \quad (1.8)$$

$$P_{cx.д} = P_{Y1} \cdot P_{Y2} \cdot P_{TT1} \cdot P_{TT2} \cdot P_{ЛС}; \quad (1.9)$$

Для конфигурации КВЛ «КЛ+ВЛ+КЛ»:

$$P_{cx.a,\delta} = P_Y \cdot (P_{TT1} \cdot P_{TT2} \cdot P_{DT1} \cdot P_{DT2})^2 \cdot P_{ЛС1} \cdot P_{ЛС2}; \quad (1.10)$$

$$P_{cx.в} = P_{Y1} \cdot P_{Y2} \cdot P_{TT1} \cdot P_{TT2} \cdot P_{CB1} \cdot P_{CB2} \cdot P_{ЛС}; \quad (1.11)$$

$$P_{cx.г} = P_Y \cdot P_{TT}; \quad (1.12)$$

$$P_{cx.д} = P_{Y1} \cdot P_{Y2} \cdot P_{TT1} \cdot P_{TT2} \cdot P_{ЛС}; \quad (1.13)$$

$$P_{cx.e} = P_{Y1} \cdot P_{Y2} \cdot (P_{TT} (P_{TH}) \cdot P_{П} \cdot P_{ТС})^2 \cdot P_{ЛС}. \quad (1.14)$$

Анализируя рисунки 1.11–1.13 и выражения 1.1–1.14 можно заметить, что количество оборудования при реализации дифференциальных методов, а также вероятность отказа больше, чем при реализации дистанционных, если принять вероятность безотказной работы однотипных элементов одинаковыми. Также можно заметить, что в случае дистанционных методов АПВ КВЛ (рисунки 1.11–1.13, в-д), за исключением активного метода АПВ КВЛ с индуцированием сигнала в экран кабеля (рисунки 1.11, е и 1.13, е), число элементов не изменяется при увеличении числа кабельных участков. Напротив, в случае дифференциальных методов (рисунки 1.11–1.13, а-б) число оборудования растет пропорционально числу кабельных участков, а вероятность безотказной работы снижается.

Далее проведем общее сравнение преимуществ и недостатков различных методов АПВ КВЛ, используя следующие обобщенные критерии оценки. В качестве таких критериев при оценке используются параметры, характеризующие качественные и количественные показатели, напрямую влияющие на качество работы оцениваемых методов, на технико-экономические затраты при их реализации, а также на надежность эксплуатации. К таким параметрам относятся:

- Универсальность;

- Точность (селективность);
- Техничко-экономические затраты на реализацию: количество устройств, необходимость каналов связи, необходимость установки дополнительного силового оборудования и т.д.;
- Вероятность отказа системы селективного АПВ КВЛ;
- Вычислительная сложность алгоритмов и др.

Основные преимущества и недостатки рассмотренных выше методов селективного АПВ КВЛ сведены в сравнительную таблицу 1.2. При этом дистанционный активный метод АПВ КВЛ не сопоставляется в таблице.

Таблица 1.2 – Таблица сравнения методов АПВ КВЛ

| Дифференциальные методы | Дистанционные двусторонние методы | Дистанционный односторонний метод |
|---|--|--|
| 1 | 2 | 3 |
| Универсальность | | |
| 1) Подходят для разных конфигураций, но меняется число оборудования; 2) Есть зависимость от типа заземления экрана (в случае применения метода контроля тока в экранах кабеля) | 1) Подходят для разных конфигураций КВЛ, за исключением коротких кабельных заходов на ПС, при которых их применение нецелесообразно; 2) Число оборудования не зависит от конфигурации КВЛ | |
| Селективность | | |
| Абсолютная (АПВ на ВЛ не блокируется вовсе) | Относительная (необходима небольшая отстройка от КЗ на кабельно-воздушном переходе) | |
| Необходимость в дополнительном оборудовании | | |
| - Оборудование ПП (трансформаторы (датчики) тока, устройства связи, устройства обогрева и питания); - Каналы связи между оборудованием ПП и ПС | - Канал связи между ПС; - Устройства синхронизации (для метода с использованием синхронизированных измерений) | Нет |
| Количество устройств АПВ | | |
| 1 центральное и 1-2 измерительных (в зависимости от конфигурации КВЛ и заземления экрана КЛ) на каждый кабельный участок | 2 устройства | 1 устройство |

Продолжение таблицы 1.2

| 1 | 2 | 3 |
|---|---|--|
| Схемная надежность системы АПВ КВЛ | | |
| 1) Зависит от двух устройств АПВ КВЛ; 2) Зависит от всех используемых устройств и оборудования ПП; 3) Зависит от надежности каналов связи между ПП и ПС | 1) Зависит от двух устройств АПВ КВЛ; 2) Зависит от надежности канала связи между ПС (и надежности синхронизации времени); | 1) Зависит от единственного устройства АПВ КВЛ |
| Зависимость от конфигурации КВЛ | | |
| Да | Нет | Нет |
| Требования к АЦП устройств АПВ КВЛ | | |
| Стандартные требования как к устройствам РЗА (например, согласно МЭК 61850) | Повышенные (аналогично устройствам волнового ОМП) | |
| Вычислительная нагрузка алгоритмов | | |
| Малая | Малая | Высокая |

Стоит отдельно отметить, что при применении дистанционных методов, при КЗ вблизи ПП на участке ВЛ длиной несколько сотен метров (1-2 пролета) АПВ блокируется. Что с одной стороны является недостатком, но в то же время с другой стороны становится преимуществом. Поскольку гарантированно обеспечивается блокирование АПВ при повреждении кабельной муфты, которая является одним из наиболее повреждаемых элементов КЛ [38].

На основании проведенного сопоставления и оценки методов АПВ КВЛ можно сделать предварительный вывод о том, что именно дистанционные методы АПВ КВЛ представляют наибольшую перспективу для их дальнейшего развития. Поскольку требуют меньших затрат, а также представляются более надежными с точки зрения технической реализации. Стоит также отметить, что развитие волновых методов АПВ и ОМП КВЛ позволяет в дальнейшем использовать алгоритмы оценки сигналов для развития перспективных волновых устройств РЗА.

1.3. Высокочастотные методы определения места повреждения ЛЭП

В этом пункте проводится анализ методов волнового ОМП, основных проблем и задач, связанных с их реализацией на КВЛ. Стоит отметить следующие преимущества волновых (высокочастотных) методов по сравнению с методами, основанных на оценке сигналов

промышленной частоты и низкочастотных гармонических составляющих. На работу волновых методов практически не оказывает влияние насыщение трансформаторов тока, в то время как методы по ПАР могут дать категорически неверную оценку [39]. Также волновые методы нечувствительны к отклонениям параметров качества электрической энергии, в том числе к отклонению частоты, поэтому могут применяться в сетях с большой долей распределенной генерации [40].

1.3.1 Классификация методов определения места повреждения ЛЭП

Как уже отмечалось выше, для дистанционных методов АПВ КВЛ в качестве измерительных органов, определяющих поврежденный участок, можно использовать алгоритмы ОМП. При этом существует достаточно большое количество различных методов ОМП. По очевидным соображениям будут рассматриваться только дистанционные методы ОМП. Рассмотрим основные существующие на текущий момент дистанционные методы ОМП.

Отечественными и зарубежными исследователями уже проделана большая работа по исследованию и классификации методов ОМП [41 – 52]. На рисунке 1.14 представлена обобщенная классификация с целью показать основные особенности рассматриваемых методов, а также показать соотношение существующих и предлагаемых методов.

Прежде всего методы ОМП разделяют на высокочастотные и методы ОМП по параметрам аварийного режима (ПАР). Методы ОМП по ПАР основаны на использовании величин тока и напряжения промышленной частоты, а также гармонических составляющих до нескольких кГц [53]. В связи с недостатками таких методов, в первую очередь – относительно большой погрешностью, а также зависимостью от режима сети, эти методы не будут рассматриваться.



Рисунок 1.14 – Классификация дистанционных методов ОМП

Высокочастотные методы (анализ сигналов на частоте выше 10 кГц) можно разделить на:

1. Пассивные (волновые);
2. Активные;
3. Методы, основанные на решении математических уравнений применяемых моделей.

Пассивные или волновые методы основаны на измерении волновых составляющих (импульсов) тока и напряжения, вызываемые повреждением, или коммутационным аппаратом [54 – 56].

К активным методам относятся методы активного зондирования, которые основаны на оценке параметров распространения по проводам ЛЭП искусственного импульса [41, 49, 57–60].

Также отдельным классом выделяют методы, основанные на использовании различных математических моделей линий, и решении уравнений, как правило дифференциальных, что позволяет определить место повреждения. Например, в [61] предлагается метод, основанный на использовании уравнений, отражающих распространение волн по линии, для расчета места повреждения. Место повреждения определяется путем итерационного расчета амплитуды сигнала (в частотной области) в предполагаемом месте повреждения с использованием замеряемого сигнала тока или напряжения. Предполагаемое (расчетное) место повреждения (расстояние от шин выбранной подстанции) меняется с выбранным шагом и вычисляется амплитуда контролируемого сигнала. Местом повреждения считается точка, в которой амплитуда сигнала больше.

1.3.2 Волновые методы определения места повреждения

Существует два основных подхода волнового ОМП (далее ВОМП): односторонний, при котором используется измерение сигнала только на одном конце ЛЭП, и двусторонний, при котором используются измерения на обоих концах ЛЭП. Прежде чем рассматривать эти два подхода, следует кратко изложить особенности протекания волнового процесса.

В момент, когда нарушается изоляция линии и происходит замыкание фазы (фаз) на землю, быстрый разряд поврежденных проводов вызывает почти мгновенное изменение потенциала проводов в месте повреждения. Это приводит к возникновению электромагнитной волны, распространяющейся в обоих направлениях от повреждения к концам линии со ступенчатым фронтом [62]. Когда волна достигает некоторой неоднородности на пути распространения (шины подстанции, отпайка, кабельно-воздушный переход, пункт транспозиции и т.д.), то некоторая часть её энергии проходит за границу неоднородности, а другая часть отражается обратно в линию. Таким образом, вместо одной исходной появляются две новые волны (в случае с шинами ПС, количество волн равно количеству присоединений ЛЭП), распространяющиеся в разных направлениях. Когда одна из волн достигает другой неоднородности, включая место повреждения, появляются еще две новые волны, как и в предыдущем случае. Через некоторое время уже много волн независимо друг от друга распространяются в разных направлениях по электрической сети. Стоит отметить, что на ПС часть энергии фронта волны также передается через трансформатор. Однако на частотах выше 10 кГц эта часть крайне мала и ей можно пренебречь при рассмотрении высокочастотного

волнового процесса в сети, содержащей поврежденную ЛЭП. Междофазное замыкание вызывает аналогичный переходный процесс, но с некоторыми отличиями, заключающимися в основном в другом начальном перераспределении заряда проводов и в распространении волн по другим волновым каналам [62, 63].

Процесс распространения волн при повреждении проиллюстрирован на лестничной диаграмме (рисунок 1.15), которую можно использовать для пояснения различий между двумя основными технологиями ВОМП.

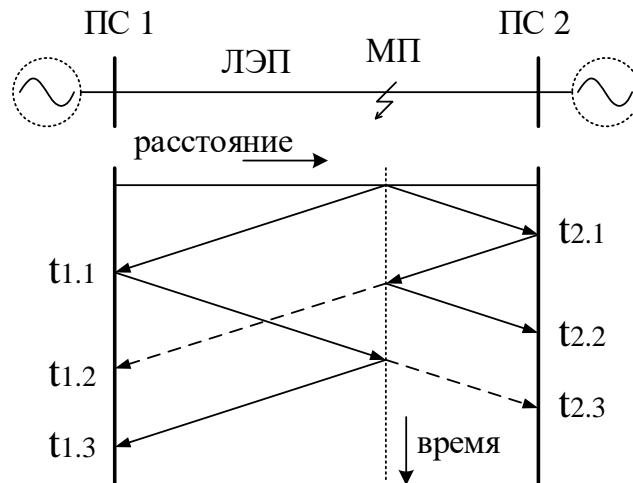


Рисунок 1.15 – Лестничная диаграмма распространения волн (МП – место повреждения)

Самый распространенный двусторонний метод ВОМП основан на вычислении расстояния до места повреждения на основе разности времен прибытия волн по концам линии, при этом, как правило, используются только первые волны, пришедшие к концам ЛЭП ($t_{1.1}$ и $t_{2.1}$ на рисунке 1.15). Устройства двустороннего ВОМП обнаруживают эти первые волны и фиксируют время их прибытия по обоим концам ЛЭП. Затем устройства вычисляют расстояние до места повреждения по разнице времен прихода первых волн на двух концах линии. Благодаря своему принципу работы устройства двустороннего ВОМП не требуют сложных алгоритмов цифровой обработки сигналов (ЦОС), поскольку нужно только правильно определить начальное время высокочастотного возмущения в сигнале. Однако требуется синхронизация времени между устройствами ВОМП, точность и надежность которой определяет точность и надежность ОМП.

В методах одностороннего ВОМП в отличие от двусторонних, используются измерения только на одном конце ЛЭП, поэтому не требуются канал связи и синхронизация времени между устройствами ВОМП, установленными на разных ПС. Точность таких методов не зависит от точности синхронизации времени и на практике может быть выше точности двусторонних методов ВОМП с синхронизированными измерениями. Поэтому методы одностороннего ВОМП считаются очень перспективными многими исследователями и разработчиками [64].

Существующие методы одностороннего ВОМП можно разделить на две основные группы, реализующие:

1. Определение расстояния до МП путем обработки сигналов, с целью обнаружения не только первой пришедшей волны, но и последующих отраженных волн (например, $t_{1.2}$ и $t_{1.3}$ на рисунке 1.15) [65]. Наиболее распространен алгоритм, использующий разность времен прихода первой волны ($t_{1.1}$, рисунок 1.15) и первой отраженной от МП волны ($t_{1.3}$, рисунок 1.15). Стоит отметить, что необходимость обнаружения и оценки не только первой волны, но и отраженных волн в сигнале требует использования более сложных алгоритмов ЦОС.

2. Определение расстояния до МП по разности времен прихода волн в разных волновых каналах (обычно сравнивают сигналы в междуфазном и земляном волновых каналах) [44]. Такой метод отличается простотой, однако одним из основных недостатков является использование земляного волнового канала, который отличается большей зависимостью волновых параметров от внешних условий (изменение и неоднородность сопротивления почвы, емкостей линии относительно земли при изменении стрелы провеса и при гололедообразовании и т.д.) [66];

3. Определение расстояния до МП на основе анализа спектра сигнала при переходном процессе [67, 68].

Стоит отметить, что в диссертационной работе предложен новый метод, который можно отнести к четвертой группе (тем самым расширив классификацию), реализация которого связана с определением расстояния до МП на основе распознавания волнового портрета [69], а не определения времен прихода отдельных отраженных волн. Этот метод изложен в главе 3.

Наибольшее распространение на настоящий момент получили методы одностороннего ВОМП первой группы. Поэтому рассмотрим этот принцип подробнее. На рисунке 1.16 изображена лестничная диаграмма распространения волн по участку электрической сети, содержащему рассматриваемую линию (ВЛ1) и смежные линии.

Также на рисунке 1.16 изображен обработанный фильтром верхних частот сигнал тока при некоторых заданных коэффициентах отражения по концам линий. Подобный сигнал можно назвать волновым портретом. Расстояние до МП вычисляется в этом конкретном случае согласно выражению (1.15).

$$L_{МП} = \frac{(t_5 - t_1)}{2} \cdot v, \quad (1.15)$$

где: $L_{МП}$ – расстояние до места повреждения (КЗ); v – групповая скорость распространения волн по линии ВЛ1.

Как видно из рисунка 1.16 для правильной работы метода необходимо выделить отраженные от МП волны среди всей совокупности волн, формируемых от различных неоднородностей в сети. В рассматриваемом случае отраженная от МП волна должна быть

одинаковой полярности с первой, поэтому необходимо отличить волны, пришедшие в моменты времени t_4 и t_5 .

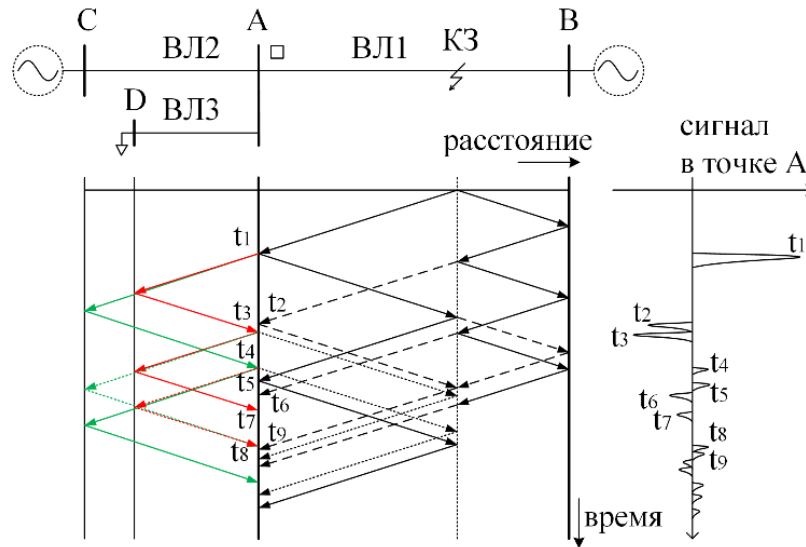


Рисунок 1.16 – Лестничная диаграмма распространения волн по участку сети и характер сигнала в точке замера

Одним из подходов является выделение падающих и отраженных волн, согласно выражениям (1.16-1.17) [65].

$$S_1(t) = u(t) - z_{\text{в}} \cdot i(t); \quad (1.16)$$

$$S_2(t) = u(t) + z_{\text{в}} \cdot i(t), \quad (1.17)$$

где: S_1 – отраженная волна (движущаяся от противоположного конца линии); S_2 – падающая волна (движущаяся к противоположному концу линии); $Z_{\text{в}}$ – волновое сопротивление линии.

При выводе выражений (1.16-1.17) принято положительное направление тока от шин ПС в линию. При таком подходе оцениваются только волны, пришедшие со стороны защищаемой линии. Возможны различные способы такой оценки, например, известен подход, при котором производится вычисление кросскорреляции между первой падающей волной (S_2) и сигналом (S_1) на выбранной длительности окна данных. Вывод о расстоянии до МП осуществляется по времени наибольшего положительного пика корреляционной функции. Кросскорреляционная функция для двух дискретных сигналов в этом случае имеет вид [65]:

$$R_{S_1 S_2}(n) = \frac{1}{N} \cdot \sum_{k=1}^N ([-S_2(k)] \cdot [S_1(k+n)]), \quad (1.18)$$

где: N – длительность записи первого импульса сигнала S_2 (несколько микросекунд); n – текущий отсчет дискретного сигнала.

Знак минус перед сигналом S_2 необходим, поскольку отраженная и падающая волны напряжения имеют разную полярность.

На рисунке 1.17 изображены отфильтрованный сигнал тока (а), выделенные падающая и отраженная волны (б), а также ненормированная кросскорреляционная функция (в) при КЗ на расстоянии 32 км от шин ПС1 (рисунок 1.18). При определении МП следует интервал времени анализа сигнала ограничить, например, значением 2τ (где τ – время распространения волн по линии). Как видно из рисунка 1.17 рассматриваемый метод позволяет определить время прихода нужной волны тока.

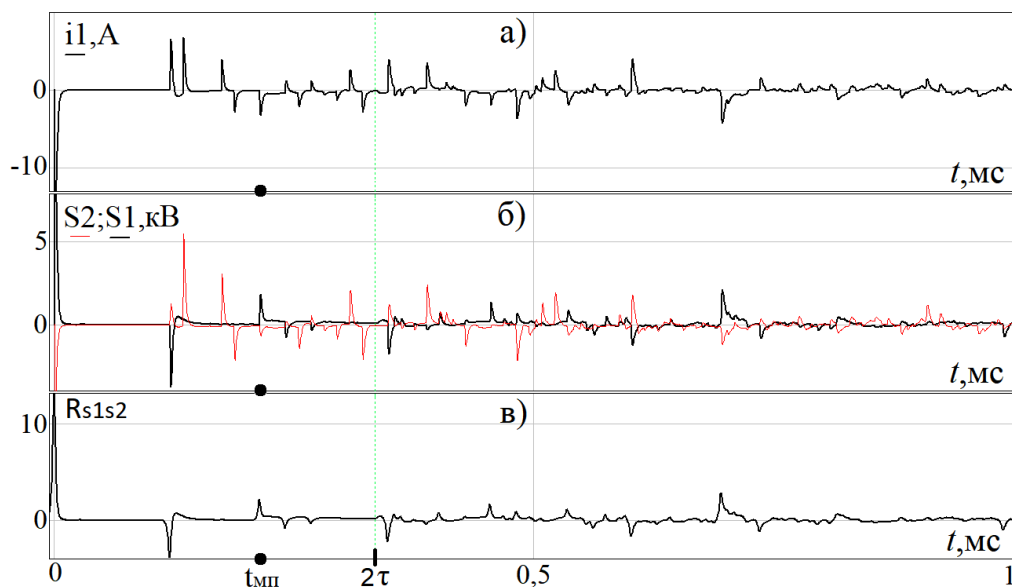


Рисунок 1.17 – Сигналы тока (а), падающих и отраженных волн (б), корреляционная функция (в) при КЗ на расстоянии 32 км шин ПС

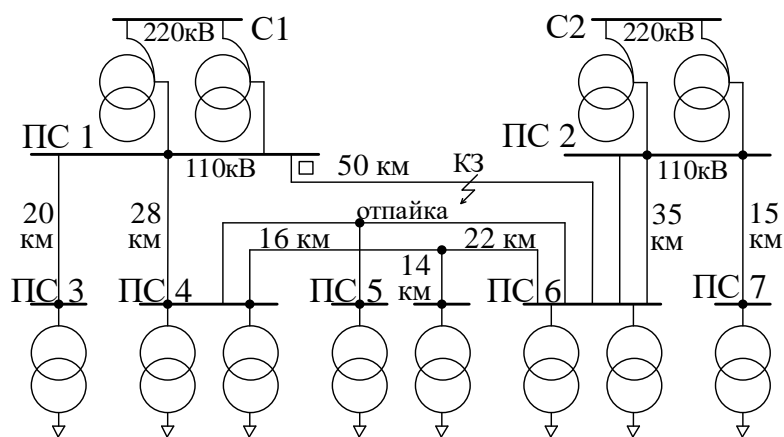


Рисунок 1.18 – Некоторый участок электрической сети 110 кВ

Известен и несколько другой подход, рассмотренные в работах [70, 71], при котором также вычисляются падающие и отраженные волны, производится фильтрация и вычисляется функция кросскорреляции этих двух сигналов на всем интервале времени анализа сигналов (например 2τ). Значение временного сдвига сигналов, при котором достигается максимум корреляции, соответствует удвоенному времени распространения от КЗ до места измерения. Такой подход решает задачу обнаружения отраженной от места КЗ волны.

Однако вышеизложенный метод ВОМП с выделением падающих и отраженных волн

имеет недостатки. Основным является необходимость использования в вычислениях, как сигнала тока, так и сигнала напряжения, при этом к ним предъявляются одинаковые требования по качеству. Однако частотные характеристики трансформаторов напряжения (ТН) и ТТ как правило существенно отличаются и сигналы тока и напряжения имеют разное искажение, что ухудшает возможность выделения падающих и отраженных волн. Поэтому целесообразно оценивать только один сигнал: ток или напряжение. При этом во многих научных работах отмечается, что частотные характеристики большинства измерительных ТН не соответствуют требуемым для выделения волновых составляющих (полоса пропускания ограничена единицами кГц) [63, 72]. Поэтому более перспективным подходом является оценка только сигнала тока. Это обусловлено тем, что ТТ, в отличие от ТН, как правило обладают достаточно широкой полосой пропускания, ограниченной верхней частотой от нескольких десятков, до нескольких сотен кГц [63, 72]. Поэтому большее развитие получили методы ОМП на основе оценки только одной физической величины, например, тока.

Зарубежными авторами был предложен метод ВОМП [72] с использованием только сигналов тока. При КЗ сигнал тока фильтруется специальным дифференциальным-сглаживающим фильтром и формируется (записывается) волновой портрет заданной длительности. Затем по пиковым значениям сигнала определяется время прихода каждой волны, её амплитуда и знак. После такой обработки сигнала производится выбор волн необходимой полярности и достаточной амплитуды исходя из предположения, что фронт волны, отраженной от места повреждения, одной полярности с фронтом первой волны. Затем формируется первая гипотеза, что искомая волна является первой в последовательности. Исходя из этого, задается МП и определяется ожидаемое время прихода волн, отраженных от разных концов линии с учетом скорости распространения волн и предполагаемого МП. Затем суммируется количество волн в замеренном портрете, попадающих в ожидаемые интервалы времени. В последующем формируется новая гипотеза, что вторая волна в последовательности является искомой, и процедура итерационно повторяется. После выполнения итерационных действий сравнивается количество совпадений ожидаемых и замеренных волн для каждой гипотезы. Выбирается та гипотеза, которой принадлежит больше совпадений ожидаемых и обнаруженных в реальном сигнале волн. Этой гипотезе соответствует искомое МП.

Особенностью и достоинством такого подхода является использование при ВОМП множества волновых составляющих в сигнале тока. Однако принципы сравнения, используемые в процедуре ВОМП, задаются вручную и ограничены по используемой в них информации. Также при искажениях сигнала и при наличии помех затруднительна процедура обнаружения и фиксации времени появления фронтов волн в сигнале.

Рассмотренные выше односторонние методы ВОМП на КВЛ не могут применяться

напрямую, поскольку от места ВЛ-КЛ перехода волны отражаются подобно тому, как отражаются от места повреждения, что может привести к неправильной оценке МП.

1.3.3 Двусторонние методы определения места повреждения ЛЭП

В методах двустороннего ВОМП, в отличие от односторонних, используются измерения на обоих концах ЛЭП, поэтому для реализации таких методов требуется канал связи, а зачастую и синхронизация времени между устройствами ВОМП, установленными на разных ПС.

Существующие методы двустороннего ВОМП можно разделить на две основные группы, реализующие:

1. Определение расстояния до МП путем фиксации времени прибытия первых (начальных) волн от места КЗ к концам ЛЭП ($t_{1.1}$ и $t_{2.1}$ на рисунке 1.15). При этом для реализации методов ВОМП такого типа требуется синхронизация времени на устройствах, установленных по разным концам ЛЭП. Наиболее распространен алгоритм, при котором расстояние до места повреждения рассчитывается по выражению:

$$L_{КЗ} = \frac{L_{ЛЭП}}{2} \cdot \left(1 + \frac{t_{1.1} - t_{2.1}}{\tau_{ЛЭП}} \right) \text{ или } L_{КЗ} = \frac{1}{2} \cdot (L_{ЛЭП} + (t_{1.1} - t_{2.1}) \cdot v_{ЛЭП}) \quad (1.19)$$

где $L_{ЛЭП}$ – полная длина линии, км; $t_{1.1}$ и $t_{2.1}$ – время прихода начальной волны к местам измерений «1» и «2» соответственно, мкс; $\tau_{ЛЭП}$ – полное время распространения волн по линии, мкс; $v_{ЛЭП}$ – скорость распространения волн по линии, мкс.

2. Определение расстояния до МП по разности времен прихода волн в разных волновых каналах по концам ЛЭП. Например, в работе [73] рассматривается метод двустороннего ВОМП на основе измерения разности времени прихода волновых составляющих в междуфазном и земляном волновых каналах по двум концам ЛЭП. Особенность этого метода в том, что для него не требуется задание параметров ЛЭП, при этом метод применим только на однородных ВЛ.

В большинстве работ, посвященных методам двустороннего ВОМП первого типа, задачу синхронизации времени предлагается решать с использованием сигналов спутниковой навигационной системы, однако есть и другие способы. Например, в работе [74] предложен двусторонний метод ВОМП не использующий синхронизацию времени в привычном понимании. Вместо этого используется канал связи типа точка-точка с малой и постоянной (неизменной) задержкой времени передачи сигналов. Установленное на одном из концов ЛЭП устройство, обнаружив первую волну, отправляет логический сигнал на другой конец ЛЭП и одновременно начинает отсчет времени. Получив аналогичный сигнал обнаружения волны от устройства на удаленном конце ЛЭП, счетчик времени останавливается. Значение счетчика времени корректируется с учетом известной задержки передачи сигнала по каналу связи между устройствами ВОМП и используется для расчета МП по известному выражению (1.19).

Стоит отметить, что большинство работ по теме ВОМП посвящены автоматическим

методам, которые реализуются устройствами ВОМП на ПС, объединенных каналами связи. Однако в некоторых работах предлагаются подходы с полуавтоматическими методами ВОМП, в которых устройства ВОМП лишь регистрируют переходный процесс и записывают осциллограммы с высокой частотой дискретизации, а расчет МП производит оператор вручную или с использованием специализированного программного обеспечения [75-77].

Большинство методов двустороннего ВОМП, как и вышеперечисленные методы одностороннего ВОМП, основаны на предположении, что линия относительно однородная (относительно неизменная скорость распространения волн вдоль всей линии). Однако на линиях с неоднородными участками, в частности на КВЛ, когда неоднородность участков очень высока (скорость распространения волн по КЛ и ВЛ отличается более чем в 1.5 раза), такие методы без определенных изменений, которые отражены в следующем пункте, не могут применяться из-за возможных больших погрешностей оценки МП [78].

1.4. Особенности способов волнового определения места повреждения, применимых на высоковольтных кабельно-воздушных ЛЭП

1.4.1 Методы двустороннего (многостороннего) волнового определения места повреждения

Зарубежными исследователями был представлен метод двустороннего ВОМП [29, 79, 80], адаптированный для применения на неоднородных линиях, в частности на КВЛ. На рисунке 1.19 показана схема, поясняющая принцип адаптированного для КВЛ двустороннего метода ВОМП. Для линии определенной конфигурации составляется временная характеристика распространения волны вдоль длины КВЛ («реальная линия» на рисунке 1.19). Характеристика имеет несколько участков с соответствующими длиной (LL_i) и временем распространения волны (τ_i). Также определяется условная прямолинейная характеристика, соответствующая абстрактной однородной линии той же длины, что и действительная линия, у которой время распространения волн равно сумме времен распространения каждого из участков реальной смешанной линии (однородная линия на рисунке 1.19). Вычисление расстояния до места повреждения осуществляется в следующей последовательности [29]:

1) Рассчитывается расстояние до места повреждения условной однородной линии (M^*) согласно известному выражению для обычных однородных линий (1.19).

2) Рассчитывается время распространения (t^*), соответствующее расстоянию до места повреждения (M^*), полученному с допущением однородности линии;

3) Рассчитывается действительное расстояние до места повреждения (M), соответствующее времени распространения (t^*), используя характеристику распространения реальной линии («реальная линия» на рисунке 1.19).

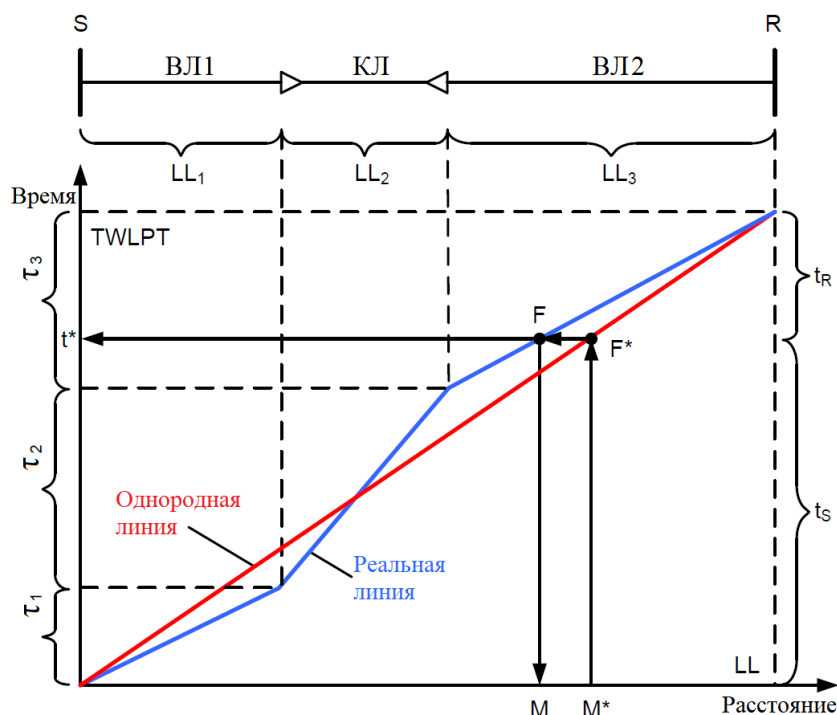


Рисунок 1.19 – Схема, поясняющая двустороннее волновое ОМП для АПВ КВЛ [29]

Рассчитанное расстояние до места повреждения используется для принятия решения о запрете или разрешении цикла АПВ. Авторами [29] предложен следующий алгоритм адаптивного (селективного) АПВ КВЛ (рисунок 1.20). Рассчитываемое место повреждения (МП) подается на входы элементов сравнения, где проверяется попадание места повреждения в зону блокирования АПВ (элементы сравнения и элемент «И»), задаваемую уставками: уставка начала первой зоны блокирования (УЗБ1_Н) и уставка конца первой зоны блокирования (УЗБ1_К). Далее сигнал подается на элемент «ИЛИ», на который также подаются сигналы попадания места повреждения в другие зоны блокирования (при нескольких кабельных участках). При попадании места повреждения хотя бы в одну зону блокирования подается сигнал на блокирование АПВ.

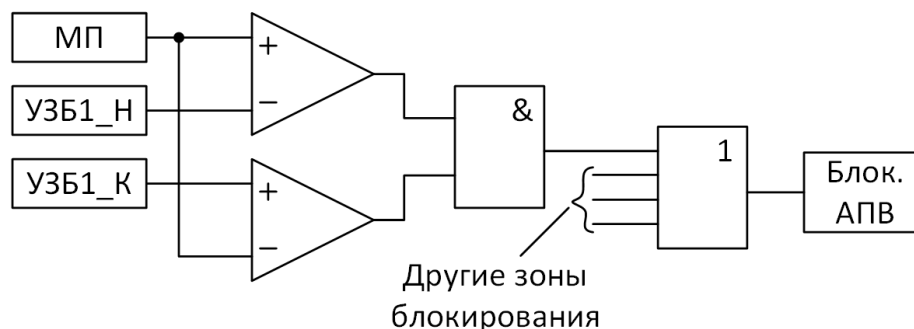


Рисунок 1.20 – Логика работы адаптивного АПВ на основе двустороннего ОМП

При выборе уставок зон блокирования необходимо, как рекомендуют сами авторы [29], принимать некоторый запас по расстоянию для того, что бы не допустить разрешение АПВ при повреждении на кабельном участке из-за ошибки ОМП. При этом необходимо учитывать полную

погрешность ОМП (погрешность алгоритма, погрешность синхронизации времени, погрешность детектора времени прихода волны, отклонение параметров линии и т.д).

Российскими исследователями предложен подобный метод двустороннего ВОМП, учитывающий наличие неоднородных участков КВЛ [81, 82]. В этом методе для учета разной скорости волны на различных участках КВЛ используется так называемая *эпюра* расчетной разности времени распространения фронтов волн к концам линии – зависимость значения разности времени от координаты МП на ЛЭП ($\Delta t = f(x)$, где $\Delta t = t_{1.1} - t_{2.1}$ по выражению 1.19), подобная характеристике реальной линии на рисунке 1.19 (ломаная синяя линия). Расстояние до МП находится сопоставлением реальной измеренной разности времени прихода фронтов электромагнитных волн к концам КВЛ с расчетной характеристикой (эпюрой), иными словами – по обратной функции $x = f^{-1}(\Delta t)$. Рассчитанное расстояние до МП может быть использовано для принятия решения о запрете или разрешении цикла АПВ также, как и в предыдущем методе.

В других работах [83, 84] предложен алгоритм двустороннего ВОМП при котором не строятся характеристики, как в двух предыдущих методах. Вместо этого используется специальное выражение, по которому рассчитывается расстояние до МП при заданном номере поврежденного участка. Поскольку поврежденный участок заранее не известен, авторы алгоритма предлагают итерационно рассчитывать расстояние до МП последовательно для каждого возможного поврежденного участка. Каждое рассчитанное таким образом значение расстояния до МП проходит проверку попадания в диапазон значений длины, соответствующий текущему предполагаемому поврежденному участку КВЛ. В случае удовлетворения заданному условию расчет останавливается и выдается итоговая оценка МП (последнее рассчитанное значение МП) и поврежденного участка КВЛ. Аналогичный алгоритм также рассматривается в зарубежной работе [85].

Стоит отметить, что в главе 3 диссертационной работы предложен подобный алгоритм, который позволяет решить задачу АПВ и ОМП КВЛ с использованием более простых расчетных формул и с меньшим количеством вычислений.

Рассмотренные методы двустороннего ВОМП, основанные на оценке времени прибытия волн от МП к концам ЛЭП, достаточно просто реализовать в связи с небольшим отличием от существующих методов двустороннего ВОМП для однородных ЛЭП. Дополнительные действия, которые необходимо выполнить, достаточно просты и не требуют большой вычислительной мощности, поэтому эти методы представляют большой интерес для применения на КВЛ.

Зарубежными исследователями в работах [86, 87] предложен метод двустороннего ВОМП с синхронизированными измерениями. Метод основан на использовании выборок сигналов тока и напряжения с двух концов ЛЭП, которые используются для решения математической модели ЛЭП с использованием гиперболических функций. Метод применим для КВЛ, однако гораздо

сложнее методов ВОМП, основанных на оценке времени прихода волн, и при этом обладает аналогичной точностью и надежностью.

В работе [88] предложен метод двустороннего комбинированного АПВ и ОМП КВЛ, сочетающий ОМП по ПАР и двусторонние ВОМП. Комбинированная схема заключается в том, что дополнительно к двустороннему ВОМП используются зоны дистанционной защиты. При попадании в зоны, которые однозначно относятся к ВЛ участкам (при условии необходимой отстройки) АПВ не блокируется, а при попадании в зоны, которые относятся как к КЛ, так и к ВЛ участкам (зона неопределенности), АПВ производится по результатам двустороннего ВОМП аналогично методу, рассмотренному выше [29]. Методы комбинирования традиционных и волновых измерительных органов РЗ рассматриваются и в других работах [89-92].

В работе [93] представлен метод многостороннего (трехстороннего) ВОМП, использующий синхронизированные измерения, подобный методу в работе [29], но применимый только на ЛЭП с КЛ отпайкой на некотором расстоянии.

Метод двустороннего ВОМП на КВЛ с использованием несинхронизированных измерений предложен в [94]. Однако метод применяется только для ОМП на КЛ участке и не может быть применен для определения поврежденного участка.

1.4.2 Методы одностороннего волнового определения места повреждения

В работах [95 – 97] предложено оценивать поврежденный участок КВЛ по энергии сигнала, обработанного с применением вейвлет-преобразования [98], а после определения поврежденного участка реализуется ОМП по заданным соотношениям с использованием отраженных волн. Причем в [95] энергия сигнала сравнивается с заданной уставкой, а в [96, 97] используется процедура классификации по методу опорных векторов.

Метод опорных векторов также применен в работе [99], однако в отличие от предыдущего метода здесь используется специальное преобразование и вычисляются несколько параметров, которые используются при применении процедуры классификации.

В ряде других работ [100 – 102] измеряемый сигнал проходит цифровую обработку, в результате которой формируется дискретный сигнал, содержащий отдельные дельта-импульсы, амплитуда и полярность которых соответствует фронтам первой и отраженных волн. Затем выделяются импульсы определенной амплитуды и полярности, по которым реализуется ОМП.

Недостатком вышеперечисленных методов является сложность выделения конкретных фронтов волн на фоне различных помех и других фронтов "ненужных" отраженных волн, а также применимость лишь на определенных конфигурациях КВЛ, за счет чего эти методы ограничены в их применении.

Стоит отметить, что в диссертационной работе предложен новый метод одностороннего замера. Он основан на измерении контролируемого сигнала в течении определенного времени,

за которое регистрируется множество фронтов волн. Такой подход, при котором формируется полноценный волновой портрет (временная последовательность высокочастотных составляющих фронтов волн) в течении заданного времени (окна данных), который затем подвергается цифровой обработке сигналов перспективен. Поскольку таким образом используется дополнительная информация отраженных волн от различных неоднородностей электрической сети. Таким образом из-за избыточности информации практически исключаются возможные ошибки, что позволяет повысить надежность и точность ОМП. При этом существенно увеличить степень использования информации, заключенной в волновом портрете, позволяют специальные методы распознавания образов и, в частности, корреляционная обработка сигналов. Более подробное изложение предлагаемого подхода дано в главе 3.

1.5. Выводы по главе

1. АПВ КВЛ 110 кВ и выше является важной задачей для электрических сетей мегаполисов, не имеющей устоявшегося технического решения. Показана целесообразность повсеместного перехода к применению селективного АПВ КВЛ.

2. Проведена классификация способов селективного АПВ КВЛ по принципу действия, рассмотрены конкретные технические решения. На основе проведенного сравнительного анализа можно заключить, что дифференциальные способы АПВ КВЛ целесообразно использовать при конфигурациях КВЛ «КЛ-ВЛ» и «КЛ-ВЛ-КЛ» с кабельными участками относительно небольшой длины при заходе на распределительное устройство ПС. Для конфигураций КВЛ, при которых кабельные участки отстоят от ПС, а также с кабельными заходами на ПС значительной длины (несколько сотен метров и более) и где переходный пункт ВЛ-КЛ находится вне территории ПС применение дифференциальных методов нецелесообразно, за исключением отдельных частных случаев слишком сложной конфигурации КВЛ, когда дистанционные методы могут быть малоэффективны.

3. Дистанционные пассивные методы АПВ КВЛ целесообразно применять в большинстве вариантов конфигураций КВЛ. В случае относительно коротких КЛ участков отдельные пассивные дистанционные методы АПВ КВЛ могут быть неэффективными, поэтому перспективно совмещение нескольких способов, использующих различные информативные признаки волнового процесса.

4. В результате проведенной классификации и оценки существующих способов и методов АПВ и ОМП КВЛ можно сделать вывод об актуальности разработки и реализации новых методов АПВ и ОМП КВЛ на основе цифровой обработки волновых составляющих сигналов. Развитие волновых методов АПВ и ОМП КВЛ позволяет в дальнейшем использовать алгоритмы оценки сигналов для развития перспективных волновых устройств РЗА.

2 ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ НА ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ КАБЕЛЬНО-ВОЗДУШНЫХ ЛЭП ПРИ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЯХ

2.1. Методы проводимого исследования и используемые средства

Исследование волновых процессов на ЛЭП в электрической сети различной конфигурации проводилось путем имитационного моделирования электротехнического комплекса (ЭТК) ЛЭП и сравнения результатов моделирования с теоретическими данными.

В качестве средства имитационного моделирования переходных процессов использовался программный комплекс PSCAD [103]. Указанный программный комплекс был выбран в качестве основного средства моделирования, поскольку позволяет с достаточной точностью воспроизводить волновые переходные процессы в ЭТК ЛЭП любой сложности и используется как средство моделирования во многих исследованиях как в России [104-110], так и за рубежом [111-112].

Для обработки получаемых с помощью модели в PSCAD сигналов тока и напряжения, они сохранялись в текстовые файлы в виде последовательности выборок сигнала с заданным шагом, после чего обрабатывались иными средствами. Для обработки данных, получаемых с помощью PSCAD, использовался программный комплекс Mathcad (в этом программном комплексе присутствует большой набор встроенных функций, позволяющих осуществлять обработку данных и сигналов, а также встроенные средства программирования), а также различные средства языка программирования Python.

Стоит отметить, что, поскольку, протекание волнового процесса слабо зависит от режима сети, а определяется в основном параметрами элементов сети, то точность отображения параметров эквивалентных систем и нагрузки не так важна, как правильность учета параметров распространения волн по элементам ЭТК ЛЭП.

2.2. Волновые процессы при коротких замыканиях на ЛЭП, особенности процесса на кабельно-воздушных ЛЭП

2.2.1 Общее вводное описание волнового процесса на ЛЭП, особенности процесса на кабельно-воздушных ЛЭП

Как известно, короткое замыкание (КЗ) на ЛЭП сопровождается протеканием электромагнитного процесса, который можно разделить на две стадии значительно разной продолжительности. Первая (короткая) стадия характеризуется распространением электромагнитных волн по электрической сети, эту стадию называют волновым процессом. Непосредственно в момент КЗ возникает сильное электромагнитное возмущение, которое вызывает появление электромагнитных волн, распространяющихся по электрической сети.

Передние фронты волн зависят от фазы напряжения в момент КЗ и амплитуды электромагнитной волны. Когда волна (падающая волна) достигает места неоднородности в сети (участок с иным волновым сопротивлением), часть волны отражается обратно (отраженная волна), а другая часть проходит за место неоднородности (прошедшая волна). В месте неоднородности ток и напряжение переходного процесса резко (скачком) изменяются и в результате чего в соответствующий момент времени в сигнале тока и напряжения появляются высокочастотные переходные составляющие. [114, 62]

Последовательные отражения волн определяют условия изменения тока и напряжения при последующем переходном электромагнитном процессе от предшествующего установившегося режима к установившемуся аварийному режиму. Поскольку фронты волн имеют ступенчатый вид (напряжение и ток меняются за единицы и десятки микросекунд), то применив фильтрацию можно выделить сигнал, соответствующий фронту волны и имеющий в общем случае импульсную форму. Следует отметить, что формируемый при повреждении волновой сигнал практически не зависит от режима функционирования электрической сети, а зависит только от условий отражения от мест неоднородности (например, коэффициент отражения от шин ПС зависит в основном от количества и типа присоединений). По знаку, амплитуде и времени прихода фронтов волн относительно друг друга можно судить о типе и месте повреждения, о поврежденном участке линии практически любой конфигурации (в т.ч. на КВЛ).

На рисунке 2.1 в качестве примера изображена модель КВЛ, временная диаграмма распространения волн напряжения (тока) по линии, а также волновые составляющие зарегистрированные по концам ЛЭП.

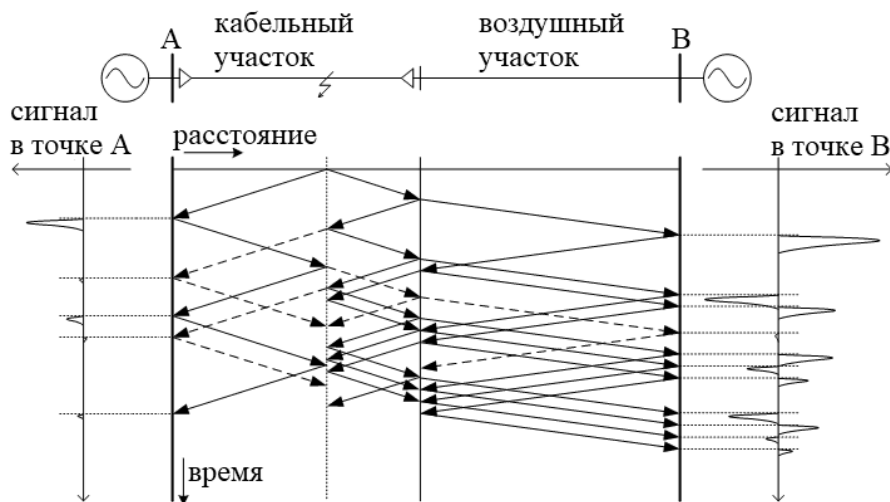


Рисунок 2.1 – Формирование волнового портрета при повреждении КВЛ

Анализ рисунка 2.1 показывает, что в зависимости от того, на каком участке КВЛ произошло КЗ, волны по-разному распространяются по электрической сети, отражаясь и проходя через места резкой неоднородности (шины ПС, кабельно-воздушный переход и т.д.). Таким образом, волновые переходные составляющие, зарегистрированные на определенном временном

промежутке, формируют волновой портрет, характеризующий конкретное место КВЛ. Следует отметить, что волновые портреты, зафиксированные по разным сторонам КВЛ, существенным образом отличаются друг от друга (рисунок 2.1).

2.2.2 Основные соотношения измеряемых электрических величин при волновом процессе на ЛЭП, их применение на кабельно-воздушных ЛЭП

Рассмотрим начало переходного процесса при повреждении ЛЭП более подробно. От места повреждения вдоль проводов ЛЭП к разным ее концам начинают распространяться электромагнитные волны (бегущие волны). При однофазных замыканиях амплитуда первого импульса волнового сигнала в поврежденной фазе в основном зависит от величины фазного напряжения (от фазы синусоиды напряжения) и переходного сопротивления в точке повреждения. При двухфазных повреждениях амплитуда волнового импульса зависит от фазы соответствующего линейного напряжения. Распространение волн по ЛЭП связано с затуханием и дисперсией. Поэтому амплитуда фронта волны с продвижением по ЛЭП уменьшается, а его форма изменяется (в основном уменьшается крутизна фронта). Для однопроводной линии величина напряжения в некоторой точке может быть представлена выражением (2.1), а величина тока – выражением (2.2) [62]:

$$u(t, x) = f_{nad}(t) \cdot e^{-\gamma \cdot x} + f_{omp}(t) \cdot e^{\gamma \cdot x}; \quad (2.1)$$

$$i(t, x) = \frac{f_{nad}(t)}{Z_b} \cdot e^{-\gamma \cdot x} - \frac{f_{omp}(t)}{Z_b} \cdot e^{\gamma \cdot x}, \quad (2.2)$$

где $f_{пад}$, $f_{отр}$ – функция падающей и отраженной волны напряжения соответственно; γ – комплексный коэффициент распространения; Z_b – волновое сопротивление.

Зачастую пренебрегают относительно малой мнимой составляющей комплексной величины волнового сопротивления и представляют его чисто активным сопротивлением. При измерении токов и напряжений на подстанции (ПС) примем за направление распространения падающей волны – направление из ЛЭП к шинам ПС, а за положительное направление измеряемого тока в линии – направление от шин ПС. Тогда выражения для напряжения и тока в месте измерения на границе раздела двух сред могут быть записаны в виде (2.3), (2.4):

$$u_{изм}(t) = u_{np}(t) = u_{nad}(t) + u_{omp}(t) = (1 + k_{omp}) \cdot u_{nad}(t) = k_{np} \cdot u_{nad}(t); \quad (2.3)$$

$$i_{изм}(t) = -i_{np}(t) = -(i_{nad}(t) + i_{omp}(t)) = -(1 - k_{omp}) \cdot \frac{u_{nad}(t)}{Z_{b1}} = -k_{np} \cdot \frac{u_{nad}(t)}{Z_{b2}}; \quad (2.4)$$

$$k_{omp} = \frac{Z_{b2} - Z_{b1}}{Z_{b1} + Z_{b2}}; \quad k_{np} = \frac{2 \cdot Z_{b2}}{Z_{b1} + Z_{b2}}, \quad (2.5)$$

где $k_{отр}$, $k_{пр}$ – коэффициент отражения и прохождения (преломления) волны напряжения; Z_{b1} – волновое сопротивление линии по которой распространяется падающая волна; Z_{b2} – волновое сопротивление среды за местом неоднородности.

Для места присоединения ЛЭП к ПС $Z_{B1} = Z_{B, \text{ЛЭП}}$, а $Z_{B2} = Z_{\text{экр.ПС}}$, где $Z_{\text{экр.ПС}}$ – эквивалентное сопротивление ПС. Если пренебречь емкостями первичного оборудования ПС, индуктивными сопротивлениями трансформаторов и реакторов, а также ВЧ присоединениями, то $Z_{\text{экр.ПС}}$ определяется как параллельное соединение волновых сопротивлений других ЛЭП, присоединенных к тем же шинам ПС. В противном случае для определения $Z_{\text{экр.ПС}}$ следует пользоваться рекомендациями [66, 113]. Для случая ВЛ-КЛ перехода $Z_{B1} = Z_{B, \text{КЛ}}$, $Z_{B2} = Z_{B, \text{ВЛ}}$, а для КЛ-ВЛ перехода $Z_{B1} = Z_{B, \text{ВЛ}}$, $Z_{B2} = Z_{B, \text{КЛ}}$.

Когда волна достигает неоднородности ЛЭП (место соединения двух участков с разными волновыми сопротивлениями), например, место кабельно-воздушного перехода, часть энергии волны отражается и начинает распространяться в обратном направлении (образуется отраженная волна), а другая часть – проходит за место неоднородности (прошедшая волна). Для примера на рисунке 2.2 показаны напряжение и ток падающей волны, не достигшей места неоднородности (рисунок 2.2 а,б), а также соотношения напряжений и токов падающих, отраженных и преломленных волн при достижении падающей волны места неоднородности для случая $|Z_{B2}| < |Z_{B1}|$ (рисунок 2.2 в,г) и случая $|Z_{B2}| > |Z_{B1}|$ (рисунок 2.2 д,е). Частью энергии, которая рассеивается в месте соединения двух разнородных участков, обычно пренебрегают.

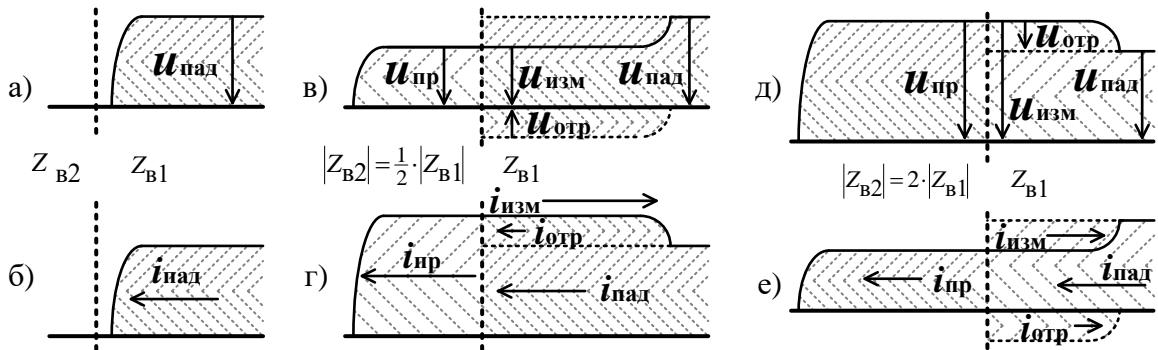


Рисунок 2.2 – Напряжение и ток падающей волны, не достигшей места неоднородности (а, б) и соотношения напряжений и токов бегущих волн на границе неоднородности для случая

$$|Z_{B2}| < |Z_{B1}| \text{ (в, г) и случая } |Z_{B2}| > |Z_{B1}| \text{ (д, е)}$$

Если допустить, что мнимая составляющая величины волновых сопротивлений равна нулю, то для первого случая ($|Z_{B2}| < |Z_{B1}|$, рисунок 2.2 в,г) $k_{отр} < 0$ и напряжения и ток можно представить в виде выражений 2.6, а для второго случая ($|Z_{B2}| > |Z_{B1}|$, рисунок 2.2 д,е) $k_{отр} > 0$ и напряжения и ток можно представить в виде выражений 2.7.

$$u_{изм}(t) = (1 - |k_{отр}|) \cdot u_{пад}(t); i_{изм}(t) = -(1 + |k_{отр}|) \cdot \frac{u_{пад}(t)}{Z_{B1}}. \quad (2.6)$$

$$u_{изм}(t) = (1 + |k_{отр}|) \cdot u_{пад}(t); i_{изм}(t) = -(1 - |k_{отр}|) \cdot \frac{u_{пад}(t)}{Z_{B1}}. \quad (2.7)$$

Необходимо отметить, что приведенные выше соотношения справедливы для однопроводной линии, в то время как для многопроводных линий необходимо переходить к

телеграфным уравнениям [114, 66]. Однако при анализе электромагнитных волн в первом междуфазном волновом канале сохраняется справедливость ранее полученных выражений [66].

2.3. Формирование имитационных моделей ЛЭП для исследования волновых процессов

Задачи моделирования:

1. Изучение особенностей построения модели в *PSCAD* для адекватного воспроизведения волнового процесса;
2. Изучение особенностей протекания волновых процессов на ВЛ, КЛ, КВЛ, сравнение данных с теоретическими сведениями;
3. Определение отличий повреждений на КЛ и ВЛ.

2.3.1 Особенности имитационного моделирования волновых процессов на воздушных ЛЭП

Для исследования волновых процессов в программном комплексе *PSCAD* было создано несколько моделей участков сети 110 кВ. Основные элементы моделей ВЛ изображены на рисунках 2.3 – 2.5.

На рисунке 2.3 показана модель сети, содержащая: два источника 220 кВ – эквивалент внешней системы, два автотрансформатора, однородные участки линии, идеальные датчики тока и напряжения (выделены синим цветом), а также короткозамыкатель с регулируемым типом КЗ. Поток мощности через линию обеспечивается небольшим отличием напряжений на шинах ПС по модулю и сдвигом по фазе. На рисунке 2.4 показана модель сети, аналогичная рисунку 2.3, за исключением отсутствия автотрансформаторов. Эквивалентные источники имеют напряжение 110 кВ. Такое отличие сделано с целью оценки особенностей учета источников питания в модели на протекание волнового процесса.

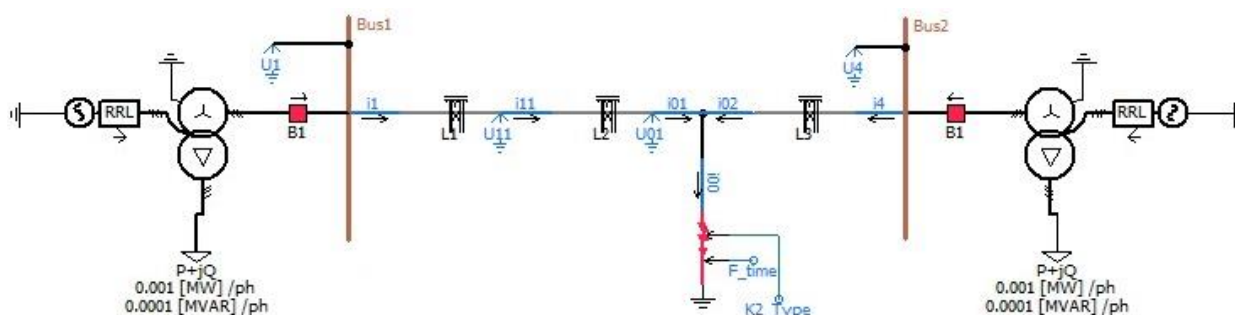


Рисунок 2.3 – Модель сети 110 кВ для исследования переходных процессов на ВЛ

На рисунке 2.5 показаны элементы вывода сигналов на осциллограммы, элементы фильтрации (в этом примере – фильтр Баттерворта второго порядка), частота пропускания фильтров составляла 100-1000 кГц. Также на рисунке изображены элементы для выделения «падающей» и «отраженной» волн, выделения модальных составляющих.

На представленной модели в *PSCAD* производилась оценка волновых характеристик воздушной линии, полученных в результате их расчета компилятором программы, а также

условий отражения волн от шин ПС. Оценка осуществлялась по осциллограммам сигналов датчиков тока и напряжения и их производных величин.

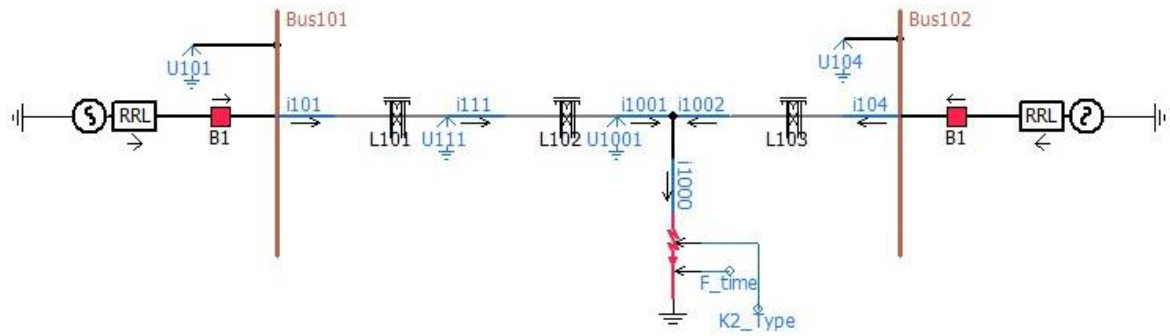


Рисунок 2.4 – Модель сети 110 кВ для оценки отличий при изменении источников питания

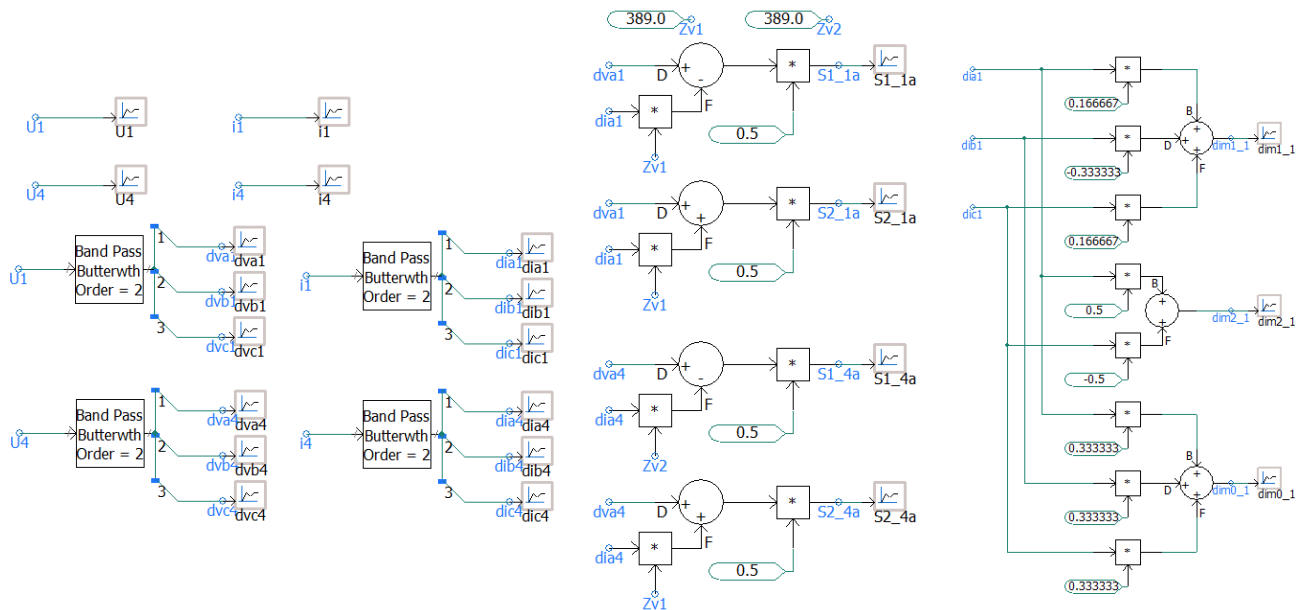


Рисунок 2.5 – Элементы обработки сигналов в PSCAD

В момент повреждения на линии волна, возникающая непосредственно в точке повреждения, разделяется на две части, которые распространяются в разных направлениях от места КЗ, что видно на рисунке 2.6. Здесь изображены токи в двух участках линии, разделенных повреждением (верхняя шкала), а также ток в месте повреждения (нижняя шкала), как видно из рисунка сумма токов в участках линии равна току в месте повреждения, что соответствует первому закону Кирхгофа. Напряжения этих волн одинаковы.

В моделях (рисунки 2.3 – 2.4) линия разделена на несколько однородных участков с целью оценки скорости распространения волны, затухания и дисперсии линии. На рисунке 2.7 показаны напряжение (верхняя шкала) и ток (нижняя шкала), замеренные непосредственно у места повреждения (выделены синим цветом), а также на расстоянии 50 км от места КЗ (выделены зеленым цветом). На осциллограммах также показаны маркеры, соответствующие времени прихода волн. Время прихода первой волны соответствует моменту возникновения КЗ, второй – времени распространения волны по участку линии длиной 50 км. Как видно по рисунку, при

времени распространения 169 мкс, с учетом пройденного расстояния 50 км, скорость распространения электромагнитной волны (групповая скорость) составляет около 296 тыс. км/с. По соотношению составляющей напряжения к составляющей тока было определено волновое сопротивление, значение которого по модулю составляет около 389 Ом. Полученные значения соответствуют теоретическим сведениям, например [63, 66].

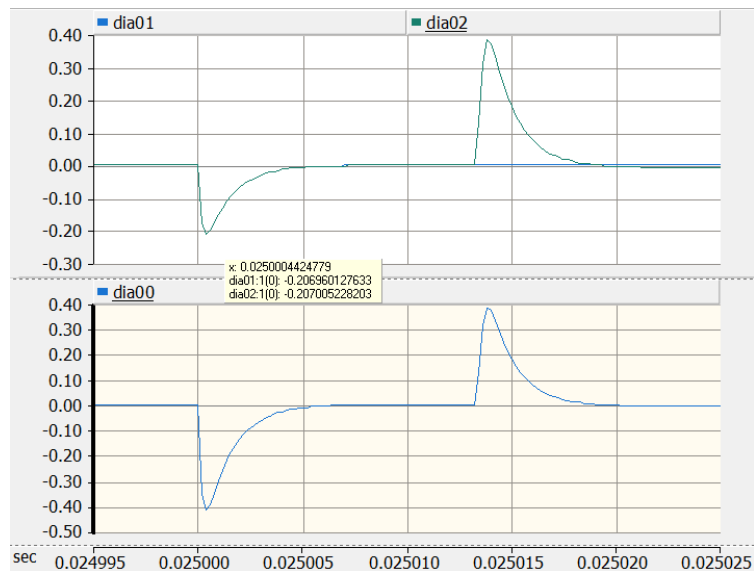


Рисунок 2.6 – Высокочастотные составляющие тока в фазе А непосредственно около места повреждения (верхняя шкала), а также суммарный ток в месте повреждения (нижняя шкала)

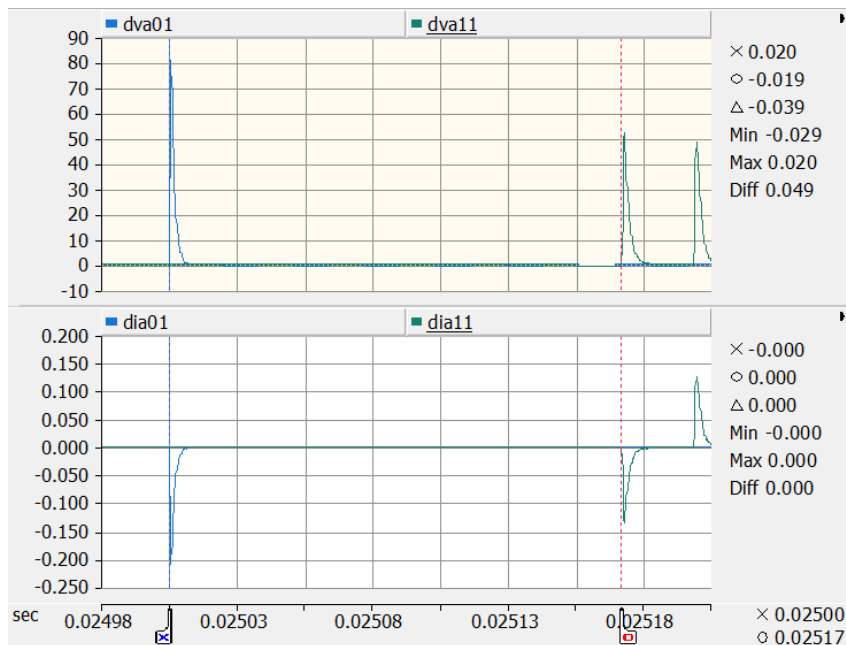


Рисунок 2.7 – Высокочастотные составляющие напряжения (верхняя шкала) и тока (нижняя шкала) в фазе А на разной удаленности от точки КЗ

Из рисунка 2.7 также видно, что волна претерпевает заметное затухание, а также искажение формы, проявляющееся в уменьшении крутизны переднего фронта импульса и смещении максимального значения. Такое изменение обуславливается потерями энергии при распространении волны по линии и дисперсией среды.

На рисунках 2.8 – 2.9 показано отличие в высокочастотном сигнале при различных моделях эквивалентных систем, изображенных на рисунках 2.3 – 2.4. Синим цветом изображены сигналы модели с автотрансформаторами (рисунок 2.3), зеленым – сигналы модели без автотрансформаторов (рисунок 2.4).

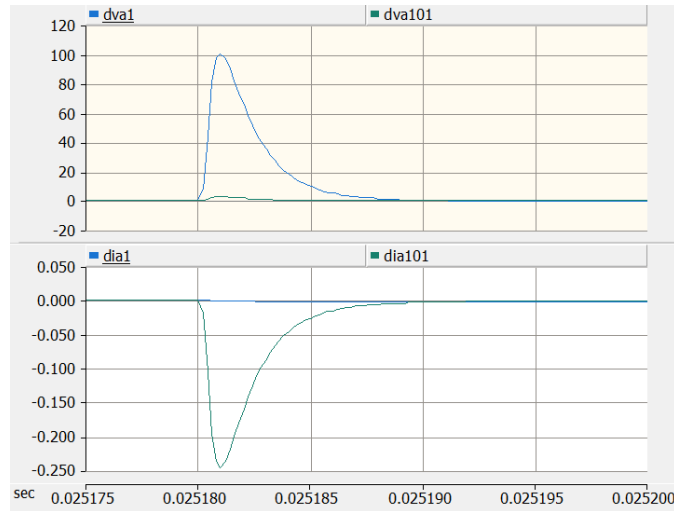


Рисунок 2.8 – Высокочастотные составляющие напряжения (верхняя шкала) и тока (нижняя шкала) в фазе А

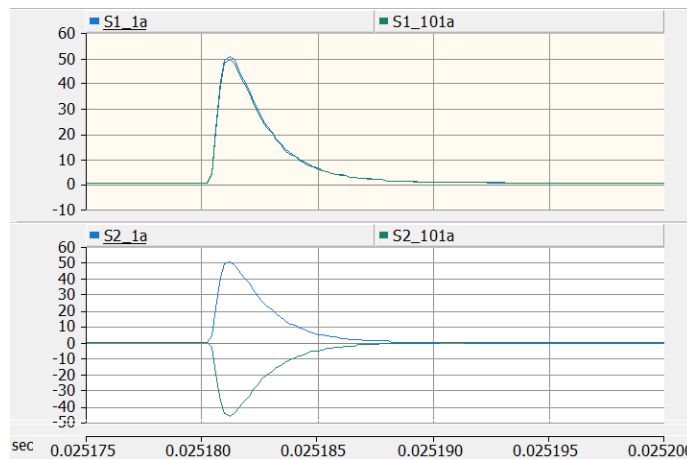


Рисунок 2.9 – Высокочастотные составляющие отраженной (двигающейся из линии) волны (верхняя шкала) и падающей (двигающейся от шин в линию) волны (нижняя шкала) в фазе А

Как видно из рисунков 2.8 – 2.9 условия отражения волны от шин с разным учетом источников в модели кардинально отличаются. Это объясняется тем, что трансформаторы обладают большим характеристическим сопротивлением в наблюдаемом диапазоне частот, значительно превышающим по модулю волновое сопротивление линии. Источники напряжения, изображенные на рисунке 2.4, в свою очередь, наоборот – обладают малым сопротивлением. Таким образом, коэффициент отражения по напряжению в первом случае (модель на рисунке 2.3) с учетом $|Z_{c2}| \gg |Z_{c1}|$, составляет:

$$K_{o.U} = \frac{Z_{c2} - Z_{c1}}{Z_{c2} + Z_{c1}} \approx 1, \quad (2.8)$$

где Z_{c1} – волновое сопротивление линии, Ом; Z_{c2} – эквивалентное волновое сопротивление всех присоединений к шинам ПС за исключением рассматриваемой линии (в этом случае – характеристическое сопротивление трансформатора), Ом.

Во втором случае (модель на рисунке 2.4) коэффициент отражения по напряжению, при условии, что $|Z_{c2}| \ll |Z_{c1}|$ (Z_{c2} равно характеристическому сопротивлению генератора), составит:

$$K_{o,U} = \frac{Z_{c2} - Z_{c1}}{Z_{c2} + Z_{c1}} \approx -1. \quad (2.9)$$

При добавлении к шинам еще одного присоединения (рисунок 2.10) коэффициент отражения по напряжению в модели с трансформаторами принимает малое значение, поскольку эквивалентное волновое сопротивление (Z_{c2}) в этом случае приблизительно равно сопротивлению линии. Сигналы, демонстрирующие указанные обстоятельства, показаны на рисунке 2.11. Таким образом, при подключении источников в модели через трансформаторы, а не напрямую, коэффициент отражения определяется в основном количеством и типом подключенных линий, что в достаточной степени соответствует действительности. Также, как показано в Приложении А, следует в модель включать сосредоточенную емкость, подключаемую к шинам ПС, замещающую влияние первичного высоковольтного оборудования ПС.

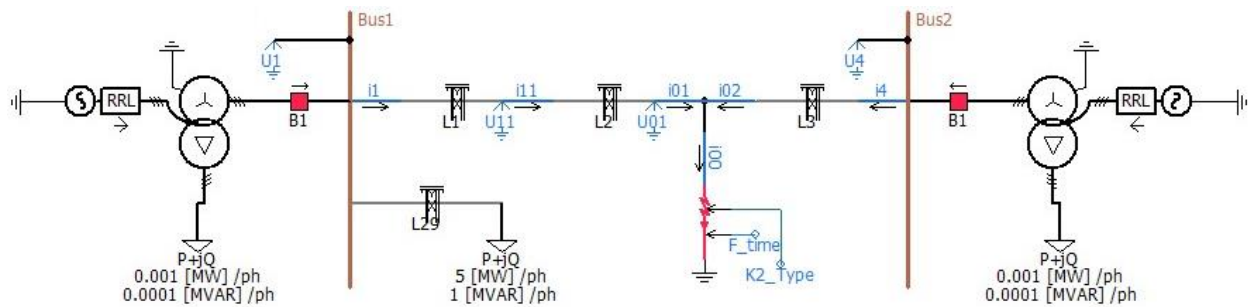


Рисунок 2.10 – Модель сети 110 кВ с присоединением к шинам двух ЛЭП

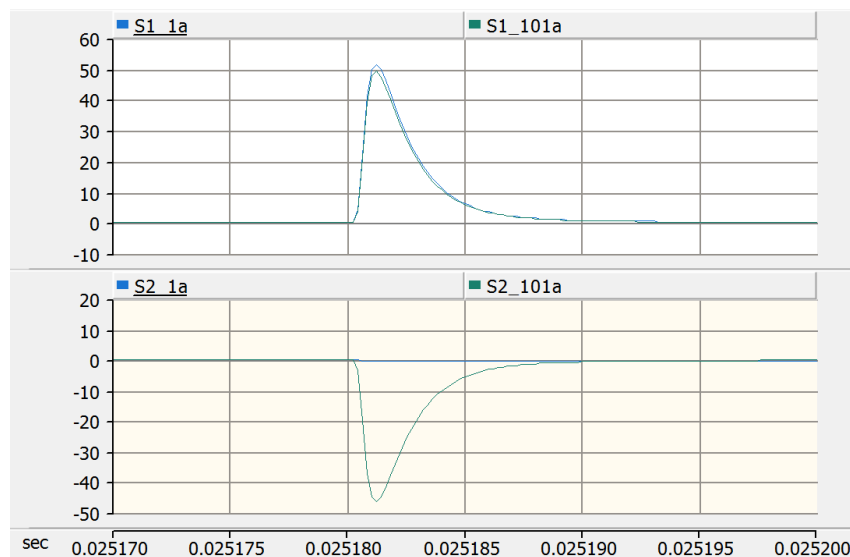


Рисунок 2.11 – Высоочастотные составляющие отраженной (двигающейся из линии) волны (верхняя шкала) и падающей (двигающейся от шин в линию) волны (нижняя шкала) в фазе А

2.3.2 Отличия волновых параметров кабельных ЛЭП

Построим модель сети, содержащая кабельную линию (рисунок 2.12). Модель аналогична представленной на рисунке 2.3.

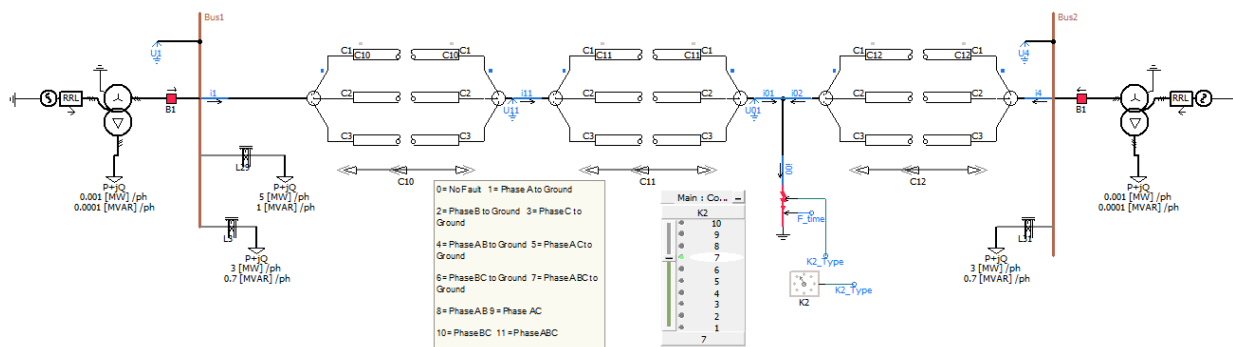


Рисунок 2.12 – Модель сети 110 кВ для исследования переходных процессов на КЛ

Рассмотрим осциллограммы сигналов при повреждении на КЛ для сравнения волновых параметров ВЛ и КЛ. На рисунке 2.13 показаны напряжение (верхняя шкала) и ток (нижняя шкала), замеренные непосредственно у места повреждения (выделены синим цветом), а также на расстоянии 50 км от места КЗ (выделены зеленым цветом). Как видно по данным из рисунка, при времени распространения 370 мкс, с учетом пройденного расстояния 50 км, скорость распространения электромагнитной волны составляет около 135 тыс. км/с. По соотношению составляющей напряжения к составляющей тока было определено волновое сопротивление, значение которого по модулю составляет около 26,5 Ом. Из рисунка 2.13 также видно, что затухание, а также искажение фронта волны на КЛ значительно больше, чем на ВЛ. Полученные данные соответствуют теоретическим сведениям, например [66].

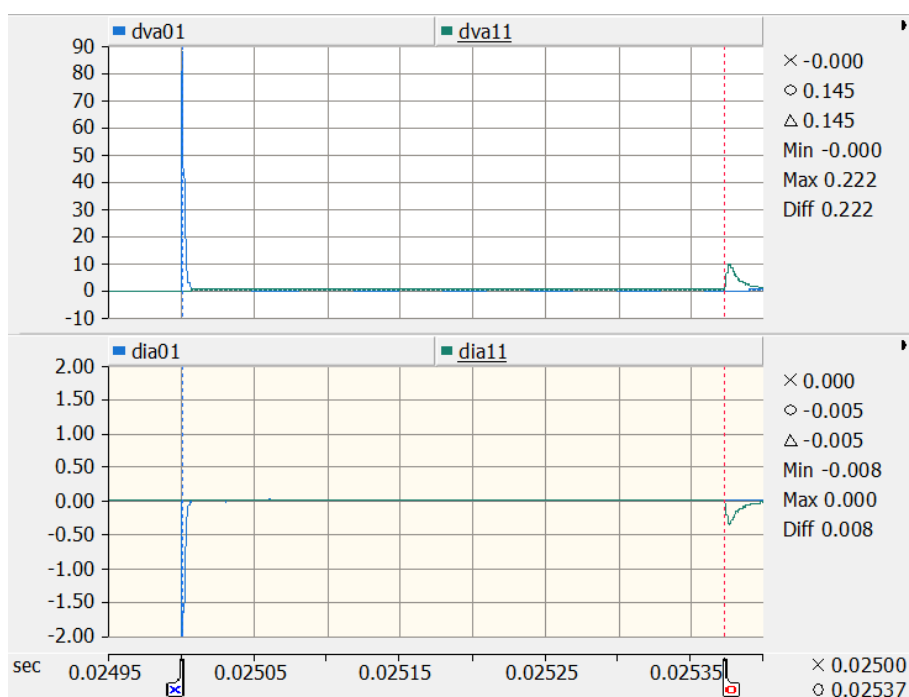


Рисунок 2.13 – Высоочастотные составляющие напряжения (верхняя шкала) и тока (нижняя шкала) в фазе А на разной удаленности от точки КЗ

2.3.3 Особенности волновых процессов на кабельно-воздушных ЛЭП

Из-за существенных отличий волновых характеристик ВЛ и КЛ волновой процесс при повреждениях на разных участках КВЛ имеет различный характер. Для предварительного исследования отличительных признаков протекания волнового процесса при повреждениях на воздушных и кабельных участках линии рассмотрим модель некоторой КВЛ (рисунок 2.14).

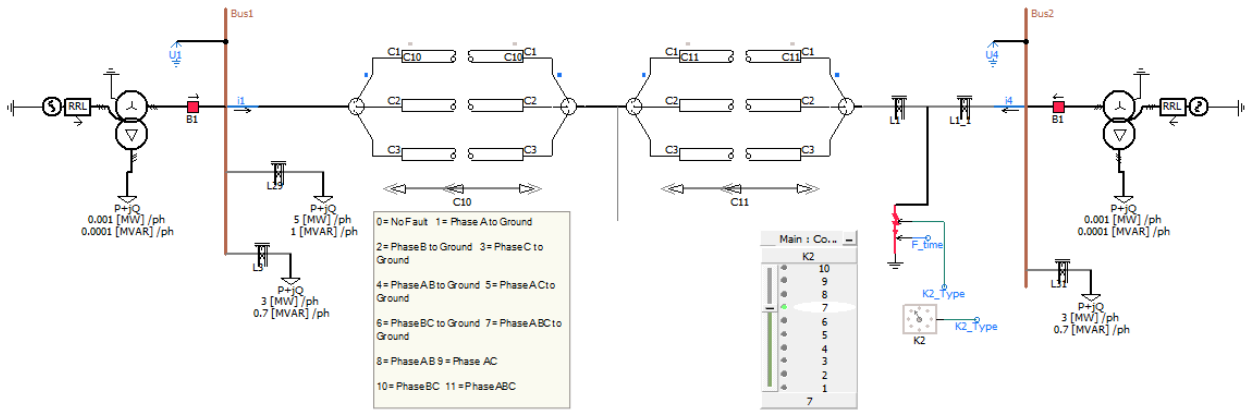


Рисунок 2.14 – Модель сети 110 кВ для исследования переходных процессов на КВЛ

Сигналы при повреждении на воздушном участке линии, замеренные на двух смежных подстанциях, изображены на рисунках 2.15 – 2.16.

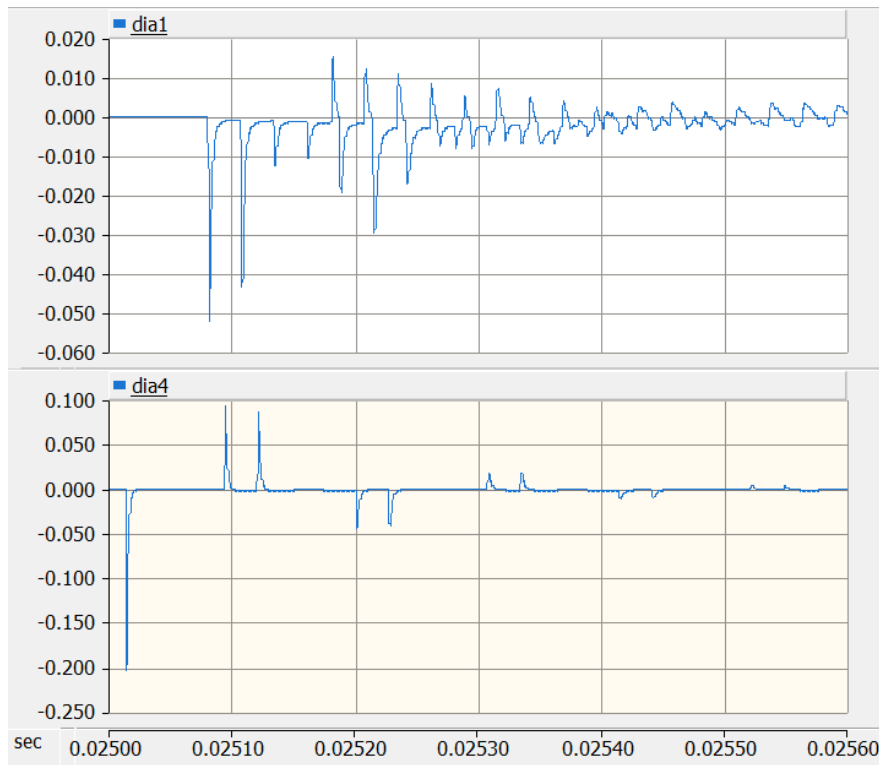


Рисунок 2.15 – Высокочастотные составляющие тока в фазе А при повреждении на ВЛ, зарегистрированные на противоположных концах линии

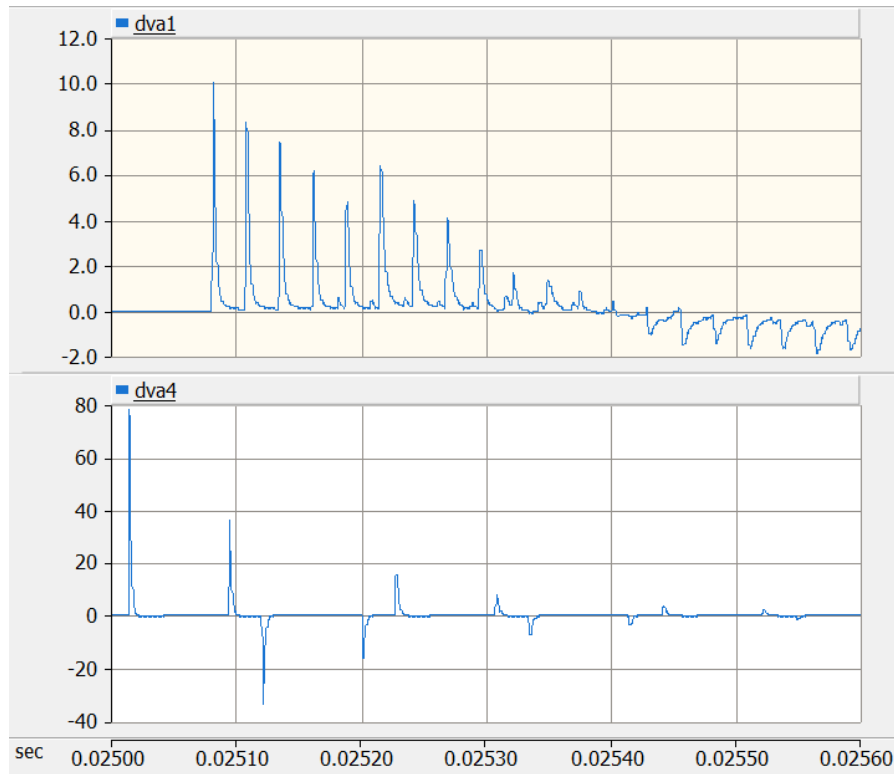


Рисунок 2.16 – Высокочастотные составляющие напряжения в фазе А при повреждении на ВЛ, зарегистрированные на противоположных концах линии

Сигналы при повреждении на кабельном участке линии, замеренные на двух смежных подстанциях, изображены на рисунках 2.17 – 2.18.

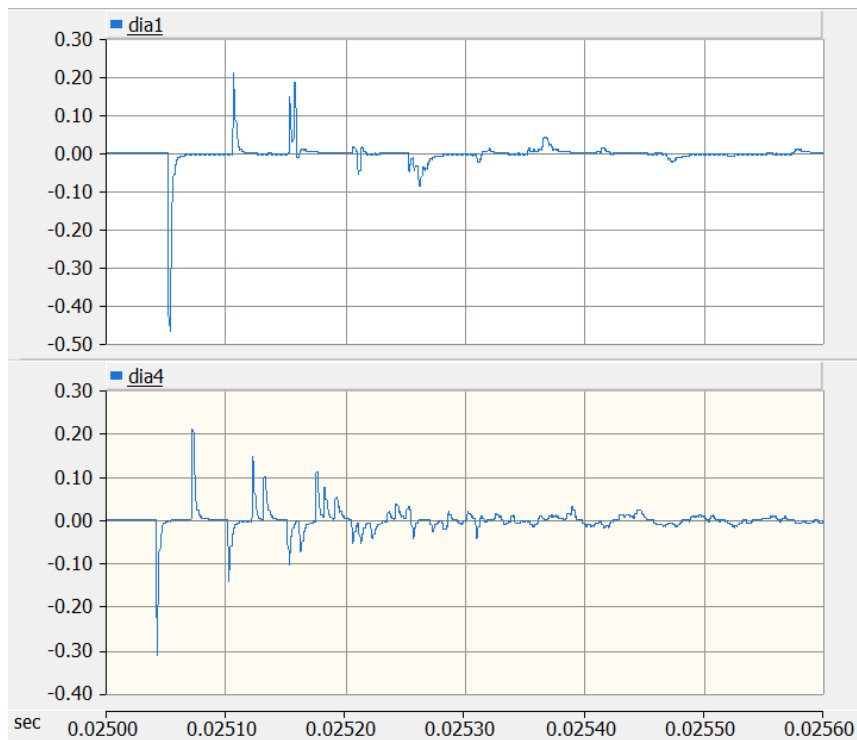


Рисунок 2.17 – Высокочастотные составляющие тока в фазе А при повреждении на КЛ, зарегистрированные на противоположных концах линии

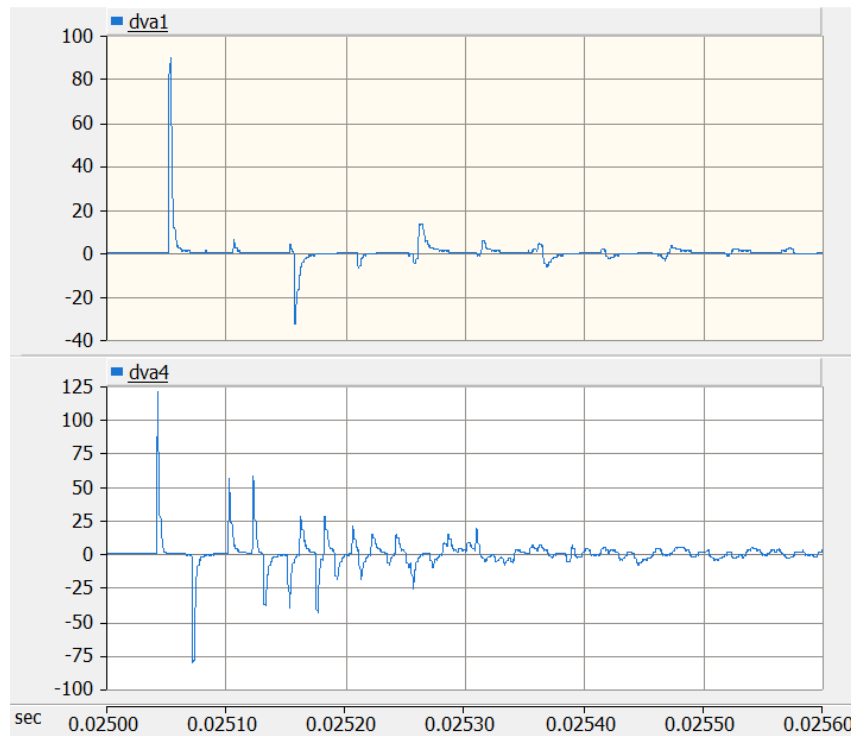


Рисунок 2.18 – Высокочастотные составляющие напряжения в фазе А при повреждении на КЛ, зарегистрированные на противоположных концах линии

Как видно из рисунков 2.15 – 2.18, повреждения на разных участках КВЛ имеют явные отличительные признаки при измерении с любой стороны линии. Одними из основных отличительных признаков являются:

- различное время появления первого импульса;
- появление чередующихся импульсов разной полярности и амплитуды;
- различное соотношение амплитуд сигналов по концам ЛЭП.

Для обоснования достоверности получаемых результатов следует провести исследования волновых процессов на имитационной модели действительной КВЛ, построенной с использованием реальных осциллограмм.

2.4. Исследование волновых процессов на имитационной модели КВЛ 220 кВ Тамань – Кафа (Энергомост в Крым), построенной с использованием реальных осциллограмм

2.4.1 Этапы разработки имитационной модели реальной КВЛ

В Приложении А изложен процесс разработки и верификации имитационной модели ЛЭП, предназначенной для исследования волновых процессов, с использованием сигналов реальных осциллограмм, записанных с высокой частотой дискретизации (1 МГц), на примере ВЛ 220 кВ Парская-Сасово. При этом используется метод оценки адекватности и точности модели, основанный на вычислении коэффициента корреляции между реальным измеренным сигналом и сигналом, вычисленным на имитационной модели. Имитационная модель разрабатывалась в

программном обеспечении *PSCAD*. Показано что имитационные модели, при правильном подходе к их разработке, позволяют получать достоверные сигналы, которые можно с полным основанием использовать для проведения анализа волновых процессов, а также для имитационного моделирования способов АПВ и ОМП КВЛ.

В этом пункте рассматривается процесс разработки и верификации имитационной модели КВЛ 220 кВ Тамань – Кафа I цепь. Сигналы тока реальных осциллограмм, записанные с высокой частотой дискретизации (2.5 МГц), регистрировались по двум концам ЛЭП с помощью устройств ВОМП, производства НПП Бреслер. Осциллограммы были предоставлены автору диссертационной работы для проведения научно-исследовательской работы, за что автор выражает свою благодарность. Описание параметров указанной линии будет дано далее.

Как показано в Приложении А, разработка имитационной модели ЛЭП состоит из нескольких этапов:

1) Первый этап – сбор и анализ исходных данных. К основным относятся значения длин ЛЭП и участков КВЛ, тип опор и проводов ВЛ, тип кабелей, количество и тип присоединений к шинам ПС. Также в модели может быть учтена дополнительная информация, к которой относятся данные о пунктах транспозиции, о ВЧ присоединении и т.п.;

2) Вторым этапом является анализ осциллограмм, который проводится с основной целью – уточнить временные параметры распространения волн по ЛЭП, т.е. определить фактические значения времени распространения волн по каждой ЛЭП и каждому участку КВЛ, учитываемых в модели. Далее фактические значения времени распространения могут быть использованы, исходя из двух принципов действий:

- В основе первого принципа лежит допущение, что длины ЛЭП, полученные на первом этапе, соответствуют фактической длине проводов ЛЭП, по которым распространяется волна. Поэтому, используя фактическое значение времени распространения волн, рассчитывается скорость распространения волн по ЛЭП (выражение 2.10);

- В основе второго принципа лежит предположение, что исходная информация относительно длин ЛЭП не точна и фактические длины ЛЭП иные. Поэтому, используя параметры геометрического расположения проводов относительно друг друга и земли, а также тип проводов ЛЭП, рассчитывается теоретическая скорость распространения волн по ВЛ. А, с учетом геометрических (внутренний и внешний радиус слоев) и электрических (удельное сопротивление проводящих слоев, диэлектрическая проницаемость изолирующих слоев) параметров высоковольтных кабелей, тип прокладки и т.п., вычисляется теоретическая скорость распространения волн по КЛ. Используя теоретическую скорость и определенное по осциллограммам фактическое значение времени распространения волн, рассчитывается длина ЛЭП (выражение 2.11), которая считается фактической. При применении этого принципа,

начальные данные о длинах ЛЭП используются лишь для определения временных интервалов поиска в реальных сигналах фронтов волн, соответствующих отражениям от концов тех или иных ЛЭП и участков КВЛ.

$$v = L / \tau; \quad (2.10)$$

$$L = v \cdot \tau, \quad (2.11)$$

где L , v и τ – длина ЛЭП, скорость распространения волн по ЛЭП и время распространения волн по ЛЭП соответственно.

Как будет показано далее, информация о длинах ЛЭП в разных источниках отличается, что дает основание сомневаться в точности исходных данных. В этой работе основным принципом учета реального времени распространения волн по ЛЭП был выбран второй принцип для воздушных участков, первый принцип – для кабельных.

Стоит отметить, что на этом этапе следует учитывать отличие паспортной длины ВЛ (длины линии согласно технической документации) от волновой длины ВЛ. Под волновой длиной ВЛ понимается длина проводов ВЛ, вдоль которых распространяются волны. Указанный аспект отражен в ряде работ, например [115]. Так в работе [115] перечислены основные факторы определяющие это различие, причем по выводам авторов работы основное отличие обусловлено наличием стрелы провеса проводов. Причем для ВЛ 220кВ можно ожидать, что длина проводов будет больше паспортной длины ВЛ примерно на 1%.

Однако, как показано в Приложении А и будет показано далее в этом пункте, длина проводов, рассчитываемая по реальному времени пробега волны и теоретической скорости распространения, в ряде случаев может оказаться меньше паспортной длины. Причем, если взять паспортную длину некоторых ЛЭП в качестве базовой (даже без учета возможного удлинения) и по реальному времени распространения волн посчитать скорость распространения, то получится значение, превышающее скорость света в вакууме, чего, как известно, быть не может. Отсюда следует вывод, что в ряде случаев паспортная длина ЛЭП завышена. Объяснить такое завышение можно по-разному: в каких-то случаях это может быть непреднамеренная ошибка в проектной документации, а возможно это завышение было сделано намеренно на каком-то этапе проекта по тем или иным соображениям причастных лиц... Как бы то ни было, следует учитывать, что существует возможность завышения длин ЛЭП в документации по сравнению с фактической длиной ЛЭП, отчего волновая длина окажется не больше, а меньше паспортной.

3) Третьим этапом является определение характеристик различного оборудования электрической сети, которое может заметно влиять на условия распространения и переотражения волн. Например, это могут быть устройства продольной компенсации, оборудование ВЧ связи, и т.п. Однако основным в общем случае является оборудование, которое влияет на коэффициент отражения от шин ПС. Как показано в Приложении А, для учета оборудования ПС достаточно

суммировать емкости оборудования (высоковольтные выключатели, измерительные трансформаторы, силовые трансформаторы, реакторы и пр.) и включить в модель эквивалентную емкость ПС, подключенную к шинам;

4) Четвертым этапом является оценка адекватности и точности модели посредством сравнения реальных сигналов с модельными сигналами. Это выполняется путем визуального анализа, а также математически путем расчета коэффициента корреляции (функции взаимной корреляции) как изложено в Приложении А. Если модель недостаточно точна, то пересматриваются предыдущие этапы.

2.4.2 Исходные параметры КВЛ 220 кВ Тамань – Кафа

Одним из ключевых элементов Сооружения электросетевого Энергомоста РФ - полуостров Крым является достаточно сложный комплекс ЛЭП, состоящий из четырех КВЛ 220 кВ, в которых кабельные участки большей частью проложены по дну Керченского пролива. Схема, поясняющая конфигурацию комплекса КВЛ, показана на рисунке 2.19. В комплекс входят: три КВЛ 220 кВ Тамань – Кафа I, II цепи и цепь №3, а также КВЛ 220 кВ Тамань – Камыш-Бурун.

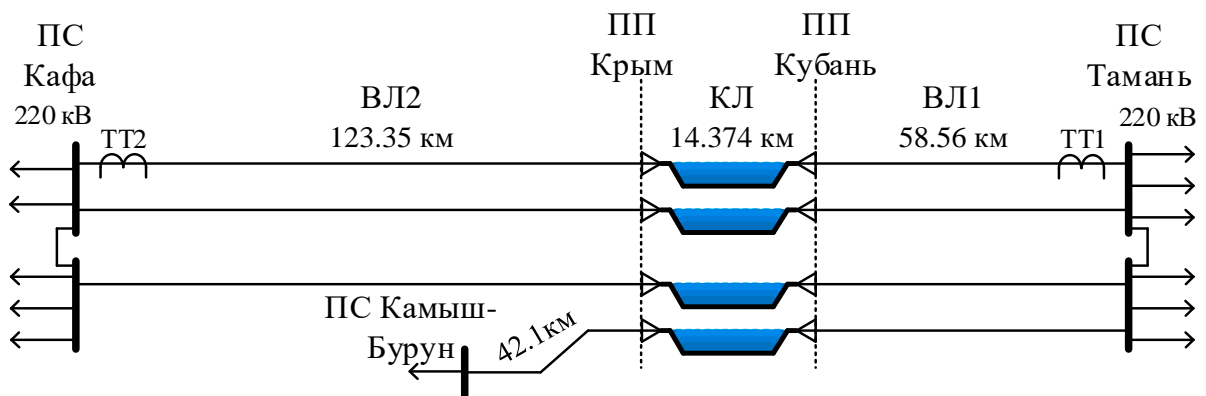


Рисунок 2.19 – Конфигурация рассматриваемого комплекса КВЛ

На схеме (рисунок 2.19) также условно показано количество присоединений ЛЭП на ПС. В этом пункте будет рассматриваться КВЛ 220 кВ Тамань – Кафа I цепь, которая изображена сверху на схеме (рисунок 2.19). Места измерения сигналов тока устройствами ВОМП на присоединениях КВЛ на ПС Тамань и ПС Кафа условно показаны как ТТ1 и ТТ2 соответственно. На рисунке 2.19 отображены длины участков КВЛ, которые были определены в ходе анализа осциллограмм, что будет изложено далее.

Для построения модели ЛЭП были собраны данные из многих источников. Для определения длин ЛЭП и длин участков КВЛ использовались данные из пяти разных источников:

Источник 1 – Данные Черноморского РДУ на 01.04.2022;

Источник 2 – «Программа комплексного развития систем коммунальной инфраструктуры городского округа Феодосия Республики Крым» 2019 г. и «Техническое задание на выполнение

комплекса работ по сбору исходных данных, необходимых для оформления прав на земельные участки под объектами электросетевого хозяйства, определения состава имущества» 2020 г.;

Источник 3 – Данные ОДУ Юга на 01.05.2022;

Источник 4 – Данные удельных параметров КВЛ от НПП Бреслер, которые также отражены в работе [81];

Источник 5 – Данные схемы заземления экранов кабелей по проекту «Сооружение электросетевого Энергомоста Российская Федерация - полуостров Крым. Кабельный переход через Керченский пролив».

Сводная информация по длинам участков КВЛ согласно указанным выше источникам представлена в таблице 2.1. Дополнительно в таблице представлено значение медианы значений длин для каждого участка, а также отклонения крайних значений длин от медианы в абсолютном выражении и в процентах от значения медианы.

Таблица 2.1 – Длины участков КВЛ 220 кВ Тамань – Кафа I цепь из разных источников

| Участок КВЛ (рисунок 2.1) | Длина участка КВЛ, км | | | | | Медиана, км | Крайние отклонения от медианы, км / % |
|------------------------------|------------------------|-------|--------|---------|--------|----------------|---|
| | Номер источника данных | | | | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | | |
| Длина участка ВЛ1, км | 57,2 | 57,4 | 57,5 | 57,688 | - | 57,45 | -0,25; +0,238 / -0,44%; +0,41% |
| Длина участка КЛ, км | 14,46 | 14,45 | 14,36 | 14,36 | 14,374 | 14,374 | -0,014; +0,086 / -0,1%; +0,6% |
| Длина участка ВЛ2, км | 122,11 | 122,1 | 127,47 | 125,011 | - | 123,56 | -1,461; +3,91 / -1,18%; +3,16% |

Как видно из таблицы 2.1, данные из разных источников разнятся, причем наибольший разброс наблюдается для участка ВЛ2, где разность между крайними значениями из отдельных источников превышает 5 км, что составляет 4% от длины этого участка КВЛ. Такие значения показывают обоснованность использования второго принципа учета реального времени распространения волн по воздушным участкам КВЛ. Рассчитанные значения медиан для длин воздушных участков КВЛ использовались для вычисления ожидаемых значений времен распространения волн по этим участкам на этапе анализа осциллограмм.

В отличие от воздушных участков, для кабельного участка значение медианы было принято в качестве фактического значения длины этого участка для вычисления скорости распространения волн по кабелю. Таким образом был применен первый принцип учета реального

времени распространения волн, поскольку разброс между крайними значениями длины КЛ участка, взятыми из отдельных источников, составляет 100 м, а значение медианы соответствует значению длины из источника №5 (схема заземления экранов кабелей), который вызывает наибольшее доверие.

2.4.3 Уточнение параметров КВЛ 220 кВ Тамань – Кафа с использованием реальных осциллограмм

Для оценки значений времени распространения волн по участкам КВЛ производился анализ осциллограмм для 5 случаев КЗ, произошедших в разное время и в разных местах КВЛ. Параметры этих случаев КЗ отображены в таблице 2.2. К несчастью для научных исследований и к радости граждан все зарегистрированные случаи КЗ на КВЛ 220кВ Тамань-Кафа пришлось на воздушные участки, повреждений кабельных линий зарегистрировано не было.

Таблица 2.2 – Параметры рассматриваемых случаев КЗ на КВЛ 220кВ Тамань-Кафа I цепь

| Номер КЗ | Вид КЗ | Поврежденный участок КВЛ | Предполагаемое расстояние до места повреждения от конца поврежденного участка, ближайшего к ПС Тамань |
|----------|--------|--------------------------|---|
| 1 | 1ф.С | ВЛ1 | 4,3 км |
| 2 | 1ф.В | ВЛ1 | 13,9 км |
| 3 | 1ф.С | ВЛ1 | 50,9 км |
| 4 | 1ф.А | ВЛ2 | 90,3 км |
| 5 | 1ф.В | ВЛ2 | 120,7 км |

Указанные в таблице значения расстояния до места повреждения от конца поврежденного участка, ближайшего к ПС Тамань, рассчитаны при ручном анализе осциллограмм.

На рисунке 2.20 изображены лестничные диаграммы распространения волн по КВЛ для случая короткого замыкания на участке ВЛ1 в начале участка (рисунок 2.20а) и в конце участка (рисунок 2.20б), при этом за начало участка принято присоединение ВЛ к ПС Тамань. На рисунке 2.21 изображена аналогичная лестничная диаграмма для случая короткого замыкания на участке ВЛ2. Диаграмме на рисунке 2.20а соответствуют случаи КЗ №1 и №2 (в соответствии с нумерацией таблицы 2.2), диаграмме на рисунке 2.20б соответствует случай КЗ №3, а диаграмме на рисунке 2.21 соответствуют случаи КЗ №4 и №5. Лестничные диаграммы позволяют наглядно продемонстрировать как на основе анализа осциллограмм и определения моментов прихода волн к концам ЛЭП можно определить времена распространения волн по участкам КВЛ.

Запишем выражения, по которым можно определить значения времени распространения волн при КЗ на участке ВЛ1 (одинаковые для КЗ в начале участка и для КЗ в конце участка). При анализе осциллограмм, записанных со стороны ПС Тамань, определить времена распространения можно по выражениям 2.12-2.14, а при анализе осциллограмм, записанных со стороны ПС

Кафа, – по выражениям 2.15-2.17. И аналогично при КЗ на участке ВЛ2 получаются выражения 2.18-2.20 для сигналов со стороны ПС Тамань и 2.21-2.23 для сигналов со стороны ПС Кафа.

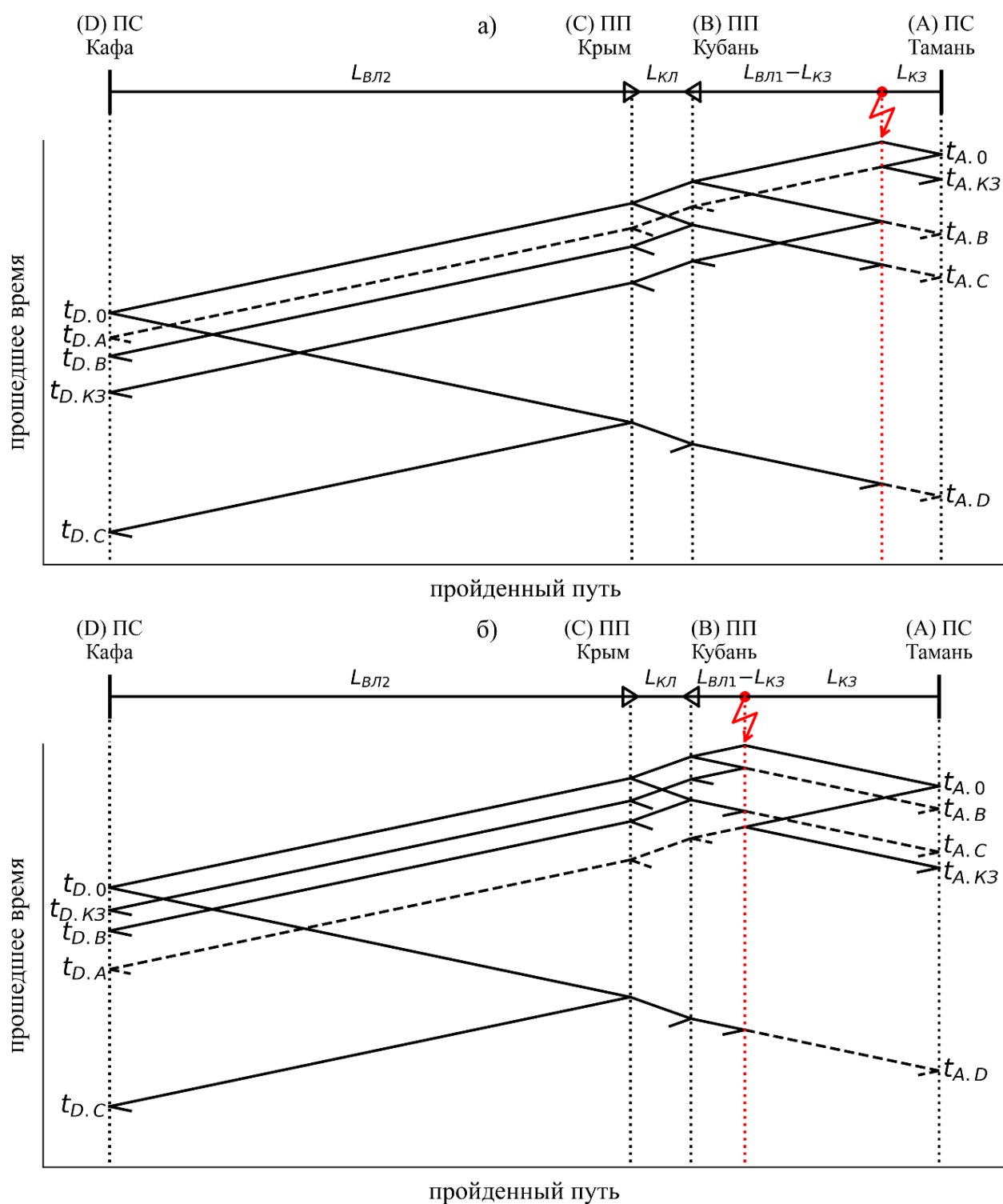


Рисунок 2.20 – Лестничные диаграммы распространения волн по КВЛ для случаев КЗ на участке ВЛ1 в начале участка (а) и в конце участка (б)

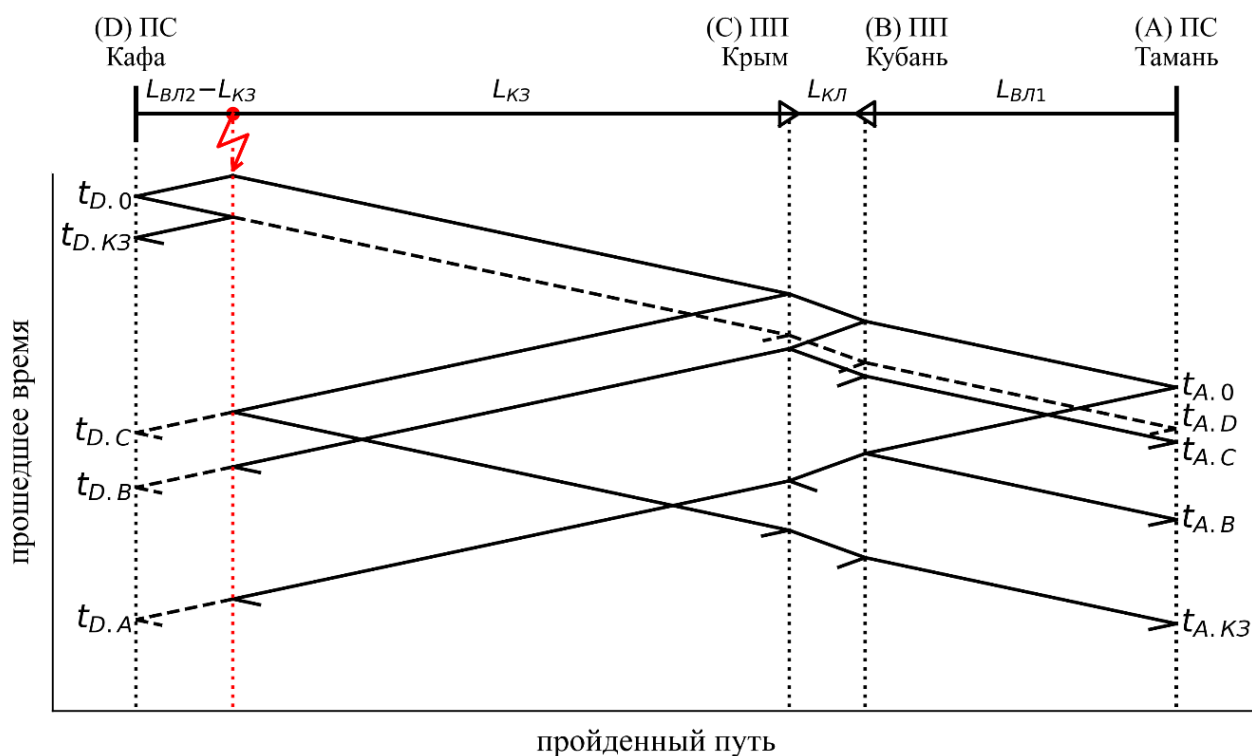


Рисунок 2.21 – Лестничная диаграмма распространения волн по КВЛ для случаев КЗ на ВЛ2

Выражения для случая КЗ на участке ВЛ1 (рисунок 2.20а,б) и сигналов на ПС Тамань:

$$\tau_{ВЛ1} = \frac{1}{2} \cdot (t_{A.КЗ} + t_{A.B}) - t_{A.0}; \quad (2.12)$$

$$\tau_{КЛ} = \frac{1}{2} \cdot (t_{A.C} - t_{A.B}); \quad (2.13)$$

$$\tau_{ВЛ2} = \frac{1}{2} \cdot (t_{A.D} - t_{A.C}). \quad (2.14)$$

Выражения для случая КЗ на участке ВЛ1 (рисунок 2.20а,б) и сигналов на ПС Кафа:

$$\tau_{ВЛ1} = \frac{1}{2} \cdot (t_{D.КЗ} + t_{D.A}) - t_{D.0}; \quad (2.15)$$

$$\tau_{КЛ} = \frac{1}{2} \cdot (t_{D.B} - t_{D.0}); \quad (2.16)$$

$$\tau_{ВЛ2} = \frac{1}{2} \cdot (t_{D.C} - t_{D.0}). \quad (2.17)$$

Выражения для случая КЗ на участке ВЛ2 (рисунок 2.21) и сигналов на ПС Тамань:

$$\tau_{ВЛ1} = \frac{1}{2} \cdot (t_{A.B} - t_{A.0}); \quad (2.18)$$

$$\tau_{КЛ} = \frac{1}{2} \cdot (t_{A.C} - t_{A.0}); \quad (2.19)$$

$$\tau_{ВЛ2} = \frac{1}{2} \cdot (t_{A.D} + t_{A.КЗ}) - t_{A.0}. \quad (2.20)$$

Выражения для случая КЗ на участке ВЛ2 (рисунок 2.21) и сигналов на ПС Кафа:

$$\tau_{ВЛ1} = \frac{1}{2} \cdot (t_{D.A} - t_{D.B}); \quad (2.21)$$

$$\tau_{КЛ} = \frac{1}{2} \cdot (t_{D.B} - t_{D.C}); \quad (2.22)$$

$$\tau_{ВЛ2} = \frac{1}{2} \cdot (t_{D.КЗ} + t_{D.C}) - t_{D.0}. \quad (2.23)$$

Анализируя диаграммы на рисунках 2.20-2.21, а также соответствующие выражения 2.12-2.23, можно сделать вывод, что более эффективно и точно определять время распространения по тому или иному участку КВЛ можно по тем выражениям, которые включают в себя только два значения времени прибытия волн к местам измерений, причём вторым значением времени должно быть время прибытия первой волны к соответствующему месту измерения. Это обусловлено тем, что определить время прибытия первой волны к месту измерения гораздо проще, поскольку она обладает наибольшей величиной, а её фронт не так сильно искажён из-за дисперсии. Таким образом наиболее эффективными для определения значений времени распространения являются выражения 2.16-2.17 и 2.18-2.19. Иными словами при КЗ на ВЛ1 более точно можно определить значения времени распространения по участкам ВЛ2 и КЛ, используя осциллограммы со стороны ПС Кафа. А при КЗ на ВЛ2 более точными будут измерения значений времени распространения по участкам ВЛ1 и КЛ с использованием осциллограмм со стороны ПС Тамань. Такой подход был применён при анализе осциллограмм, что отражено далее на рисунке 2.22. Однако есть некоторые исключения, связанные с тем, что точное время прибытия некоторых волн было трудно определить.

Используя указанные выше соотношения, в результате анализа осциллограмм для разных случаев КЗ были определены значения времён распространения, которые изображены на рисунке 2.22. На этом рисунке отображены вероятные значения времени распространения для разных участков КВЛ, определённые по осциллограммам разных случаев КЗ, записанных на разных концах ЛЭП. На рисунке 2.22 а,в,д отображены значения времени распространения для участков ВЛ1, ВЛ2 и КЛ соответственно. На рисунке 2.22 б,г,е отображены производные значения: длина воздушных участков КВЛ (ВЛ1 и ВЛ2) и скорость распространения волн по кабельному участку КВЛ (КЛ), которые были рассчитаны по определенным значениям времени распространения как было указано выше.

На рисунке 2.22 синими круглыми маркерами обозначены значения, определённые по осциллограммам со стороны ПС Тамань, а красными крестообразными маркерами обозначены значения, определённые по осциллограммам со стороны ПС Кафа. Вертикальными короткими отрезками соответствующих цветов обозначены медианные значения для соответствующего номера КЗ. Вертикальными серыми пунктирными линиями отображены выбранные значения времён распространения для участков КВЛ, которые наиболее близки к медианным значениям всех случаев КЗ. Наличие нескольких точек для одного и того же случая КЗ обусловлено тем, что время появления фронта соответствующих волн в сигнале трудно определить однозначно. При этом для некоторых случаев КЗ это и вовсе нереализуемо, поэтому для этих случаев КЗ на рисунке 2.22 отсутствуют значения.

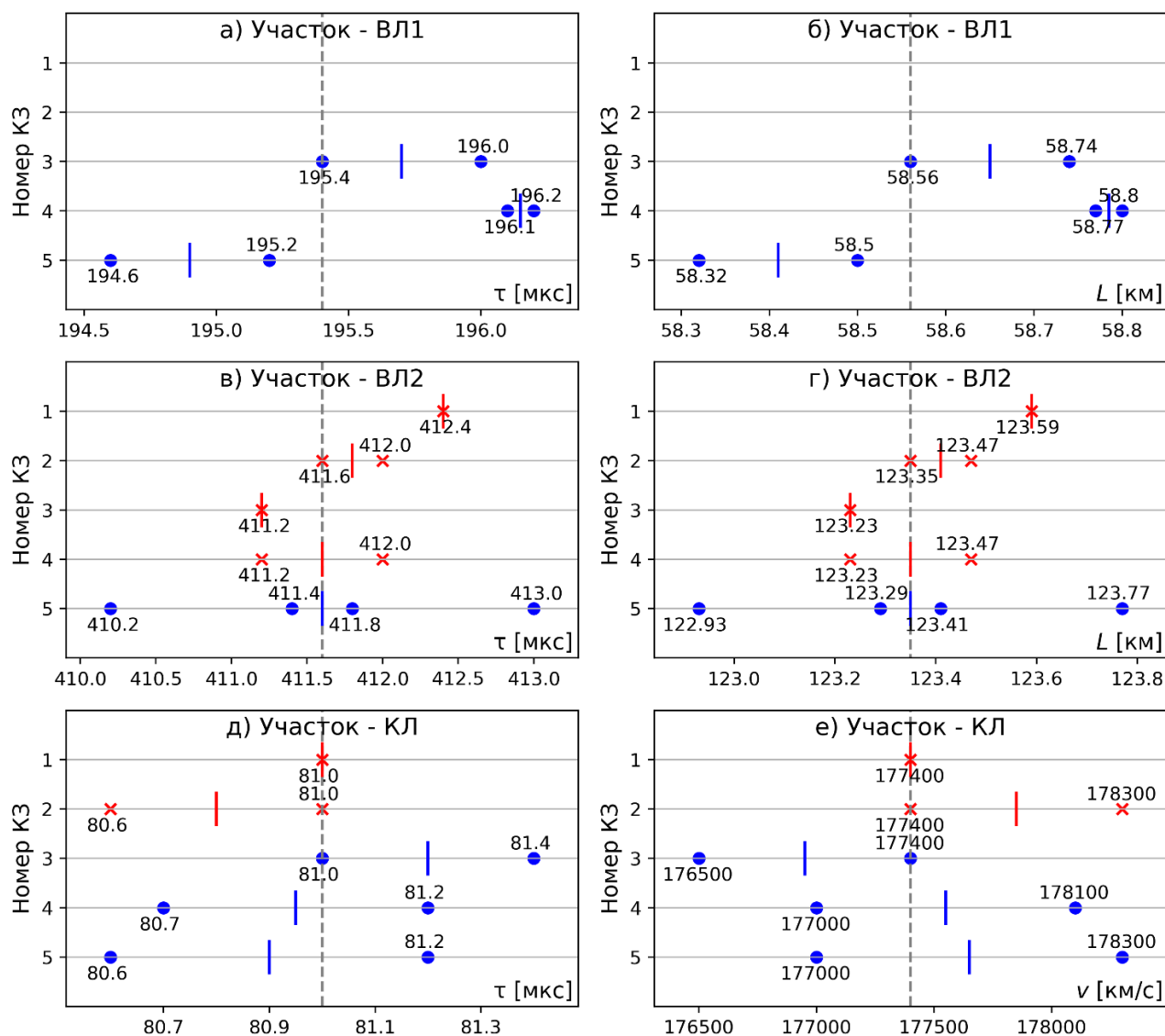


Рисунок 2.22 – Вычисленные по осциллограммам параметры участков КВЛ

Параметры распространения волн по участкам КВЛ, определённые по анализу осциллограмм, представлены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Определенные с использованием реальных осциллограмм параметры распространения волн на КВЛ 220кВ Тамань-Кафа I цепь

| Участок КВЛ | Время распространения, мкс | Длина участка, км | Скорость распространения, км/с |
|-------------|----------------------------|-------------------|--------------------------------|
| ВЛ1 | 195,4 | 58,56 | 299700 ^{1, 3)} |
| ВЛ2 | 411,6 | 123,35 | 299700 ^{1, 3)} |
| КЛ | 81,0 | 14,374 | 177400 ^{2, 3)} |

Примечания:

1) Значение справедливо для сигналов междупазного волнового канала, но, поскольку составляющие этого волнового канала преобладают в сигнале поврежденной фазы, на практике

указанное значение скорости можно использовать и при анализе времени прибытия волн непосредственно в фазных сигналах;

2) Значение справедливо для сигналов фазных координат (поскольку волна по однофазному кабелю распространяется в основном в пространстве между жилой и экраном однофазного кабеля, практически не проникая в кабели других фаз [116]);

3) Стоит отметить что, строго говоря, скорость распространения волны зависит от частоты (дисперсия), но в рассматриваемом случае, в задаче анализа осциллограмм и оценки времени появления фронта соответствующей отраженной волны в сигнале, допустимо использовать указанные значения (доминирующие частотные компоненты фронта волны распространяются с указанными скоростями).

Как можно видеть из таблиц 2.3 и 2.1, рассчитанные по реальному времени распространения волн по КВЛ длины воздушных участков отличаются от медианных значений длин в исходных данных следующим образом:

- Для ВЛ1 разница составляет $58,56 - 57,45 = +1,11$ км или $+1,9\%$ от длины участка;
- Для ВЛ2 разница составляет $123,35 - 123,56 = -0,21$ км или $-0,17\%$ от длины участка (как можно видеть, если изначально принять за истинную длину участка медианное значение, то для того, чтобы получить измеренное значение времени распространения волны по этому участку, скорость распространения должна превышать скорость света в вакууме).

2.4.4 Имитационная модель в PSCAD, оценка адекватности и точности модели

Вся указанная исходная информация, а также рассчитанные параметры КВЛ позволили создать модель электрической сети, включающей рассматриваемую КВЛ (рисунок 2.23).

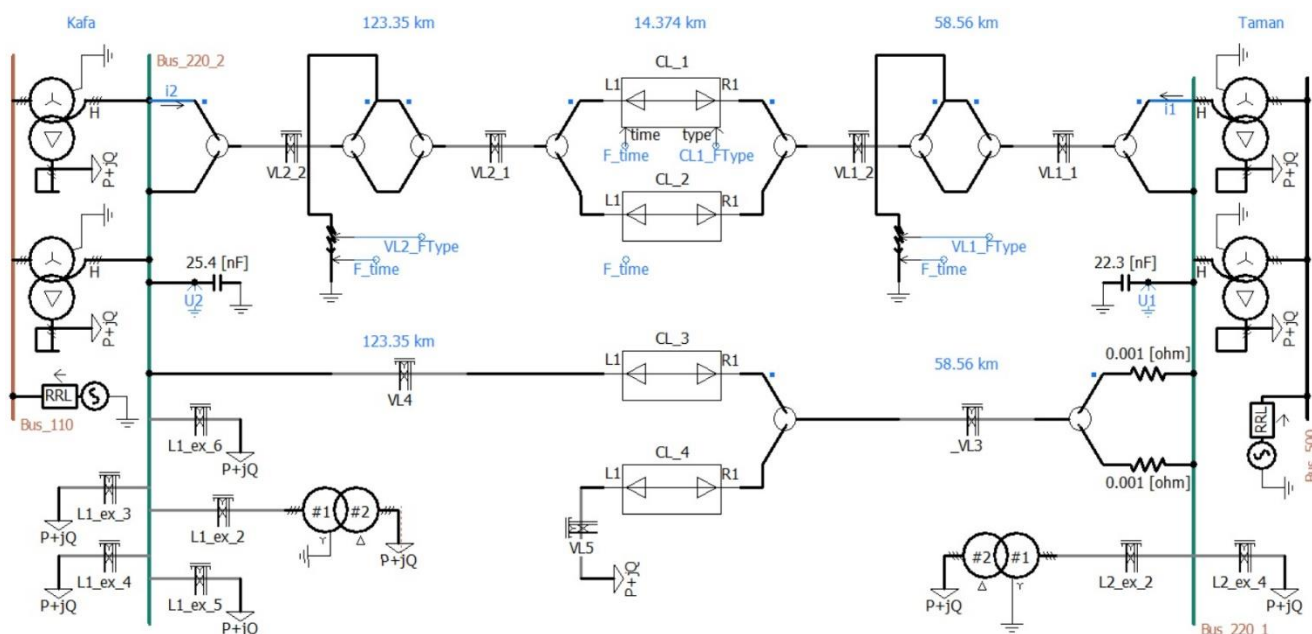


Рисунок 2.23 – Модель электрической сети, включающая рассматриваемую КВЛ, в PSCAD

Модель КВЛ, представленная на рисунке 2.23, включает:

1. КВЛ Тамань-Кафа, содержащая различные участки линии, а также смежные ЛЭП;
2. Эквивалентные емкости, имитирующие влияние силового оборудования подстанции (ПС) (силовые трансформаторы, измерительные трансформаторы, выключатели, разъединители, шины и т.п.) на коэффициент отражения волн от шин ПС (значения емкостей рассчитываются по методике, изложенной в [113]);
3. Силовые трансформаторы, источники напряжения и электрические нагрузки, необходимые для регулирования параметров установившихся режимов.

Как отмечено в публикациях [117-119], адекватность и точность модели можно оценить посредством сравнения реальных сигналов с модельными сигналами. Это выполняется путем визуального анализа, а также математически путем расчета коэффициента корреляции (функции взаимной корреляции). При этом для сигналов, не прошедших фильтрацию, следует использовать коэффициент корреляции, вычисляемый по выражению 2.24 – с центрированием выборок сигналов. А для сигналов, прошедших ВЧ фильтрацию, в которых удалена постоянная составляющая, возможно использовать более простое выражение 2.25. Также стоит учитывать, что из-за различий в искажениях фронтов волн в реальном и модельном сигналах максимальная корреляция может достигаться при значении m (выражения 2.24-2.25) отличном от нуля. Поэтому значения корреляции вычисляются в некотором диапазоне значений m , и выбирается максимальное значение корреляции.

$$r_{xy}(m) = \frac{\sum_{k=0}^{N-1} [(x(k) - \bar{x}) \cdot (y(k+m) - \bar{y})]}{\sqrt{\sum_{k=0}^{N-1} (x(k) - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\sum_{k=0}^{N-1} (y(k) - \bar{y})^2}}; \quad (2.24)$$

$$r_{xy}(m) = \frac{\sum_{k=0}^{N-1} [x(k) \cdot y(k+m)]}{\sqrt{\sum_{k=0}^{N-1} x(k)^2} \cdot \sqrt{\sum_{k=0}^{N-1} y(k)^2}}, \quad (2.25)$$

где r_{xy} – коэффициент корреляции для двух сигналов x и y ; m – величина сдвига одного сигнала относительно другого; N – количество отсчетов сигнала, используемых для оценки взаимной корреляции (N одинаково для x и y); \bar{x} и \bar{y} – средние значения сигналов x и y соответственно.

Оценим адекватность и точность модели путём сравнения модельных сигналов с реальными сигналами осциллограмм.

На рисунках 2.24–2.25 изображено сопоставление реальных и модельных сигналов для одного случая КЗ №5 согласно таблице 2.2. Сопоставление реальных и модельных сигналов для всех случаев КЗ, указанных в таблице 2.2, представлено в Приложении Б. Красной линией отображен реальный сигнал (например, $i_{1R(\Phi,B)}$), синей – модельный (например, $i_{1M(\Phi,B)}$). На рисунках 2.24–2.25 изображены одни и те же сигналы, но в разных временных масштабах.

Первый временной интервал был рассчитан как удвоенное время распространения волны по рассматриваемой КВЛ, умноженное на 1.1 для запаса ($688 \times 2 \times 1,1 \approx 1500$ мкс). Второй интервал взят как 10% первого интервала с целью показать более детально фронт начальной волны.

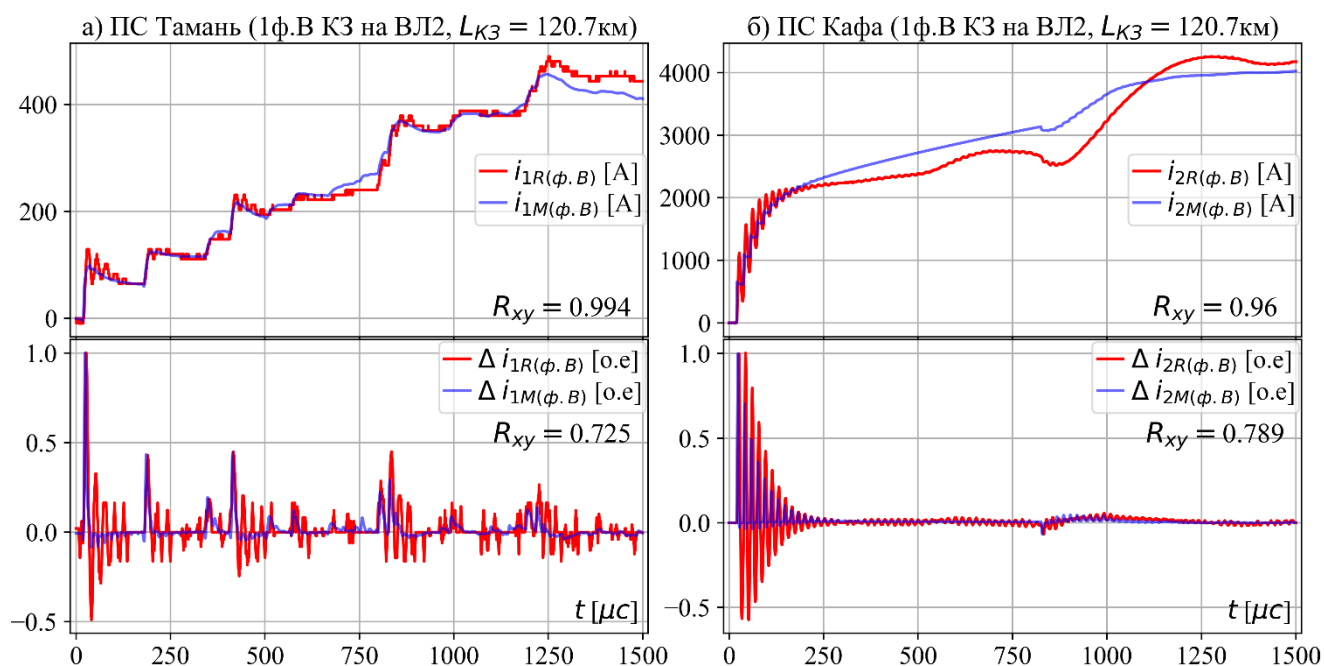


Рисунок 2.24 – Сопоставление реальных и модельных сигналов для случая КЗ №5 на большом интервале времени

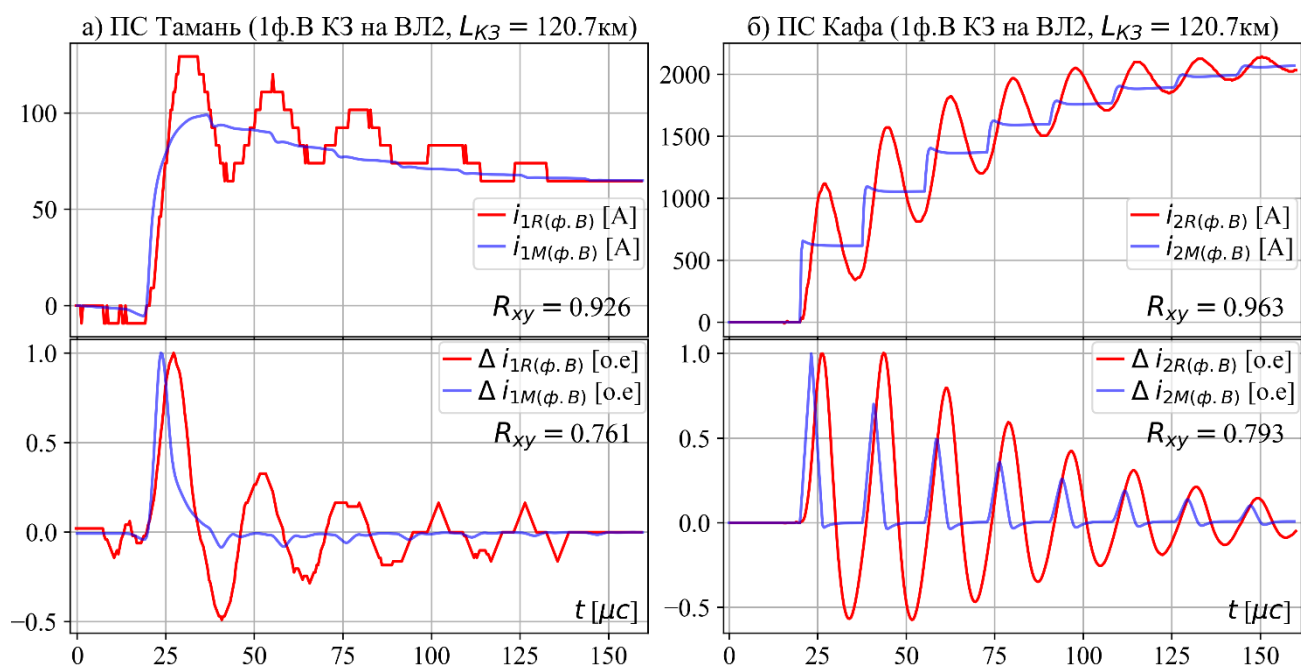


Рисунок 2.25 – Сопоставление реальных и модельных сигналов для случая КЗ №5 на коротком интервале времени

Левая часть рисунков 2.24–2.25 под буквой «а» отображает сигналы тока со стороны подстанции Тамань (i_1), а правая часть рисунок под буквой «б» отображает сигнал тока со стороны подстанции Кафа (i_2). На верхних графиках рисунков отображены сигналы, не

прошедшие никакой обработки, за исключением вычитания из всех выборок сигнала значения сигнала в момент времени за несколько микросекунд (20 мкс) до обнаружения волны (i_{1R} , i_{1M} , i_{2R} и i_{2M}). На нижних графиках рисунков показаны те же сигналы, но прошедшие дифференциально-сглаживающую фильтрацию, рассмотренную в п.3.4, с окном данных фильтра 8 мкс, а также нормированные по амплитуде (Δi_{1R} , Δi_{1M} , Δi_{2R} и Δi_{2M}). Дополнительно на соответствующих графиках размещены значения коэффициента корреляции сигналов. Коэффициенты корреляции сигналов, прошедших ВЧ фильтрацию, для всех случаев КЗ, перечисленных в таблице 2.2, вынесены в таблицу 2.4. Стоит отметить, что сигналы с разных концов ЛЭП совмещены по времени прихода первой волны, поэтому они не отображают временной сдвиг появления волн на разных концах ЛЭП.

Особенностью рассматриваемых осциллограмм является период дискретизации равный 0,4 мкс, что соответствует частоте дискретизации 2,5 МГц. Другой особенностью осциллограмм является то, что шаг дискретизации по амплитуде сигнала довольно большой и составляет 10 А (в первичных единицах). Это проявляется прежде всего в ступенчатом изменении реального сигнала, что особенно заметно при относительно малых амплитудах фронтов волн, и приводит к дополнительным искажениям фронта волны. Также это вызывает появление во многих сигналах дополнительных шумов квантования, что выглядит на осциллограммах как своеобразный "дребезг" регистрируемого сигнала. Всё это приводит к повышенной зашумлённости сигнала, что можно наблюдать на некоторых рисунках. Тем не менее как можно наблюдать по рисункам 2.24-2.25, рисункам Б.1 – Б.10 в Приложении Б, а также по значениям в таблице 2.4, коэффициент корреляции устойчив к подобным шумам.

Таблица 2.4 – Значения коэффициента корреляции для сигналов, прошедших ВЧ фильтрацию, изображенных на рисунках Б.1 – Б.10 в Приложении Б

| Номер и тип КЗ | Коэффициент корреляции для сигналов со стороны: | | | |
|------------------------|---|-----------|--------------------------|-----------|
| | «ПС Тамань» на интервалах: | | «ПС Кафа» на интервалах: | |
| | 0-1500 мкс | 0-150 мкс | 0-1500 мкс | 0-150 мкс |
| №1 ВЛ1-4,3 км (1ф.С) | 0,671 | 0,663 | 0,781 | 0,83 |
| №2 ВЛ1-13,9 км (1ф.В) | 0,523 | 0,571 | 0,49 | 0,521 |
| №3 ВЛ1-50,9 км (1ф.С) | 0,638 | 0,718 | 0,777 | 0,8 |
| №4 ВЛ2-90,3 км (1ф.А) | 0,75 | 0,801 | 0,762 | 0,752 |
| №5 ВЛ2-120,7 км (1ф.В) | 0,725 | 0,761 | 0,789 | 0,793 |

Анализируя рисунки Б.1 – Б.10 в Приложении Б, а также таблицу 2.4 можно сделать вывод о том, что для большинства случаев КЗ реальный и модельный сигналы достаточно похожи и модель адекватна, о чём можно судить по соответствию значений времени прихода и значений

относительной амплитуды фронтов отраженных волн, а также по достаточно большому коэффициенту корреляции на временном интервале 1500 мкс. Исключением являются сигналы для случая КЗ №2, при котором реальные сигналы имеют большее искажение фронта волны по сравнению с остальными случаями КЗ. При этом, если рассматривать начало переходного процесса в интервале 0-150 мкс, то для всех случаев КЗ налицо несоответствие формы фронтов волн в реальном и модельном сигналах. Такое несоответствие можно объяснить влиянием переходной характеристики токовой измерительной цепи, включающей в себя: высоковольтный ТТ, вторичные цепи, а также низковольтный ТТ или датчик тока самого устройства ВОМП, которые не учитываются в модели. В самом устройстве ВОМП сигнал после трансформации датчиком тока и перед попаданием на АЦП может проходить дополнительную аналоговую фильтрацию. В этом случае в измерительную цепь также входит это звено. Тем не менее, как отмечено в [117-119], можно значительно снизить несоответствие формы фронта начальной волны в сигналах и повысить точность модели за счёт определения импульсной характеристики измерительной цепи и учёта её в модельных сигналах.

2.4.5 Оценка переходной характеристики токовой измерительной цепи с использованием модельных и реальных сигналов

Используя реальные и модельные сигналы, возможно косвенно рассчитать импульсную характеристику токовой измерительной цепи (высоковольтный ТТ – вторичные цепи – датчик тока). При этом делается допущение, что разница между модельным сигналом и реальным сигналом в начале переходного процесса (период времени от нескольких десятков до нескольких сотен микросекунд после регистрации первой волны) объясняется исключительно тем, что в модели не учтена только измерительная цепь. Тогда такую измерительную цепь можно рассматривать как некоторый фильтр, входным сигналом которого является модельный сигнал, а выходным – реальный сигнал. В этом случае импульсная характеристика этого фильтра (ТТ со вторичными цепями) оценивается известными методами с использованием входного и выходного сигналов.

Возможно использовать вычисленную таким образом импульсную характеристику, чтобы применить так называемую деконволюцию реального сигнала (свертка реального сигнала с обратной импульсной характеристикой измерительного звена с целью восстановить исходную форму сигнала) [120]. Однако в данном случае проще и эффективнее выполнить свертку рассчитанной импульсной характеристики с модельным сигналом, особенно если учесть отмеченную выше зашумленность реального сигнала, что делает деконволюцию еще более неэффективной.

Импульсные характеристики вычислялись для каждого случая КЗ с использованием фазных сигналов повреждённой фазы, что проводилось в четыре этапа:

- 1) Предобработка сигналов, которая заключается в согласовании уровня сигналов;
- 2) Вычисление импульсной характеристики, используя входной (модельный) и выходной (реальный) сигналы;
- 3) Фильтрация вычисленной импульсной характеристики посредством вычисления дискретного преобразования Фурье (ДПФ) и зануления гармонических составляющих выше заданной частоты, как показано на рисунках 2.26 – 2.27 (в, г);
- 4) Аппроксимация вычисленной характеристики заданной функцией.

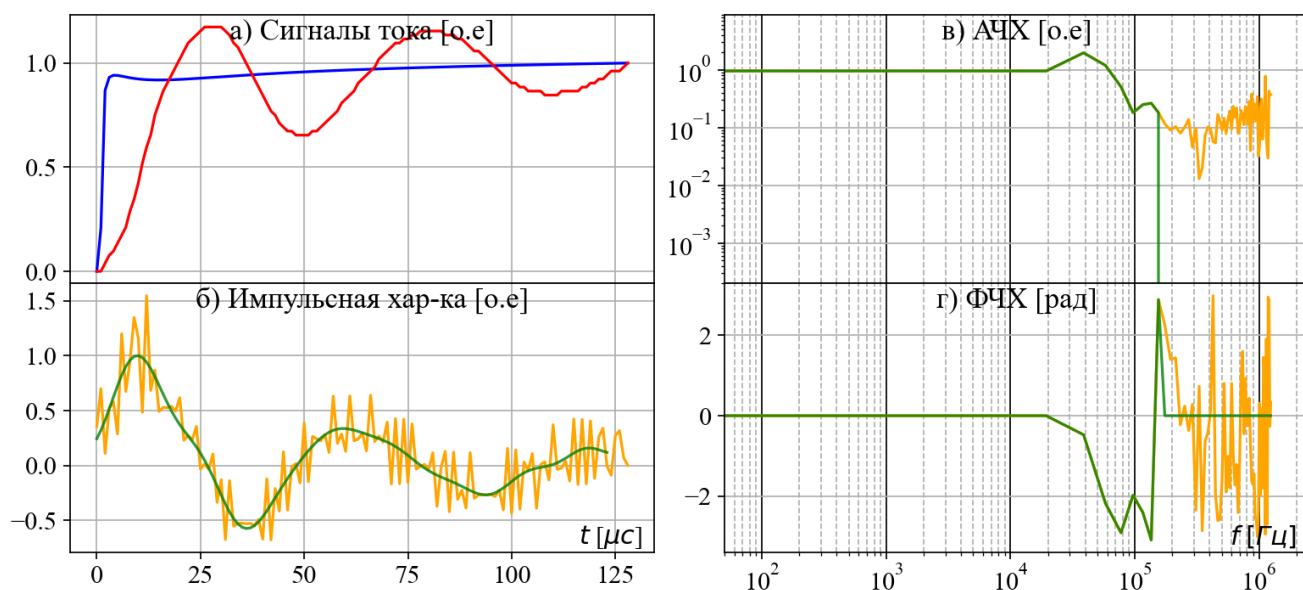


Рисунок 2.26 – Определение импульсной характеристики для сигнала со стороны ПС Тамань при КЗ №3

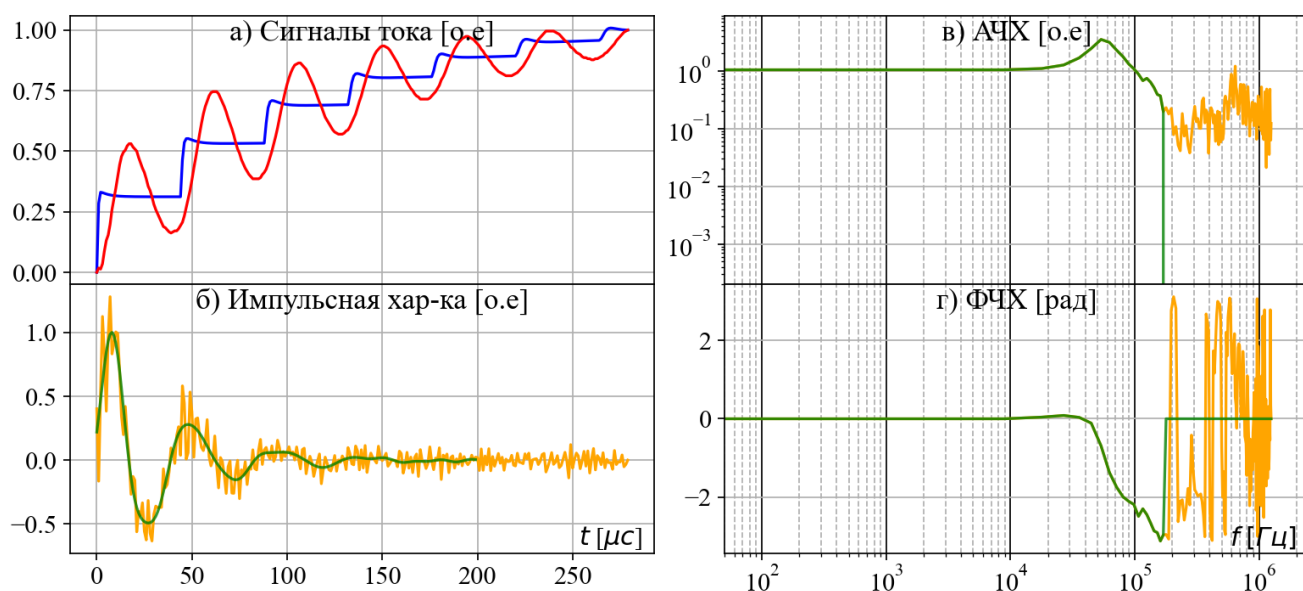


Рисунок 2.27 – Определение импульсной характеристики для сигнала со стороны ПС Тамань при КЗ №5

На рисунках 2.26 – 2.27 проиллюстрированы первые три этапа определения импульсной характеристики для сигналов, соответствующих двум случаям КЗ: сигнал со стороны ПС Тамань

при КЗ №3 (рисунок 2.26) и сигнал со стороны ПС Кафа при КЗ №5 (рисунок 2.27) в соответствии с нумерацией таблицы 2.2. На рисунках 2.26 – 2.27 под буквой «а» отображены реальный (красная линия) и модельный (синяя линия) сигналы, под буквой «б» показаны вычисленная импульсная характеристика (оранжевая линия) и сглаженная характеристика (зелёная линия), а под буквами «в» и «г» соответствующие им АЧХ и ФЧХ.

На четвёртом этапе вычисленная характеристика аппроксимировалась функцией вида:

$$h(t) = A \cdot e^{-(T_3)^{-1} \cdot t} \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t + \varphi), \quad (2.26)$$

где: T_3 – время, за которое амплитуда колебаний уменьшается в e раз [с]; f – собственная резонансная частота измерительного звена, для которого определяется импульсная характеристика [Гц]; φ – начальная фаза [рад].

Целью аппроксимации являлось определение f и T_3 для каждого случая КЗ и определение по ним средних значений f и T_3 для каждой отдельной фазы. Так на рисунке 2.28 отображены вычисленные и сглаженные импульсные характеристики (зелёные линии), а также – соответствующие аппроксимации (лиловые линии) для каждого случая КЗ для ПС Тамань (рисунок 2.28 а) и ПС Кафа (рисунок 2.28 б). Нумерация КЗ на рисунке соответствует таблице 2.2.

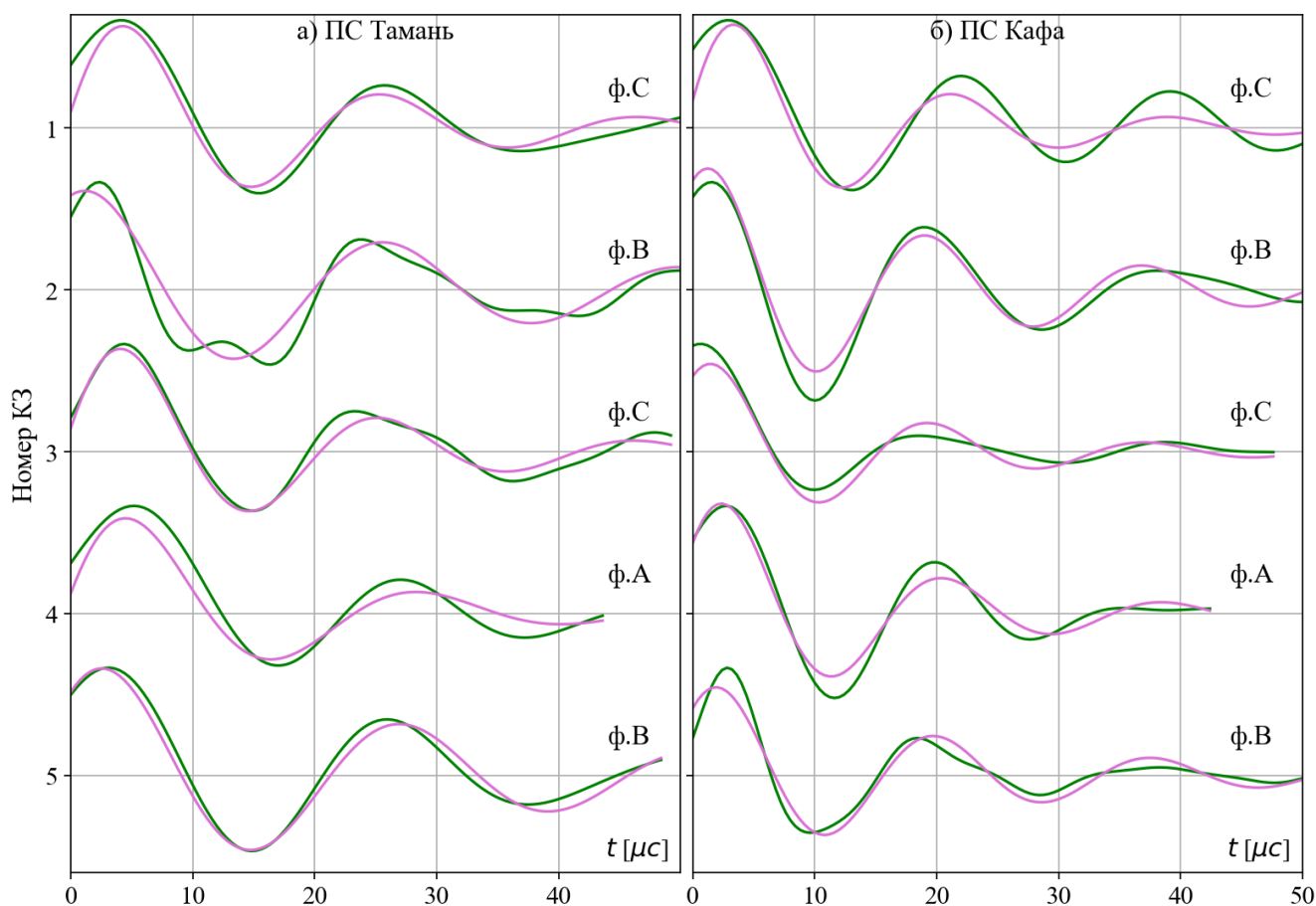


Рисунок 2.28 – Импульсные характеристики для каждого случая КЗ (зелёные линии) и их аппроксимации (лиловые линии)

В результате аппроксимации были получены значения f и T_3 для каждой фазы, приведённые в таблице 2.5. После определения указанных в таблице 2.5 значений итоговая импульсная характеристика для каждой фазы вычислялась по выражению 2.26 при начальной фазе (φ) равной нулю и при значении амплитуды (A), при котором сумма значений импульсной характеристики равна единице. Длина импульсной характеристики ограничивалась 3 или 4 периодами собственных колебаний ($N=3\cdot 1/f$ или $N=4\cdot 1/f$) в зависимости от величины T_3 .

Таблица 2.5 – Параметры импульсных характеристик токовых измерительных цепей каждой фазы и для обоих концов ЛЭП

| Параметр | ПС Тамань | | | ПС Кафа | | |
|-------------|-----------|-------|-------|---------|-------|-------|
| | ф. А | ф. В | ф. С | ф. А | ф. В | ф. С |
| f , кГц | 42,0 | 41,0 | 47,5 | 55,5 | 56,25 | 56,25 |
| T_3 , мкс | 16,13 | 33,33 | 19,05 | 16,0 | 22,22 | 16,0 |

Таким образом были определены импульсные характеристики токового измерительного звена для каждой фазы и для обоих концов ЛЭП, которые отображены на рисунке 2.29 а,б. На рисунке также отображены соответствующие частотные характеристики (рисунок 2.29 в-е). ПС Тамань соответствуют графики на рисунке 2.29 а,в,д, а ПС Кафа – графики на рисунке 2.29 б,г,е.

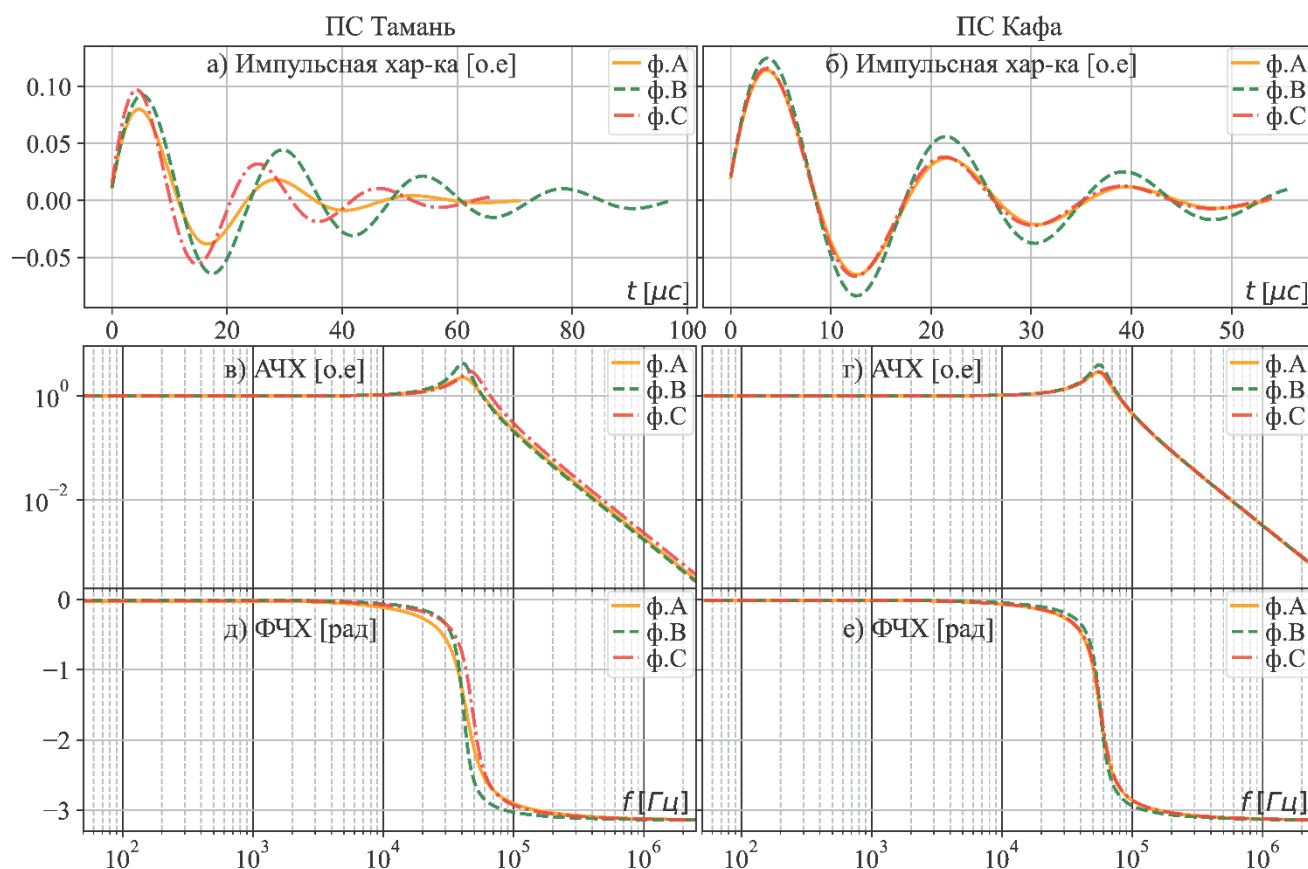


Рисунок 2.29 – Импульсные и частотные характеристики токового измерительного звена для каждой фазы и для обоих концов КВЛ 220кВ Тамань-Кафа I цепь

2.4.6 Учет вычисленных импульсных характеристик токовых измерительных звеньев в модельных сигналах и итоговая оценка точности модели

Как отмечалось выше, учет вычисленных импульсных характеристик токовых измерительных звеньев целесообразно выполнить посредством свёртки модельного сигнала с импульсной характеристикой. Причём для этого используется импульсная характеристика повреждённой фазы. Так на рисунках 2.30 – 2.31 изображено сопоставление реальных сигналов и модельных сигналов, свернутых с соответствующими импульсными характеристиками. Характер рисунков, цветовая маркировка и обозначения полностью соответствуют рисункам 2.24 – 2.25, представленным выше. Коэффициенты корреляции сигналов, прошедших ВЧ фильтрацию, с учетом импульсных характеристик в модельных сигналах, для всех случаев КЗ, перечисленных в таблице 2.2, вынесены в таблицу 2.6.

Сопоставляя рисунки 2.24 – 2.25 и 2.30 – 2.31, рисунки Б.1 – Б.10 и Б.11 – Б.20 в Приложении Б, а также таблицы 2.4 и 2.6, можно сделать вывод, что учёт импульсных характеристик в модельных сигналах существенно повышает совпадение модельных сигналов с реальными для всех случаев КЗ (в том числе для случая КЗ №2), что выражается в повышении коэффициента корреляции. Так, в соответствии с таблицей 2.4, без учета импульсной характеристики измерительного звена среднее значение коэффициента корреляции сигналов на интервале 0-1500 мкс составляет 0,69 при минимальном значении 0,49. А с учетом импульсной характеристики (таблица 2.6) среднее значение коэффициента корреляции сигналов на интервале 0-1500 мкс составляет 0,89 при минимальном значении 0,833.

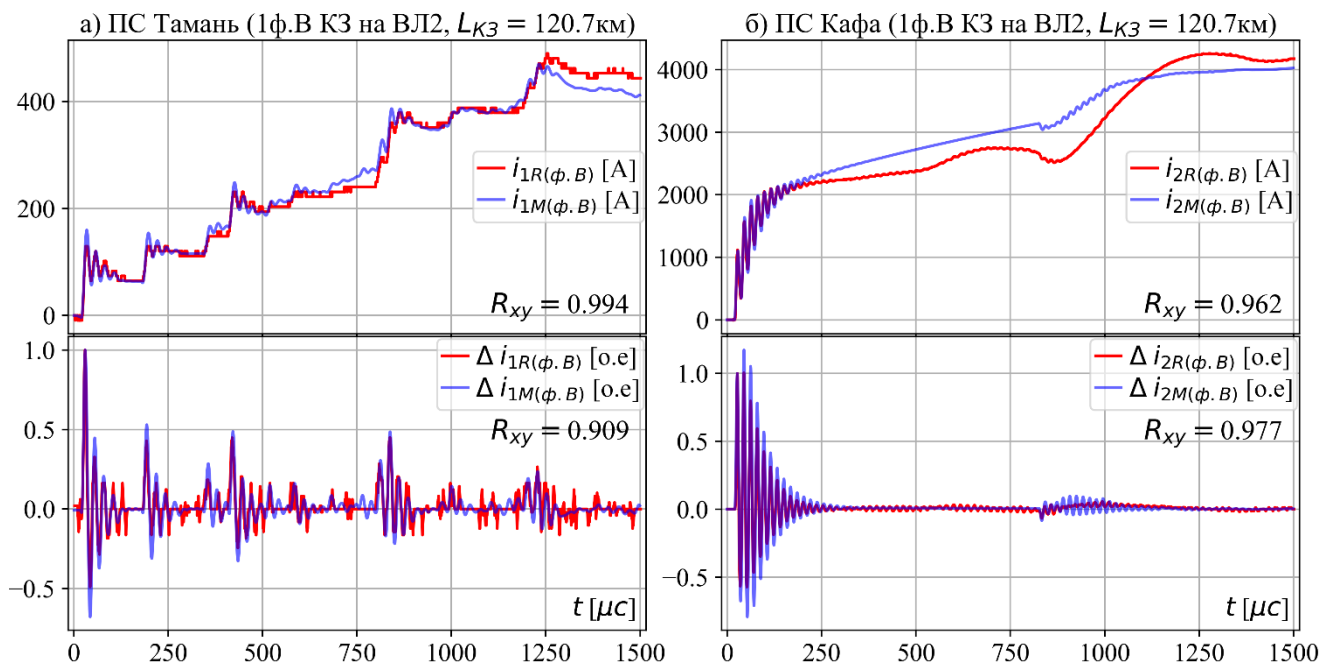


Рисунок 2.30 – Сопоставление реальных и модельных сигналов с учетом импульсной характеристики измерительного звена для случая КЗ №5 на большом интервале времени

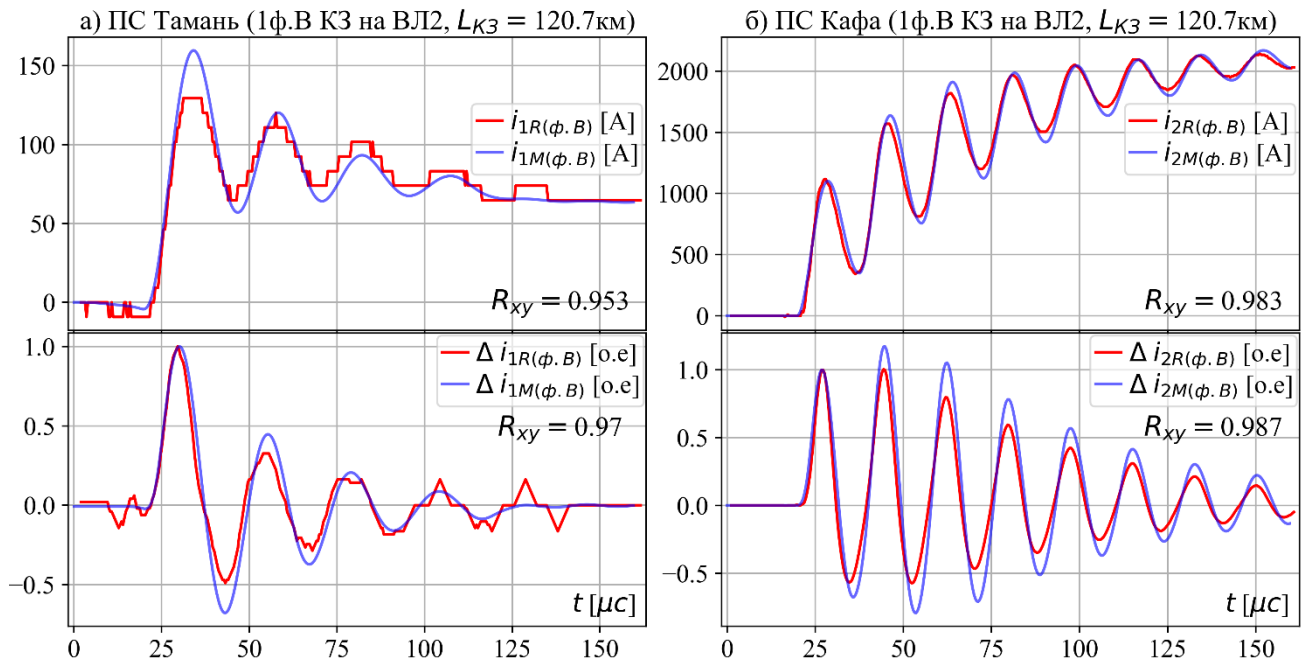


Рисунок 2.31 – Сопоставление реальных и модельных сигналов с учетом импульсной

характеристики измерительного звена для случая КЗ №5 на коротком интервале времени

Таблица 2.6 – Значения коэффициента корреляции для сигналов, прошедших ВЧ фильтрацию, изображенных на рисунках 2.30 – 2.31 и Б.11 – Б.20 в Приложении Б, с учетом импульсной характеристики ТТ

| Номер и тип КЗ | Коэффициент корреляции для сигналов со стороны: | | | |
|------------------------|---|-----------|--------------------------|-----------|
| | «ПС Тамань» на интервалах: | | «ПС Кафа» на интервалах: | |
| | 0-1500 мкс | 0-150 мкс | 0-1500 мкс | 0-150 мкс |
| №1 ВЛ1-4,3 км (1ф.С) | 0,91 | 0,946 | 0,857 | 0,977 |
| №2 ВЛ1-13,9 км (1ф.В) | 0,862 | 0,917 | 0,833 | 0,915 |
| №3 ВЛ1-50,9 км (1ф.С) | 0,864 | 0,977 | 0,878 | 0,97 |
| №4 ВЛ2-90,3 км (1ф.А) | 0,84 | 0,938 | 0,971 | 0,993 |
| №5 ВЛ2-120,7 км (1ф.В) | 0,909 | 0,97 | 0,977 | 0,987 |

Таким образом можно утверждать, что модель адекватна и достаточно точна и может использоваться для имитационных экспериментов и исследований отличий повреждений на различных участках КВЛ, а также для полунатурных испытаний разработанных алгоритмов АПВ и ОМП КВЛ, которые представлены в главе 4.

2.4.7 Анализ уникальности признаков волнового процесса для каждого поврежденного участка КВЛ и места повреждения вдоль всей длины КВЛ

Целесообразно оценить насколько волновые портреты различаются для каждого поврежденного участка и возможного места повреждения КВЛ, поскольку если ряд волновых портретов будут очень похожи, то появляется значительная вероятность ошибки определения

поврежденного участка и места повреждения. Для этого составим набор волновых портретов путем имитационного моделирования однофазных КЗ вдоль всей длины КВЛ с заданным шагом (100 м на воздушных участках и 50 м на кабельном). Возьмем некоторый волновой портрет из набора и вычислим коэффициенты корреляции этого портрета со всеми портретами набора, включая его самого, используя выражение 2.25. Повторим это для всех волновых портретов из набора от первого до последнего. Поскольку количество волновых портретов в наборе для рассматриваемой КВЛ составляет 2108 шт., удобно отобразить значения коэффициентов корреляции волновых портретов между собой в виде цветовой карты как показано на рисунках 2.32 – 2.35.

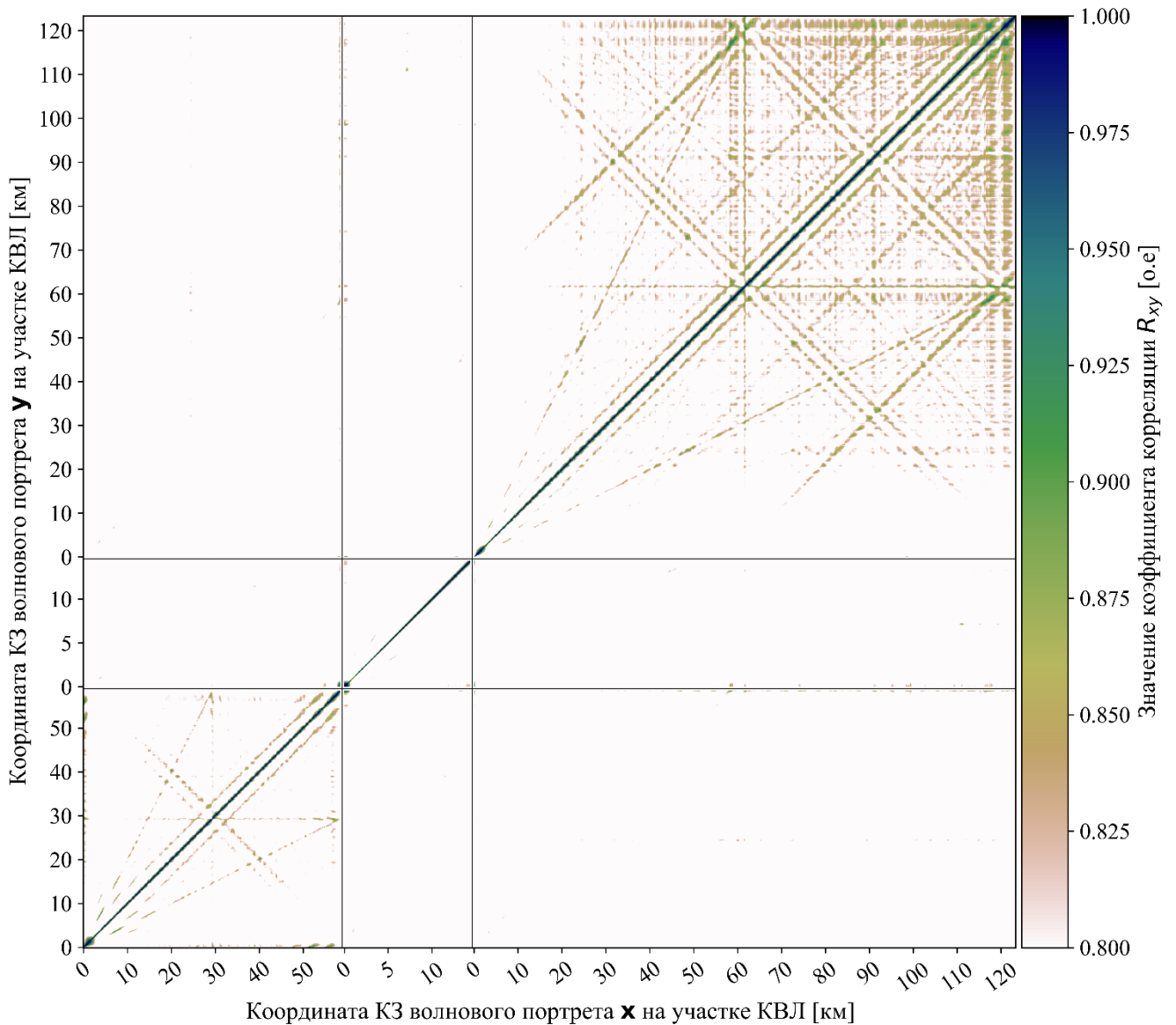


Рисунок 2.32 – Кросскорреляционная картина волновых портретов со стороны ПС Тамань

На рисунках каждая точка с координатами (x, y) отображает (в соответствии с цветовой шкалой в правой части рисунков) определенное значение коэффициента корреляции волнового портрета КЗ на ЛЭП в точке x с волновым портретом КЗ на ЛЭП в точке y . Соответственно значения коэффициента корреляции в точках с координатами (x, x) равны единице и эти точки

имеют черный цвет. При этом значения корреляции ниже 0,8 отображаются белым цветом. На рисунках 2.32 и 2.33 показаны значения корреляции волновых портретов при измерении сигналов со стороны ПС Тамань: для всей КВЛ (рисунок 2.32) и более детально для кабельного участка и кабельно-воздушных переходов (рисунок 2.33). А на рисунках 2.34 и 2.35 – аналогично для волновых портретов при измерении сигналов со стороны ПС Кафа.

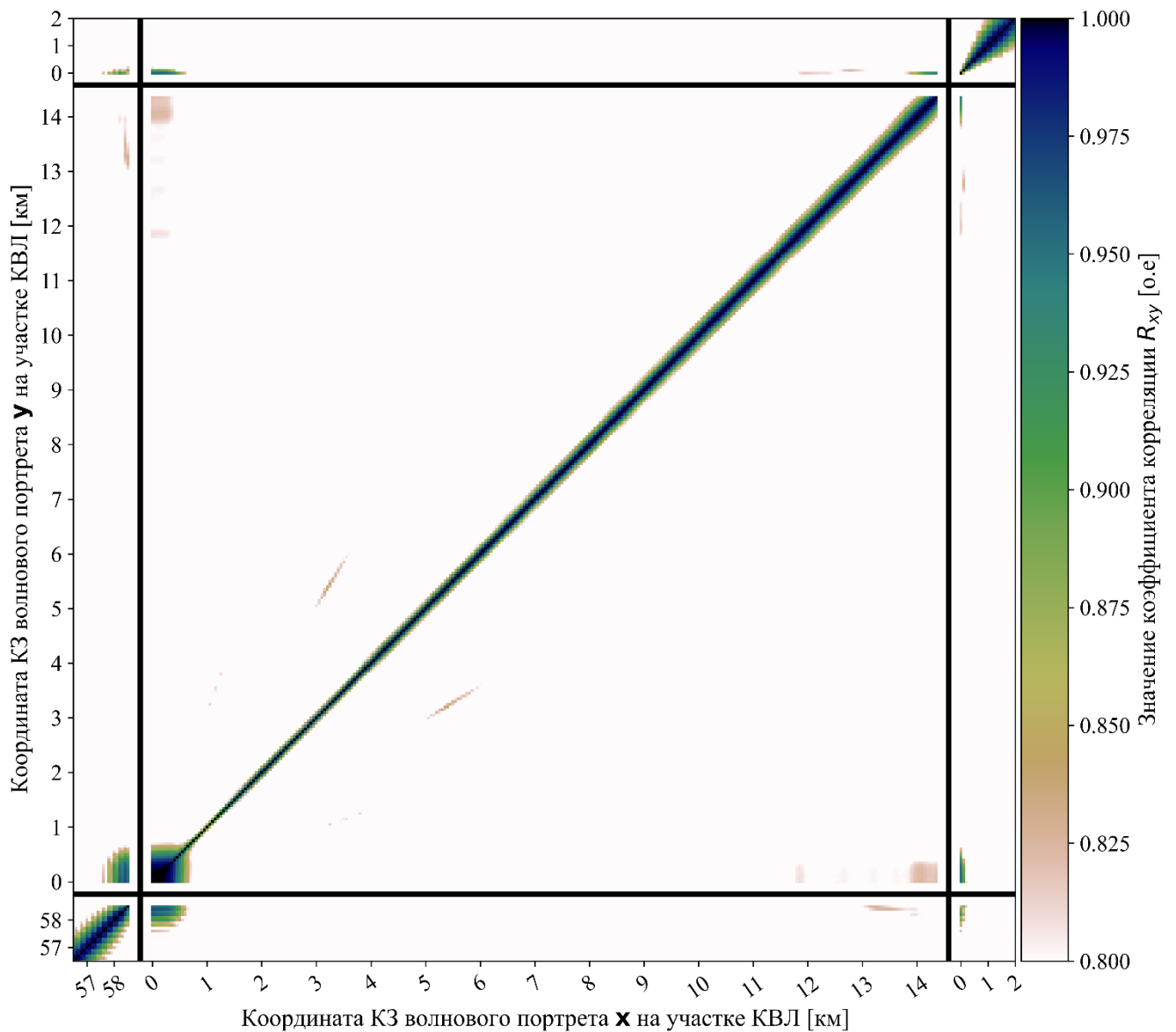


Рисунок 2.33 – Кросскорреляционная картина волновых портретов со стороны ПС Тамань (зона кабельного участка)

Для удобства восприятия на рисунках вертикальными и горизонтальными черными линиями отделены зоны корреляции волновых портретов по участкам КВЛ. При этом зоны квадратной формы соответствуют зонам кросскорреляции волновых портретов одного и того же участка КВЛ. А зоны прямоугольной (не квадратной) формы соответствуют зонам кросскорреляции волновых портретов разных участков КВЛ.

Изображения на рисунках 2.32 – 2.35 позволяют оценить «уникальность» каждого волнового портрета. В идеальном случае такая корреляционная карта должна выглядеть как

черная тонкая прямая линия с углом наклона 45° , вне которой нет цветных точек. В реальности же прямая несколько расплывается, появляются своеобразные повторяющиеся «разводы», а в других зонах наблюдаются цветные пятна, и корреляционная картина в целом «загрязняется».

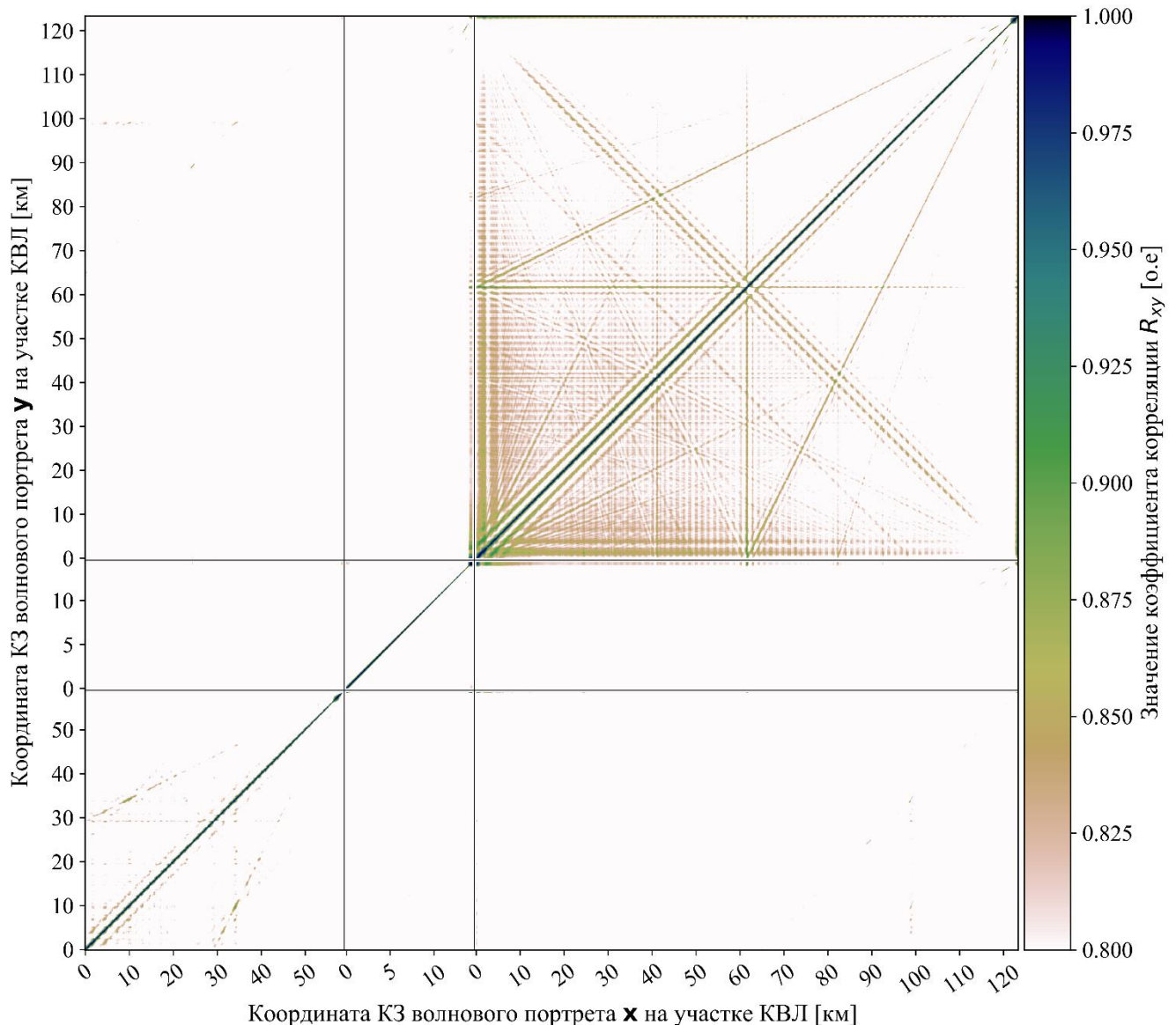


Рисунок 2.34 – Кросскорреляционная картина волновых портретов со стороны ПС Кафа

С практической стороны анализ построенных картин имеет два момента: для задачи АПВ КВЛ важно, чтобы в прямоугольных областях не было темных точек, а для задачи ОМП КВЛ важно чтобы основная линия не была слишком широкой. Как видно из рисунков 2.32 – 2.35 наблюдаются небольшие пятна сине-зеленых тонов (коэффициент корреляции от 0,875 до 0,95) в прямоугольных областях только лишь вблизи кабельно-воздушных переходов, при этом темных точек не наблюдается. Основная темная прямая линия имеет угол наклона 45° и достаточно узка. Таким образом, несмотря на относительную «загрязненность» некоторых отдельных зон, корреляционная картина показывает «уникальность» волновых портретов, соответствующих определенному поврежденному участку и месту повреждения.

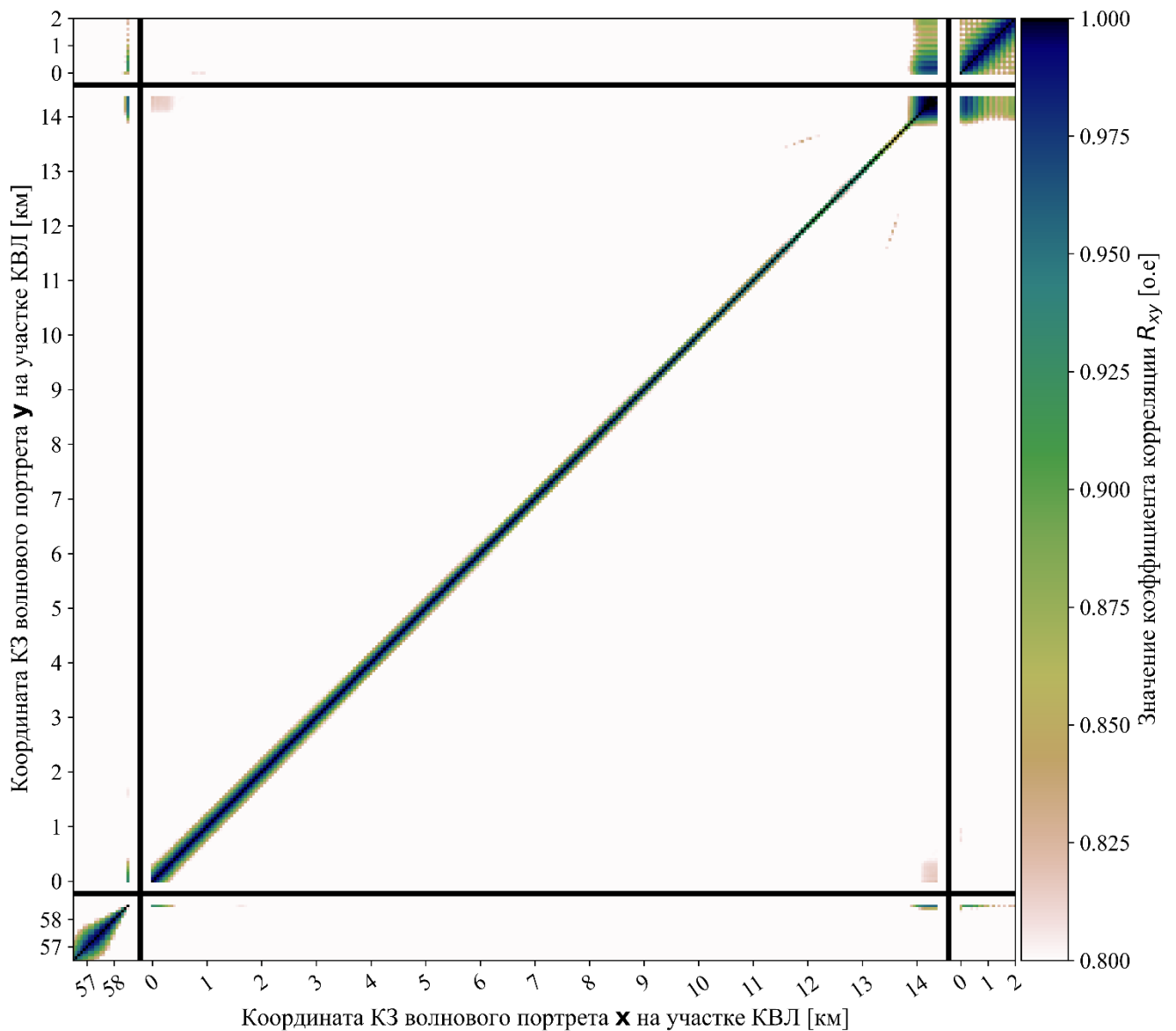


Рисунок 2.35 – Кросскорреляционная картина волновых портретов со стороны ПС Кафа (зона кабельного участка)

Стоит отметить, что было создано три набора волновых портретов – по одному на случай повреждения каждой фазы. На рисунках 2.32 – 2.35 показаны корреляционные кросскорреляционные картины волновых портретов из набора для повреждения фазы «В». Для остальных наборов строились аналогичные корреляционные картины, анализ которых показал, что они практически идентичны показанным на рисунках 2.32 – 2.35.

2.5. Выводы по главе

1. Проведены исследования волновых переходных процессов на ВЛ, КЛ и КВЛ на имитационных моделях. Произведена оценка влияния факторов разного рода на волновой процесс и, как следствие, на волновые портреты линии. Показано, что повреждения на различных участках КВЛ существенно отличаются. Основными отличительными признаками являются: время появления фронтов волн по концам ЛЭП, амплитуда фронтов волн по концам ЛЭП, вид

волнового портрета в целом. При этом большую часть факторов, влияющих на волновой сигнал, возможно учесть при составлении модели конкретного объекта.

2. Рассмотрен процесс определения волновых параметров КВЛ, а также разработки и валидации имитационной модели КВЛ с использованием сигналов реальных осциллограмм, записанных с высокой частотой дискретизации, на примере КВЛ 220кВ Тамань-Кафа I цепь. Рассмотрен процесс косвенного вычисления частотных характеристик токовых измерительных цепей на ПС (ТТ со вторичными цепями) по реальному и модельному сигналам. Эти характеристики затем учитываются в модельных сигналах для повышения соответствия реальным сигналам. Разработанная имитационная модель реальной КВЛ обладает высокой достоверностью (коэффициент корреляции модельных и реальных сигналов достигает 0,977).

3. Предложен графический метод определения различимости повреждений в различных местах на конкретной ЛЭП посредством построения кросскорреляционных карт. Построены кросскорреляционные карты для модели реальной КВЛ, показывающие уникальность волновых портретов каждого места КЗ вдоль всей длины КВЛ.

3 РАЗРАБОТКА СПОСОБОВ АВТОМАТИЧЕСКОГО ПОВТОРНОГО ВКЛЮЧЕНИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА ПОВРЕЖДЕНИЯ КАБЕЛЬНО-ВОЗДУШНЫХ ЛЭП, ОСНОВАННЫХ НА КОНТРОЛЕ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ

3.1. Способ определения поврежденного участка кабельно-воздушных ЛЭП, основанный на двусторонних несинхронизированных измерениях амплитуды фронта начальных волн

3.1.1 Особенности волнового процесса при КЗ на КВЛ, используемые в методе определения поврежденного участка КВЛ

Как указывалось ранее (п. 2.2), часть энергии волны, достигшей места неоднородности, отражается, а за место неоднородности распространяется волна с меньшей энергией, чем изначальная падающая волна. Таким образом, электромагнитная волна, распространяясь по ЛЭП с неоднородными участками – такими, как КВЛ, претерпевает дополнительное затухание, связанное с рассогласованностью волновых сопротивлений разных участков [113]. В зависимости от поврежденного участка КВЛ и места повреждения электромагнитные волны претерпевают различное затухание на пути к ПС и месту измерения. Поэтому, измерив амплитуду фронта волнового сигнала, можно косвенно определить поврежденный участок. Однако на основе только односторонних измерений сделать вывод о поврежденном участке затруднительно из-за зависимости амплитуды фронта от фазы напряжения в момент КЗ и переходного сопротивления. Целесообразно использовать измерения по двум концам ЛЭП, причем отношение сигналов токов или напряжений по двум концам КВЛ позволяет практически селективно определить поврежденный участок [121]. Рассмотрим основные принципы реализации селективного АПВ КВЛ (рисунок 3.1) таким методом.

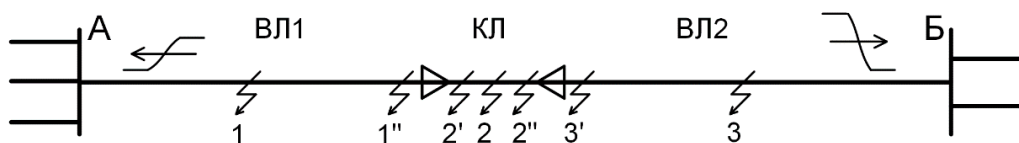


Рисунок 3.1 – Схематичное изображение КВЛ с конфигурацией ВЛ-КЛ-ВЛ

На рисунке 3.1 показана КВЛ с кабельной вставкой на удалении от обоих ПС А и Б (конфигурация ВЛ-КЛ-ВЛ). Каждому участку (m -ый участок) соответствуют свои параметры: волновое сопротивление $Z_{в.m}$ и затухание. Затухание может быть выражено через коэффициент затухания m -го участка $k_{зат.m}$, характеризующий отношение амплитуды падающей волны напряжения в конце m -го участка к амплитуде сигнала в начале этого участка. Стоит отметить, что расчет коэффициента $k_{зат.m}$ может осуществляться с использованием имитационной модели КВЛ. Также возможно использовать удельный коэффициент затухания (α_m) с учетом методик, используемых при расчете затухания линейного тракта ЛЭП для высокочастотной связи [66, 113]. В этом случае $k_{зат.m}$ определяется по выражению 3.1:

$$k_{зам.m} = e^{-0.115 \cdot \alpha_m \cdot L_m}, \quad (3.1)$$

где α_m – удельный коэффициент затухания для m -ого участка КВЛ, дБ/км; L_m – длина m -ого участка КВЛ.

Определим величину напряжения фронта падающей волны по концам КВЛ при повреждениях на различных участках (рисунок 3.1).

Для 1-го участка ЛЭП (точка 1 на рисунке 3.1) имеют место соотношения 3.2-3.4:

$$U_{над.A} = U_0 \cdot k_{зам.1}^{L_{КЗ.1}/L_1}; \quad (3.2)$$

$$U_{над.B} = U_0 \cdot k_{зам.1}^{(L_1 - L_{КЗ.1})/L_1} \cdot k_{пр.1-2} \cdot k_{зам.2} \cdot k_{пр.2-3} \cdot k_{зам.3}; \quad (3.3)$$

$$\frac{u_{над.A}}{u_{над.B}} = \frac{1}{k_{пр.1-2} \cdot k_{пр.2-3}} \cdot \frac{1}{k_{зам.2} \cdot k_{зам.3}} \cdot k_{зам.1}^{(2 \cdot L_{КЗ.1} - L_1)/L_1}, \quad (3.4)$$

где U_0 – начальное значение напряжения фронта волны в месте повреждения; $k_{пр.m-n}$ – коэффициент прохождения (преломления) волны из m -ого участка ЛЭП в n -ый участок ЛЭП; $L_{КЗ.m}$ – расстояние до места повреждения от начала m -го участка КВЛ.

Для 2-го и 3-го участка ЛЭП (точки 2 и 3 на рисунке 3.1) справедливы равенства 3.5 и 3.6 соответственно:

$$\frac{u_{над.A}}{u_{над.B}} = \frac{k_{пр.2-1}}{k_{пр.2-3}} \cdot \frac{k_{зам.1}}{k_{зам.3}} \cdot k_{зам.2}^{(2 \cdot L_{КЗ.2} - L_2)/L_2}; \quad (3.5)$$

$$\frac{u_{над.A}}{u_{над.B}} = k_{пр.2-1} \cdot k_{пр.3-2} \cdot k_{зам.1} \cdot k_{зам.2} \cdot k_{зам.3}^{(2 \cdot L_{КЗ.3} - L_3)/L_3}. \quad (3.6)$$

Выражения 3.4-3.6 характеризуют соотношения амплитуд фронтов начальных падающих волн напряжения на концах КВЛ при повреждениях на различных участках. Однако при повреждениях, близких к местам неоднородности (ВЛ-КЛ переход), волны, последовательно отражающиеся от неоднородности и от места повреждения, достигают места измерения через очень короткое время и накладываются друг на друга. Поэтому в таких случаях на измерения амплитуды фронта напряжения будут влиять эти дополнительные отраженные волны.

Рассмотрим соотношения сигналов напряжения при повреждении ЛЭП в непосредственной близости от КВЛ перехода. При этом не учитываем затухание волн на участке между точкой повреждения и КВЛ переходом ввиду малого расстояния.

Для точки 1'' справедливы следующие выражения 3.7-3.9:

$$U_{над.A} = U_0 \cdot k_{зам.1} \cdot (1 + k_{пр.1-КЗ} \cdot (k_{омп.1-2} + k_{омп.1-2}^2 \cdot k_{омп.1-КЗ} + \dots)) = U_0 \cdot k_{зам.1} \cdot (1 + k_{пр.1-КЗ} \cdot \frac{k_{омп.1-2}}{1 - k_{омп.1-2} \cdot k_{омп.1-КЗ}}); \quad (3.7)$$

$$U_{над.B} = [U_0 \cdot k_{пр.1-2} \cdot k_{зам.2} \cdot k_{пр.2-3} \cdot k_{зам.3}] \cdot (1 + k_{омп.1-2} \cdot k_{омп.1-КЗ} + \dots) = [\dots] \cdot \left(\frac{1}{1 - k_{омп.1-2} \cdot k_{омп.1-КЗ}} \right); \quad (3.8)$$

$$\begin{aligned}
 \frac{u_{\text{пад.А}}}{u_{\text{пад.Б}}} &= \left[\frac{1}{k_{\text{нр.1-2}} \cdot k_{\text{нр.2-3}}} \cdot \frac{k_{\text{зам.1}}}{k_{\text{зам.2}} \cdot k_{\text{зам.3}}} \right] \cdot \frac{1 + \frac{k_{\text{нр.1-КЗ}} \cdot k_{\text{омп.1-2}}}{1 - k_{\text{омп.1-2}} \cdot k_{\text{омп.1-КЗ}}}}{\frac{1}{1 - k_{\text{омп.1-2}} \cdot k_{\text{омп.1-КЗ}}}} = \\
 &= [\dots] \cdot (1 - k_{\text{омп.1-2}} \cdot k_{\text{омп.1-КЗ}} + k_{\text{нр.1-КЗ}} \cdot k_{\text{омп.1-2}}) = \\
 &= [\dots] \cdot (1 + k_{\text{омп.1-2}} \cdot (k_{\text{нр.1-КЗ}} - k_{\text{омп.1-КЗ}})) = \\
 &= [\dots] \cdot (1 + k_{\text{омп.1-2}}) = [\dots] \cdot k_{\text{нр.1-2}} = \frac{k_{\text{зам.1}}}{k_{\text{нр.2-3}} \cdot k_{\text{зам.2}} \cdot k_{\text{зам.3}}}.
 \end{aligned} \tag{3.9}$$

Для точки 2' отношение напряжений падающих волн характеризуется равенством 3.10:

$$\begin{aligned}
 \frac{u_{\text{пад.А}}}{u_{\text{пад.Б}}} &= \left[\frac{k_{\text{нр.2-1}}}{k_{\text{нр.2-3}}} \cdot \frac{k_{\text{зам.1}}}{k_{\text{зам.2}} \cdot k_{\text{зам.3}}} \right] \cdot \frac{\frac{1}{1 - k_{\text{омп.2-1}} \cdot k_{\text{омп.2-КЗ}}}}{1 + \frac{k_{\text{нр.2-КЗ}} \cdot k_{\text{омп.2-1}}}{1 - k_{\text{омп.2-1}} \cdot k_{\text{омп.2-КЗ}}}} = [\dots] \times \\
 &\times \frac{1}{1 - k_{\text{омп.2-1}} \cdot k_{\text{омп.2-КЗ}} + k_{\text{нр.2-КЗ}} \cdot k_{\text{омп.2-1}}} = [\dots] \cdot \frac{1}{1 + k_{\text{омп.2-1}} \cdot (k_{\text{нр.2-КЗ}} - k_{\text{омп.2-КЗ}})} = \\
 &= [\dots] \cdot \frac{1}{1 + k_{\text{омп.2-1}}} = [\dots] \cdot \frac{1}{k_{\text{нр.2-1}}} = \frac{k_{\text{зам.1}}}{k_{\text{нр.2-3}} \cdot k_{\text{зам.2}} \cdot k_{\text{зам.3}}}.
 \end{aligned} \tag{3.10}$$

Аналогично для точек 2'' и 3' получаем следующее выражение для отношения напряжений падающих волн 3.11:

$$\frac{u_{\text{пад.А}}}{u_{\text{пад.Б}}} = \frac{k_{\text{нр.2-1}} \cdot k_{\text{зам.1}} \cdot k_{\text{зам.2}}}{k_{\text{зам.3}}}. \tag{3.11}$$

На основе равенств 3.1-3.11 можно построить график зависимости отношения $u_{\text{пад.А}} / u_{\text{пад.Б}}$ от места повреждения. На рисунке 3.2 а,б показаны такие зависимости для КВЛ 220кВ (конфигурации ВЛ-КЛ-ВЛ) при различных соотношениях длин участков.

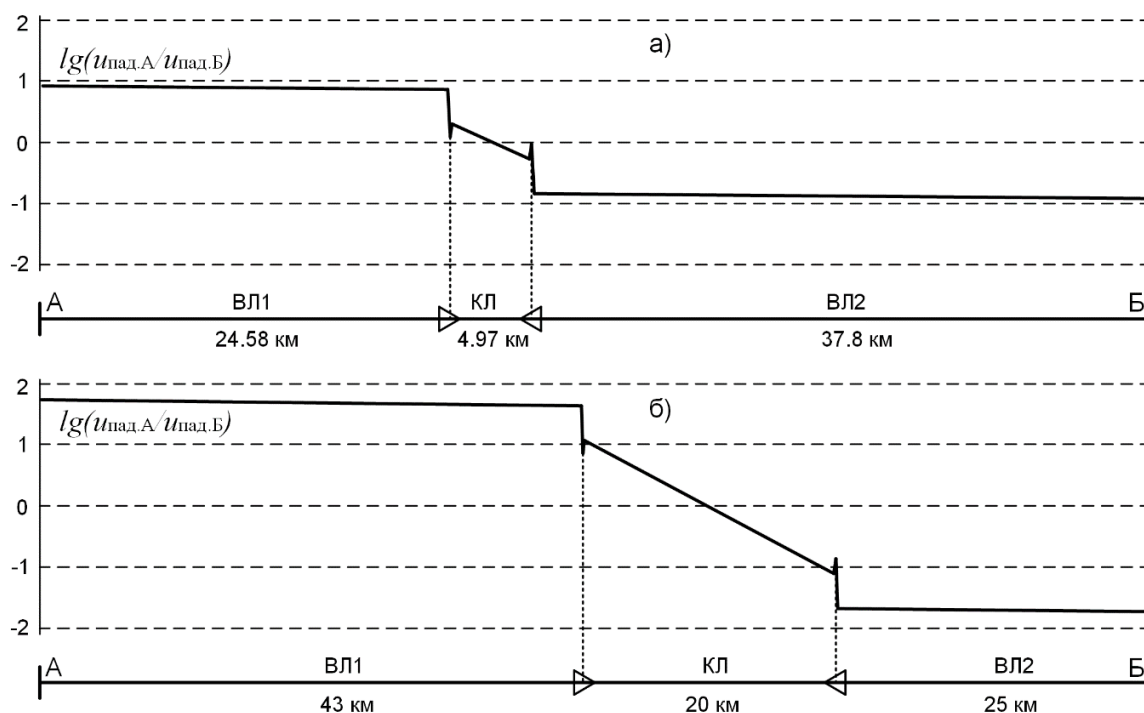


Рисунок 3.2 – Зависимости отношения амплитуд падающих волн напряжения по двум концам КВЛ от места повреждения

Параметры распространения волн для рисунка 3.2 выбраны по рекомендациям [113]. Средние значения параметров в диапазоне частот 10-100 кГц составили для первого междуфазного волнового канала: $Z_{в1}= 370 \text{ Ом}$, $Z_{в2}= 30 \text{ Ом}$, $Z_{в3}= 370 \text{ Ом}$ и $\alpha_{ЛТ.1}= 0,023 \text{ дБ/км}$, $\alpha_{ЛТ.2}= 1,1 \text{ дБ/км}$, $\alpha_{ЛТ.3}= 0,022 \text{ дБ/км}$. Для удобства восприятия на рисунке 3.2 показана функция десятичного логарифма соотношения $u_{\text{пад.А}} / u_{\text{пад.Б}}$.

Анализируя рисунок 3.2, можно заметить, что при переходе через место соединения участков ВЛ и КЛ логарифм отношения напряжений, а следовательно и само отношение напряжений претерпевает скачок, который зависит от соотношения волновых сопротивлений участков и не зависит от длин этих участков. Следует отметить, что наличие неоднородностей на участках ЛЭП (например, транспозиция фаз ВЛ или транспозиция экранов КЛ) будет искажать зависимости, изображенные на рисунке 3.2. Поэтому при формировании сложных зависимостей с учетом всех неоднородностей ЛЭП целесообразно применять имитационное моделирование.

Анализ выражений 3.10 и 3.11, а также рисунка 3.2 приводит к выводу о том, что в непосредственной близости от КВЛ переходов существует зона неопределенности, в которой КЗ на ВЛ и КЛ участках практически не различаются без применения дополнительных методов распознавания [122]. Поэтому при выборе параметров срабатывания алгоритма распознавания поврежденного участка КВЛ целесообразно зону неопределенности относить к кабельному участку для предотвращения АПВ при повреждениях муфты кабеля и вблизи нее. Проведенное имитационное моделирование КВЛ показало, что зона неопределенности зависит от методов цифровой фильтрации волновых сигналов тока и напряжения, а также переходных характеристик измерительных трансформаторов [123].

3.1.2 Алгоритм определения поврежденного участка кабельно-воздушных ЛЭП на основе двусторонних несинхронизированных измерений амплитуды фронта начальных волн

Последовательность обработки волновых сигналов токов и напряжений по концам КВЛ для предлагаемого метода АПВ включает следующие операции [124]. Сигналы с измерительных преобразователей (например, сигналы напряжения) проходят аналого-цифровое преобразование (АЦП) и поступают в блок цифровой обработки. Вначале целесообразно осуществить выделение модальной составляющей первого междуфазного волнового канала ЛЭП с реализацией предварительной фильтрации [123] волнового сигнала. Выбор первой междуфазной модальной составляющей целесообразен потому, что в соответствующем канале параметры распространения волн наиболее стабильны [66]. Далее из модального (или фазного) сигнала (u) выделяются высокочастотные составляющие (Δu). При этом могут применяться различные алгоритмы цифровой фильтрации, рассмотренные в п.3.4. После фильтрации регистрируется максимальное значение (амплитуда) сигнала (Δu_{max}), которое соответствует фронту первой

волны напряжения. Измеренные и зафиксированные таким образом величины на концах ЛЭП (Δu_{Amax} и Δu_{Bmax}) передаются по каналу связи между ПС «А» и ПС «Б». Затем происходит вычисление отношения амплитуд напряжений ($\Delta u_{Amax} / \Delta u_{Bmax}$) и проверка попадания рассчитанного значения в зону блокирования АПВ. В зависимости от результата формируется сигнал на разрешение или блокирование АПВ.

Более подробно алгоритм расчета поврежденного участка по двустороннему замеру амплитуды представлен в Приложении Б. п. 5.2.

Стоит отметить, что приведенные выше выражения для соотношений сигналов по концам ЛЭП 3.2-3.11 характеризуют напряжения падающих волн. Однако следует иметь в виду, что измеряются на ПС не падающие волны, а напряжение и ток, являющиеся суммой падающих и отраженных волн, согласно выражений 2.3 и 2.4. Тогда отношение измеряемых величин напряжений может быть выражено в виде 3.12:

$$\frac{u_A}{u_B} = \frac{(1+k_{отр.1-A}) \cdot u_{над.А}}{(1+k_{отр.3-B}) \cdot u_{над.Б}} = k_{прив.и} \cdot \frac{u_{над.А}}{u_{над.Б}}, \quad (3.12)$$

где $k_{прив.и}$ – коэффициент приведения, характеризующий количественное отличие напряжений падающих волн и измеряемых напряжений.

Если по концам ЛЭП измеряются токи, то аналогичным образом формируется выражение для отношений токов 3.13:

$$\frac{i_A}{i_B} = \frac{(-1+k_{отр.1-A}) \cdot i_{над.А}}{(-1+k_{отр.3-B}) \cdot i_{над.Б}} = \frac{(-1+k_{отр.1-A}) \cdot Z_{в.3} \cdot u_{над.А}}{(-1+k_{отр.3-B}) \cdot Z_{в.1} \cdot u_{над.Б}} = k_{прив.и} \cdot \frac{u_{над.А}}{u_{над.Б}}, \quad (3.13)$$

где $k_{прив.и}$ – коэффициент приведения при измерениях тока.

В соответствии с выражениями 3.12 - 3.13 при реализации метода АПВ отсутствует принципиальная разница, что измерять: ток, напряжение или их комбинацию. В тоже время известно, что полоса пропускания ТТ, как правило, шире полосы пропускания трансформаторов напряжения (ТН) [63, 125]. Поэтому при практической реализации рассматриваемого способа АПВ КВЛ целесообразно использовать измерения тока.

Как уже отмечалось в главе 1, известен способ выделения падающих волн напряжения посредством комбинации сигналов тока и напряжения согласно выражению 3.14 [62, 63]:

$$u_{над.А}(n) = \frac{1}{2} \cdot (u_A(n) - Z_{в.1} \cdot i_A(n)), \quad (3.14)$$

где $u_{над.А}(n)$ – выборочное значение вычисляемого сигнала напряжения падающей волны на текущем отсчете n , при измерениях на ПС А; $u_A(n)$, $i_A(n)$ – соответствующие выборочные значения измеряемых на ПС А сигналов напряжения и тока.

При этом с целью снижения уровня помех целесообразно производить отдельную обработку сигналов тока и напряжения, а величину фронта напряжения падающей волны определять по выражению 3.15:

$$\Delta u_{пад.Аmax} = \frac{1}{2} \cdot (\Delta u_{Аmax} - Z_{e.1} \cdot \Delta i_{Аmax}), \quad (3.15)$$

где $\Delta u_{пад.Аmax}$ – вычисляемая амплитуда напряжения падающей волны на ПС А; $\Delta u_{Аmax}$ и $\Delta i_{Аmax}$ – амплитуды измеряемых волновых сигналов напряжения и тока на ПС А.

Такая обработка позволяет не учитывать коэффициент отражения от шин ПС и не рассчитывать $Z_{эвб.ПС}$, однако приводит к некоторому усложнению устройства АПВ КВЛ. Также стоит отметить, что применение такой обработки нецелесообразно при условии сильно различных частотных характеристик измерительных цепей тока и напряжения. В ходе имитационных экспериментов, представленных далее, применялась как комбинированная цифровая обработка волновых сигналов напряжения и тока (3.15), так и отдельная (3.13).

3.1.3 Моделирование алгоритма определения поврежденного участка кабельно-воздушных ЛЭП на основе двусторонних несинхронизированных измерений амплитуды фронта начальных волн

Моделирование КВЛ осуществлялось в программном комплексе PSCAD. Модель участка сети с КВЛ для исследования переходных процессов представлена на рисунке 3.3. Дополнительно на рисунке 3.4 приведена модель кабельного участка, входящая в общую модель (рисунок 3.3). Полученные на модели волновые сигналы обрабатывались с помощью программного комплекса Mathcad. При этом в волновые сигналы добавлялся белый шум, а также производилась их последующая свертка с импульсными характеристиками ТТ и ТН, полученных по результатам исследования реальных осциллограмм. Таким образом сигнал специально искажался с целью проверки устойчивости разработанного алгоритма к воздействию высокочастотных помех, а также искажению реального сигнала измерительным трактом.

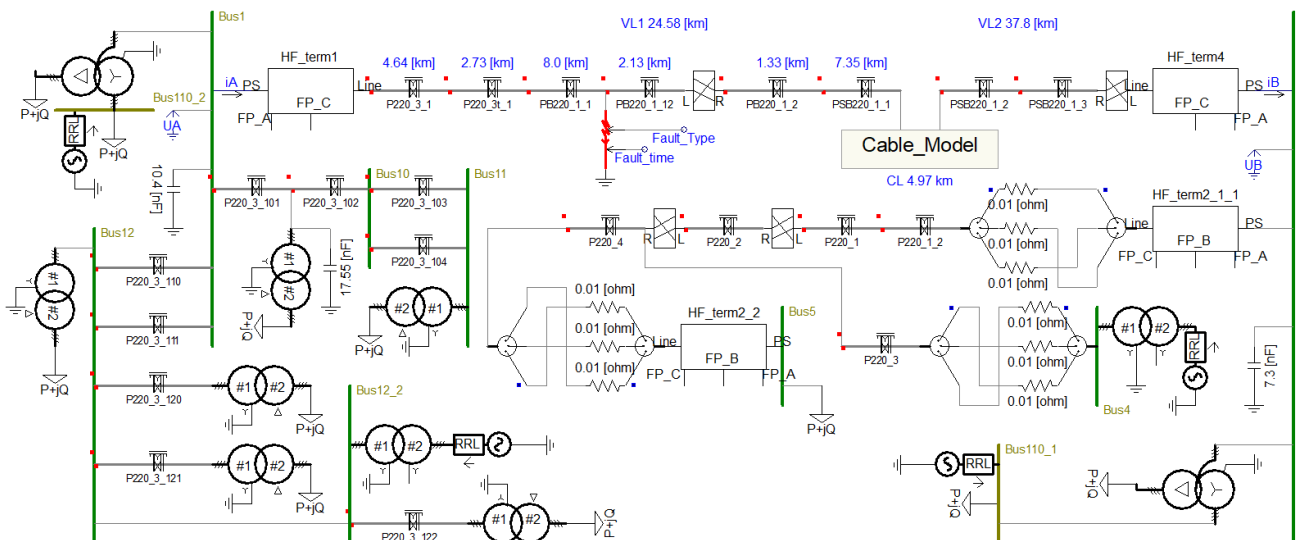


Рисунок 3.3 – Модель электрической сети с КВЛ для исследования переходных процессов в PSCAD

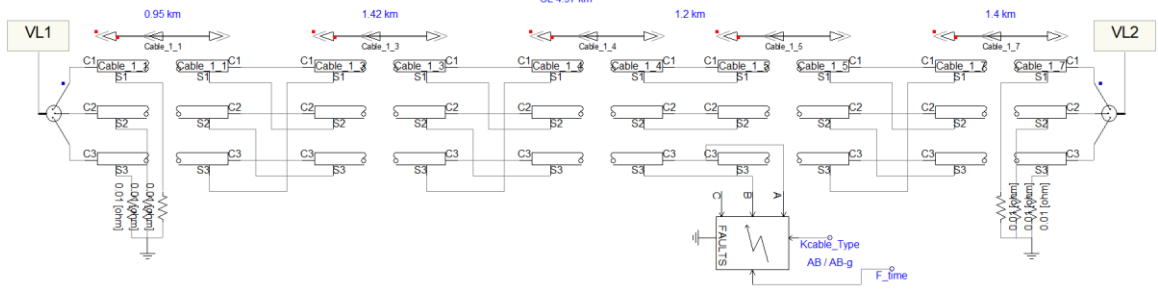


Рисунок 3.4 – Модель кабельного участка ЛЭП для общей модели сети

По результатам имитационного моделирования зона блокирования АПВ КВЛ отображалась в виде двумерной области, например, зависимости $|\Delta U_{\text{пад.Аmax}}|$, $|\Delta U_{\text{пад.Бmax}}|$, или $|\Delta i_{\text{Аmax}}|$, $|\Delta i_{\text{Бmax}}|$, как показано на рисунках 3.5 и 3.6 соответственно. При этом область первого квадранта разбивается лучами (штриховая и штрихпунктирная линии на рисунках 3.5 и 3.6) на зоны, соответствующие участкам КВЛ. Выбор параметров для процедуры распознавания поврежденного участка при этом эквивалентно расчету углов наклона лучей θ_1 и θ_2 . Также на рисунках 3.5 и 3.6 символами обозначены случаи, соответствующие однофазным КЗ на разных участках КВЛ и полученные по результатам имитационного моделирования КВЛ. Числа рядом с символами соответствуют расстоянию до места повреждения от начала соответствующего участка. Обведенные сплошной черной линией области на рисунках соответствуют сосредоточению множества случаев КЗ.

Точки, соответствующие КЗ на ВЛ и попавшие в зону блокирования, соответствуют КЗ вблизи КВЛ перехода, таким образом образуется зона неопределенности. При имитационном моделировании зона неопределенности на ВЛ достигала не более 200 м (длина пролета ЛЭП).

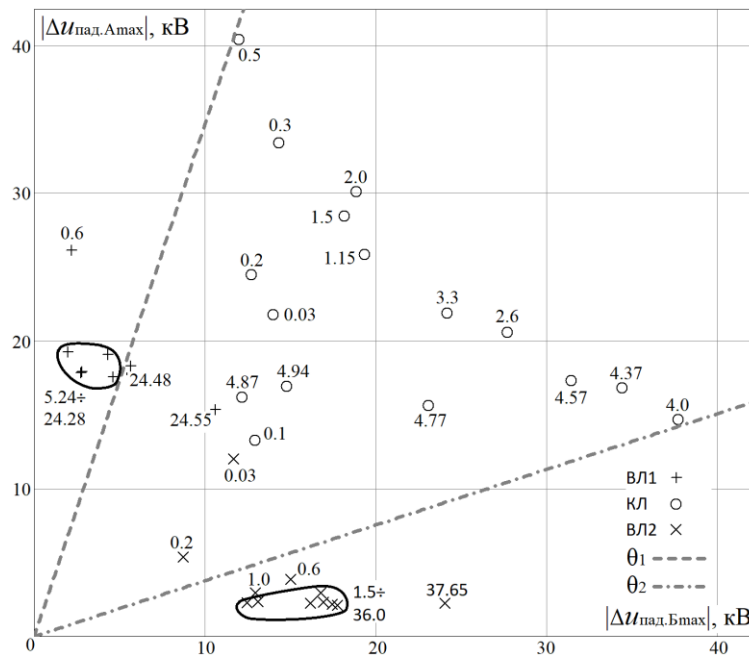


Рисунок 3.5 – Отображение зоны блокирования АПВ и тестовых случаев КЗ при оценке комбинированного сигнала согласно выражению 3.15

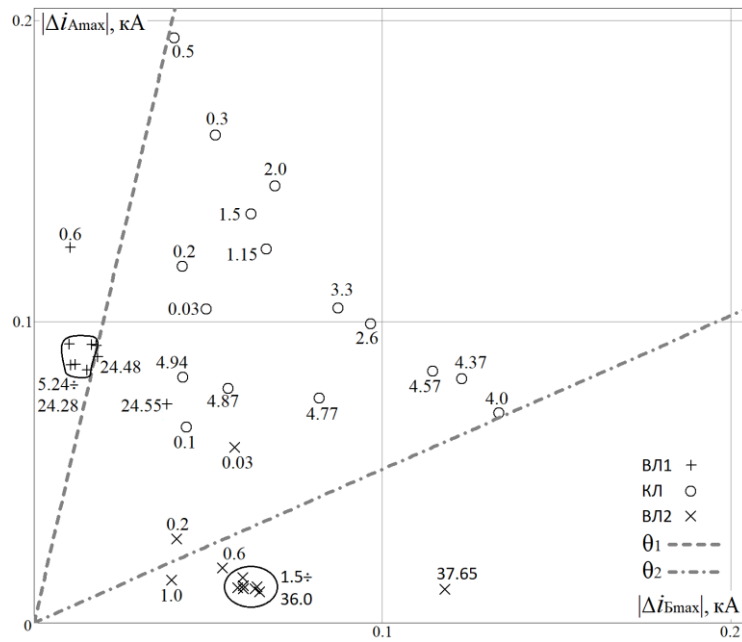


Рисунок 3.6 – Отображение зоны блокирования АПВ и тестовых случаев КЗ при оценке только сигнала тока согласно выражению 3.13

Целесообразно при попадании КЗ в ту или иную зону неопределенности заблокировать АПВ, а также реализовать визуальный осмотр соответствующего участка КВЛ. Перспективно совмещать АПВ КВЛ с методами ОМП ЛЭП, выполненных, в том числе, на иных (не волновых) методах, для сокращения зоны неопределенности (блокировки) АПВ.

Пример расчета параметров срабатывания алгоритма на конкретной КВЛ приведен в п 4.1.

3.2. Метод определения поврежденного участка и расстояния до места повреждения кабельно-воздушных ЛЭП с использованием двусторонних синхронизированных измерений времени прибытия фронта начальных волн

3.2.1 Алгоритм определения поврежденного участка и места повреждения КВЛ на основе двусторонних синхронизированных измерений времени

В п. 1.4 уже рассматривались существующие методы двустороннего ВОМП, применимые на КВЛ, в частности способ, представленный в работе [29]. В указанном способе сначала рассчитывается условное место повреждения по стандартной формуле для однородной ЛЭП (выражение 1.19), а затем используется временная характеристика распространения волны вдоль длины КВЛ для пересчета реального места повреждения. Однако возможно рассчитать место повреждения КВЛ с использованием значений времени прибытия волн по концам ЛЭП иначе.

Рассмотрим КЗ на одном из участков некоторой КВЛ. Конфигурация КВЛ (ВЛ1-КЛ-ВЛ2) и диаграмма распространения начальных волн от КЗ до концов рассматриваемой ЛЭП изображены на рисунке 3.7. Выберем один из концов КВЛ в качестве начала отсчета длины, например ПС1 (L), и далее за начало того или иного участка КВЛ принимаем конец участка

ближайший к ПС1. Анализируя путь, пройденный волнами, и прошедшее при этом время по рисунку 3.7 можно записать выражения 3.16-3.17.

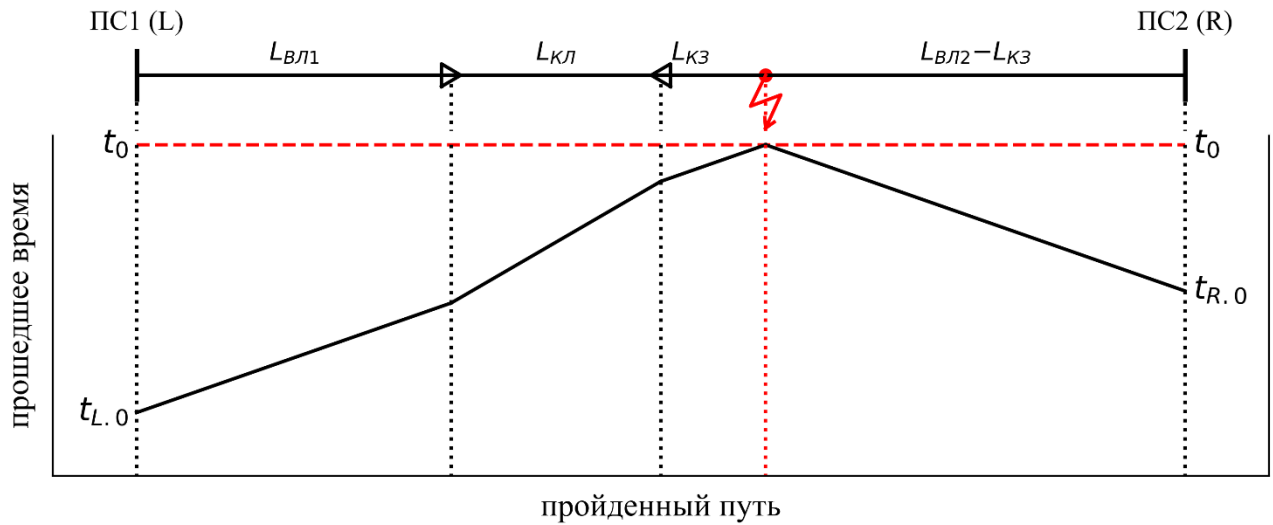


Рисунок 3.7 – Диаграмма распространения начальных волн от КЗ до концов КВЛ

$$t_{L.0} - t_0 = \tau_{ВЛ1} + \tau_{КЛ} + \frac{L_{КЗ}}{L_{ВЛ2}} \cdot \tau_{ВЛ2}; \quad (3.16)$$

$$t_{R.0} - t_0 = \frac{L_{ВЛ2} - L_{КЗ}}{L_{ВЛ2}} \cdot \tau_{ВЛ2}, \quad (3.17)$$

где $t_{L.0}$, $t_{R.0}$ – момент времени прихода волн к ПС1 (L) и к ПС2 (R) соответственно; $\tau_{ВЛ1}$, $\tau_{КЛ}$, $\tau_{ВЛ2}$ – время распространения волн по участкам ВЛ1, КЛ, ВЛ2 соответственно; t_0 – момент времени возникновения КЗ; $L_{КЗ}$ – расстояние от начала поврежденного участка до КЗ; $L_{ВЛ2}$ – длина участка ВЛ2.

Сложив выражения 3.16 и 3.17, получаем равенство:

$$t_{L.0} - t_0 + t_{R.0} - t_0 = \tau_{ВЛ1} + \tau_{КЛ} + \tau_{ВЛ2}. \quad (3.18)$$

Перепишем выражение 3.18, введя новые обозначения и перенеся некоторые члены из левой части равенства в правую:

$$\tau_{КЗ-ПС1} = \tau_{КВЛ} - t_{R.0} + t_0, \quad (3.19)$$

где $\tau_{КЗ-ПС1} = t_{L.0} - t_0$ – время распространения волны от КЗ до ПС1 (L); $\tau_{КВЛ} = \tau_{ВЛ1} + \tau_{КЛ} + \tau_{ВЛ2}$ – полное время распространения волн от одного до другого конца КВЛ.

Прибавим к левой и правой частям уравнения 3.19 левую часть уравнения 3.16 ($t_{L.0} - t_0$), тогда, приводя подобные слагаемые и учитывая введенные обозначения, получаем:

$$2 \cdot \tau_{КЗ-ПС1} = \tau_{КВЛ} - t_{R.0} + t_{L.0}. \quad (3.20)$$

Поделив равенство 3.20 на 2, получаем итоговое выражение для определения времени распространения волны от КЗ до выбранного конца КВЛ (L):

$$\tau_{КЗ-ПС1} = \frac{1}{2} \cdot (\tau_{КВЛ} + t_{L.0} - t_{R.0}). \quad (3.21)$$

Выражение 3.21 справедливо при КЗ на любом участке КВЛ и для КВЛ с любым количеством участков. Рассчитав время распространения волны от КЗ до выбранной ПС по выражению 3.21, возможно использовать его далее для определения поврежденного участка и места повреждения на этом участке следующим образом:

1) Первым действием вводится переменная $\tau_{КЗ}$ – время распространения от КЗ до начала поврежденного участка, которому присваивается значение $\tau_{КЗ-ПС1}$, а поврежденным участком считается первый участок (в рассмотренном примере – ВЛ1);

2) Следующим этапом итерационно в новую переменную τ_k подставляются значения времен распространения волн по участкам КВЛ с первого до предпоследнего (в рассмотренном примере: $\tau_{ВЛ1}$ и $\tau_{КЛ}$) и проверяется условие $\tau_{КЗ-ПС1} > \tau_k$, если условие выполняется, то значение параметра $\tau_{КЗ}$ уменьшается на значение τ_k ($\tau_{КЗ} := \tau_{КЗ} - \tau_k$), поврежденным участком считается следующий участок ($k+1$), индекс k увеличивается на единицу и происходит переход на следующую итерацию. Если же условие не выполняется, то итерационный перебор прерывается и происходит переход к следующему этапу;

3) Итоговым этапом является расчет расстояния от начала поврежденного участка до места повреждения по выражению:

$$L_{КЗ} = \tau_{КЗ} \cdot \frac{L_k}{\tau_k}, \quad (3.22)$$

где L_k и τ_k – длина k -ого участка и время распространения k -ого участка соответственно.

Если необходимо определить расстояние до КЗ не от начала поврежденного участка, а от выбранной ПС, то необходимо к значению $L_{КЗ}$ прибавить сумму длин участков от первого до k – ого.

Таким образом рассмотренный алгоритм позволяет определить сразу три параметра ОМП на КВЛ: поврежденный участок, расстояние до МП от начала поврежденного участка и расстояние до МП от заданной ПС. Обобщенный алгоритм реализации способа ОМП и АПВ КВЛ по двустороннему замеру времени начала переходного процесса, применимый на КВЛ с любым количеством и типом участков, более подробно представлен в Приложении Б (п. 5.1).

Результаты полунатурных испытаний разработанного алгоритма определения поврежденного участка и места повреждения кабельно-воздушных ЛЭП на основе двусторонних синхронизированных измерений времени прибытия фронта начальных волн представлены в главе 4.

3.3. Односторонний способ определения поврежденного участка и расстояния до места повреждения кабельно-воздушных ЛЭП, основанный на распознавании волновых портретов

Как указывалось в главе 1, стандартные методы одностороннего ВОМП не применимы на КВЛ. Одним из возможных подходов к определению поврежденного участка и места повреждения является формирование волнового портрета и последующее применение алгоритмов распознавания образов [126, 127].

Под волновым портретом здесь понимается осциллограмма высокочастотных переходных составляющих сигналов тока и (или) напряжения на некотором интервале времени (от нескольких сотен микросекунд до нескольких единиц миллисекунд), фиксируемая устройством на одном из концов ЛЭП. Возможность идентификации поврежденного участка КВЛ рассматриваемым способом обусловлена тем, что волновые портреты значительно отличаются при повреждениях на разных участках КВЛ как показано в главе 2. Для примера на рисунке 3.8 представлена КВЛ с несколькими точками повреждения на разных участках. Сигналы, измеряемые устройством при КЗ в соответствующих точках, изображены на рисунке 3.9 (место измерения показано прямоугольником на рисунке 3.8).

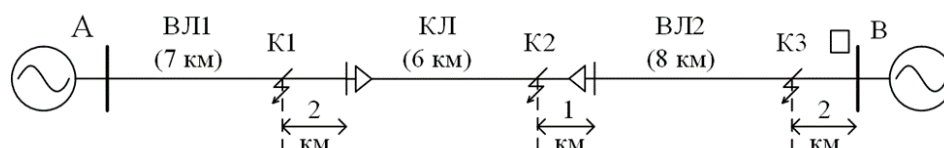


Рисунок 3.8 – КЗ на разных участках КВЛ

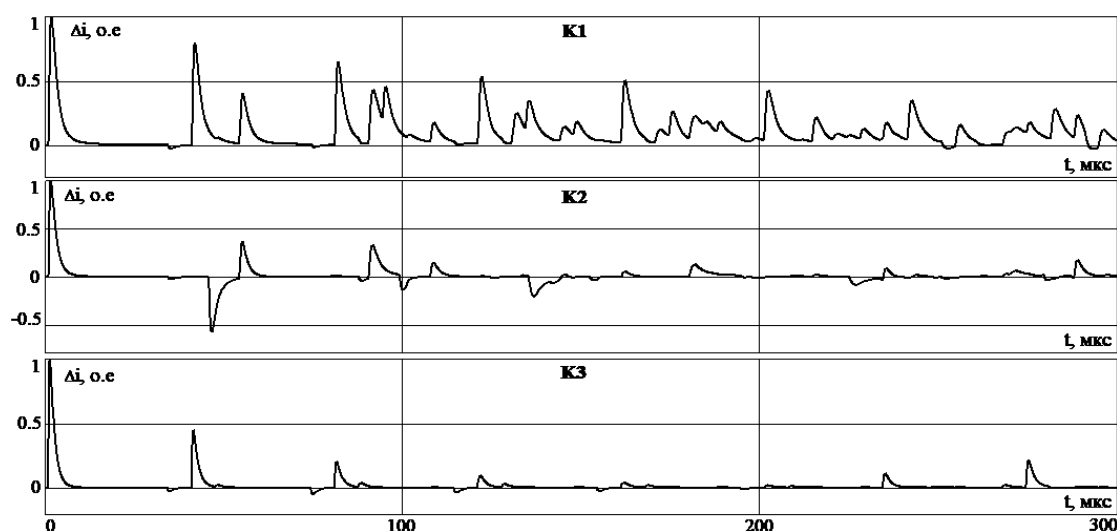


Рисунок 3.9 – Формируемые волновые портреты при КЗ на разных участках КВЛ

Для задачи распознавания волнового портрета предлагается использовать корреляционную обработку сигналов. Преимущество такого метода заключается в том, что он является параметрическим, т.е. результат оценки формируется на основе наибольшего значения выбранного параметра, а именно – нормированной кросскорреляционной функции [128]. Даже

при сигнале, который достаточно сильно отличается от «эталонного» набора, будет выбран наиболее подходящий портрет в соответствии с наибольшим значением корреляции. Таким образом, работа алгоритма поддается прогнозированию и оценке. Также стоит отметить, что на основе значения определяемой функции корреляции можно определять степень доверия выходному результату работы корреляционного алгоритма.

Одной из основных трудностей в применении методов распознавания, требующих моделирования «портретов» или обучающих выборок, как отмечается в том числе в [129], является необходимость строить модели и проводить заново моделирование для каждого нового объекта. Также стоит отметить, что все основные программно-аппаратные комплексы моделирования предназначены для очень широкого круга задач, в связи с этим могут возникать трудности при решении конкретных узких задач, для которых программа прямо не предназначена, требующих, в частности, большого числа однотипных моделируемых событий, когда высокая точность не так важна, как количество испытаний. Поэтому под каждую отдельную задачу могут быть созданы более простые алгоритмы моделирования, менее точные, но позволяющие более просто и быстро получать большое количество необходимых результатов [130]. Однако обозначенная проблема становится все менее значимой, в связи с быстро развивающимися системами имитационного моделирования.

Подход по распознаванию волновых портретов, используя математический аппарат корреляционных функций, имеет хорошие перспективы в связи с развитием средств вычислительной техники и комплексов имитационного моделирования для энергетики [131, 132].

3.3.1 Использование корреляционной оценки волнового портрета

Корреляционные функции используют для характеристики случайных процессов, при этом различают автокорреляционную и взаимную корреляционную (кросскорреляционную) функции. В теории непрерывных случайных процессов автокорреляционная функция $R_{xx}(\tau)$ является мерой взаимной связи функции $x(t)$ и функции $x(t+\tau)$, смещенной по отношению к $x(t)$ на время τ [133]:

$$R_{xx}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \left[\frac{1}{2T} \cdot \int_{-T}^T (x(t) \cdot x(t + \tau) \cdot dt) \right]. \quad (3.23)$$

А кросскорреляционная функция $R_{xy}(\tau)$ является мерой взаимной связи двух случайных функций времени $x(t)$ и $y(t)$, определяется выражением:

$$R_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \left[\frac{1}{2T} \cdot \int_{-T}^T (x(t) \cdot y(t + \tau) \cdot dt) \right]. \quad (3.24)$$

В теории цифровой обработки сигналов корреляцию используют, например, для распознавания речи, изображений и т.д. Для дискретных функций (сигналов), определенных на некотором конечном окне данных (N), уравнения 3.23-3.24 примут вид [134]:

$$R_{xx}(n) = \frac{1}{N} \cdot \sum_{k=0}^{N-1} (x(k) \cdot x(n+k)); \quad (3.25)$$

$$R_{xy}(n) = \frac{1}{N} \cdot \sum_{k=0}^{N-1} (x(k) \cdot y(n+k)). \quad (3.26)$$

Используя кросскорреляционную функцию двух сигналов можно установить степень их соответствия или «похожести». В качестве примера на рисунке 3.10 изображены три дискретных сигнала: x , $y1$, $y2$. Определим с помощью кросскорреляционной функции, какой из сигналов наиболее похож на сигнал x . Для этого вычислим корреляционные функции $R_{xx}(\tau)$, $R_{xy1}(\tau)$, $R_{xy2}(\tau)$ и изобразим их на графике (рисунок 3.11).

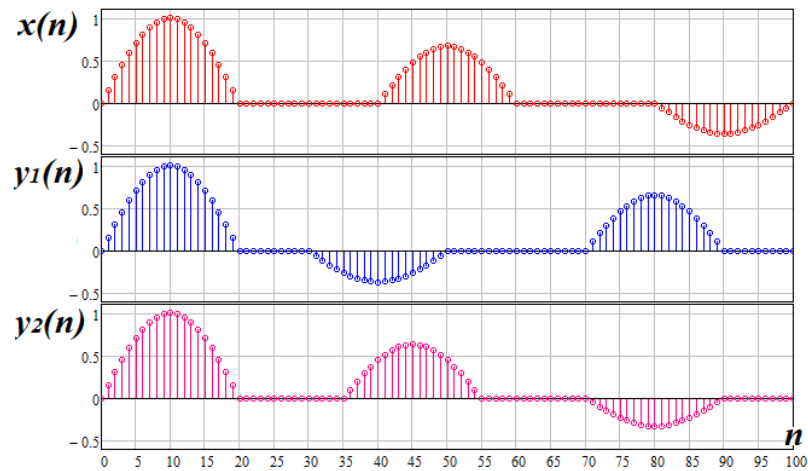


Рисунок 3.10 – Сравнимые сигналы

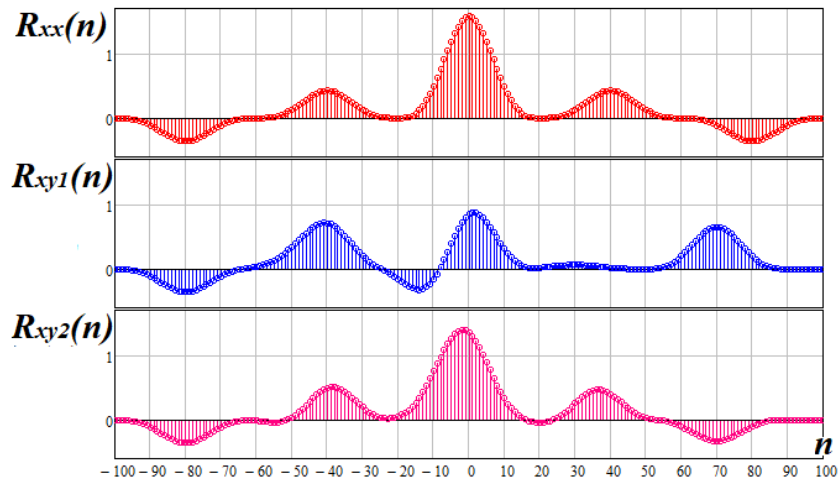


Рисунок 3.11 – Корреляционные функции

Как видно из рисунка 3.11, наибольшее значение максимума имеет корреляционная функция R_{xx} , чуть меньшее значение – R_{xy2} и наиболее маленькое значение – R_{xy1} . Таким образом результаты вычислений говорят следующее: наиболее похожим на сигнал x является сам сигнал x (что и следовало ожидать), из сигналов $y1$ и $y2$ наиболее похожим на сигнал x является $y2$, что подтверждается зрительной оценкой.

Таким образом на основе использования корреляционных функций можно построить алгоритм оценки волновых портретов, причем в качестве сравниваемого сигнала будет выступать «замеренный» волновой портрет, который будет сравниваться определенным образом с «эталонными» волновыми портретами, промоделированными заранее с помощью ЭВМ [136].

Далее рассмотрим, почему при практическом использовании корреляционной оценки необходимо использовать нормированный коэффициент корреляции.

Предположим, есть два сигнала $a(t)$ и $b(t)$. Этим сигналам соответствуют два вектора выборок сигнала $A[N]$ и $B[N]$, соответствующие фиксированному моменту времени t и выбранному окну данных $N=T/td$, таким образом $A=\{a_1, a_2, \dots, a_N\}$ и $B=\{b_1, b_2, \dots, b_N\}$. Необходимо определить степень похожести сигналов. Для этого выполним следующие действия. Первым действием найдем автокорреляцию каждого из сигналов, таким образом мы определим энергию сигналов E_A и E_B :

$$E_A = R_{AA} = \frac{1}{N} \cdot A^T \cdot A = \frac{1}{N} \cdot \sum_{k=1}^N a(k)^2; \quad (3.27)$$

$$E_B = R_{BB} = \frac{1}{N} \cdot B^T \cdot B = \frac{1}{N} \cdot \sum_{k=1}^N b(k)^2. \quad (3.28)$$

Далее нормируем сигналы по энергии, для этого разделим каждый сигнал на квадратный корень от значения его энергии (при нулевом значении математического ожидания сигнала это значение будет совпадать с дисперсией сигнала):

$$A_n = \frac{A}{\sqrt{E_A}} = \frac{A}{\sigma_A}; \quad B_n = \frac{B}{\sqrt{E_B}} = \frac{B}{\sigma_B}. \quad (3.29)$$

Теперь найдем корреляцию сигналов A_n и B_n , при этом, корреляция будет нормирована по энергии сигналов (корреляция получена при $n=0$, т.е. сигналы совмещены по первому отсчету):

$$R_{AB_n} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{k=1}^N (a_n(k) \cdot b_n(k)) = \frac{1}{N} \cdot A_n^T \cdot B_n = \frac{A^T \cdot B}{\sqrt{(A^T \cdot A) \cdot (B^T \cdot B)}}. \quad (3.30)$$

Полученное значение корреляции характеризует степень соответствия или «похожести» двух сигналов. Значение нормированной корреляции лежит в пределах от «-1» до «+1», при этом значению «+1» соответствует максимальное соответствие сигналов ($A=B$), значению «-1» – случай, когда $A=-B$, а значению «0» - полное несоответствие или несовпадение сигналов (частный случай, когда $a_i b_i = 0$ для любого i). Стоит отметить, что нормирование сигналов по энергии перед вычислением корреляции предпочтительно, поскольку иначе значение корреляции может принимать любые значения на оси действительных чисел, а также вызывать ошибочное решение при оценке по величине корреляции в случае несоответствия сигналов.

В подтверждение этого суждения рассмотрим два случая. В первом случае возьмем два

сигнала A и B такие, что $A=B$, во втором случае возьмем два сигнала C и B , причем $C=\{2 \cdot b_1, 2 \cdot b_2, \dots, 2 \cdot b_{N/2}, b_{N/2+1}, \dots, b_N\}$, т.е. половина первых элементов выборки C в два раза превышают соответствующие значения выборки B , пусть также $b_1=b_{N/2+1}$, $b_2=b_{N/2+2}$, ... , $b_{N/2}=b_N$, т.е. $B=\{B1, B2\}$, $B1=B2$ и $C=\{2 \cdot B1, B2\}$. Вычислим нормированную по энергии корреляцию (далее просто – нормированную) и ненормированную для двух случаев. Очевидно, что в первом случае нормированная корреляция принимает значение «1». Ненормированная корреляция для первого случая принимает значение:

$$R_{AB} = \frac{1}{N} \cdot A^T \cdot B = \frac{1}{N} \cdot B^T \cdot B = E_B. \quad (3.31)$$

Для второго случая нормированная корреляция примет значение:

$$\begin{aligned} R_{CB} &= \frac{C^T \cdot B}{\sqrt{(C^T \cdot C) \cdot (B^T \cdot B)}} = \frac{2 \cdot B1^T \cdot B1 + B2^T \cdot B2}{\sqrt{(2 \cdot B1^T \cdot 2 \cdot B1 + B2^T \cdot B2) \cdot (B^T \cdot B)}} = \\ &= \frac{3 \cdot B2^T \cdot B2}{\sqrt{(5 \cdot B2^T \cdot B2) \cdot (B^T \cdot B)}} = \frac{3/2}{\sqrt{5/2}} \cdot \frac{B^T \cdot B}{\sqrt{(B^T \cdot B) \cdot (B^T \cdot B)}} = \\ &= \frac{3}{\sqrt{10}} \cdot 1 \approx 0,949 < 1 \end{aligned} \quad (3.32)$$

Ненормированная корреляция для второго случая:

$$R_{CB} = \frac{1}{N} \cdot C^T \cdot B = \frac{1}{N} \cdot (2 \cdot B1^T \cdot B1 + B2^T \cdot B2) = \frac{1}{N} \cdot \frac{3}{2} \cdot (B^T \cdot B) = \frac{3}{2} \cdot E \quad (3.33)$$

Как видно из выражений 3.31-3.33, а также из рассмотренного примера при сравнении корреляционных функций по величине, нормированная корреляция позволяет отличить выборки C и B , а ненормированная корреляция дает ошибочный результат, поскольку $R_{CB} > R_{AB}$ в 1,5 раза.

В задаче распознавания волновых портретов замеренный сигнал сравнивается с набором эталонных сигналов, полученных заранее путем имитационного моделирования, путем вычисления коэффициентов корреляции замеренного сигнала со всеми эталонными сигналами из набора, при этом каждому эталонному портрету соответствует конкретный поврежденный участок КВЛ и место повреждения. Наибольшее значение коэффициента корреляции будет соответствовать наиболее похожим замеренному и эталонному сигналам, а следовательно и наиболее вероятному (в соответствии с моделью) месту повреждения.

3.3.2 Односторонний алгоритм определения поврежденного участка и места повреждения кабельно-воздушных ЛЭП на основе распознавания волновых портретов

В результате исследований был разработан алгоритм одностороннего определения поврежденного участка и места повреждения КВЛ, основанный на распознавании волнового портрета посредством вычисления коэффициента корреляции эталонных волновых портретов,

получаемых заранее путем имитационного моделирования, и реального волнового портрета, замеряемого устройством, который проходит предварительную цифровую обработку [137].

На рисунке 3.12 представлена структурная схема разработанного корреляционного алгоритма распознавания волновых портретов. Исходные цифровые сигналы тока или напряжения (ИС на рисунке 3.12), записанные при повреждении КВЛ (фазные или модальные сигналы), подвергаются первичной цифровой обработке, заключающейся в модальном преобразовании (необязательно) и цифровой ВЧ фильтрации одним из фильтров, рассмотренных в п. 3.4 (блок 1, рисунок 3.12). Затем производится определение вида повреждения (поврежденной фазы) и выбор одного фазного или модального сигнала из трех с той целью, чтобы при дальнейшей обработке использовать только один сигнал (блок 2, рисунок 3.12). Определение поврежденной фазы может осуществляться, например, по максимальной амплитуде первых импульсов фазных сигналов. Далее производится нормирование сигнала по энергии как указано выше (блок 3, рисунок 3.12). Помимо рассмотренных выше причин нормирование необходимо для сравнимости реального и модельных сигналов, поскольку амплитуда и энергия волнового портрета зависят от фазы напряжения при возникновении КЗ. В зависимости от момента начала КЗ амплитуда фронта волн меняется, при этом соотношение между амплитудами первого импульса и последующих остается практически одинаковой.

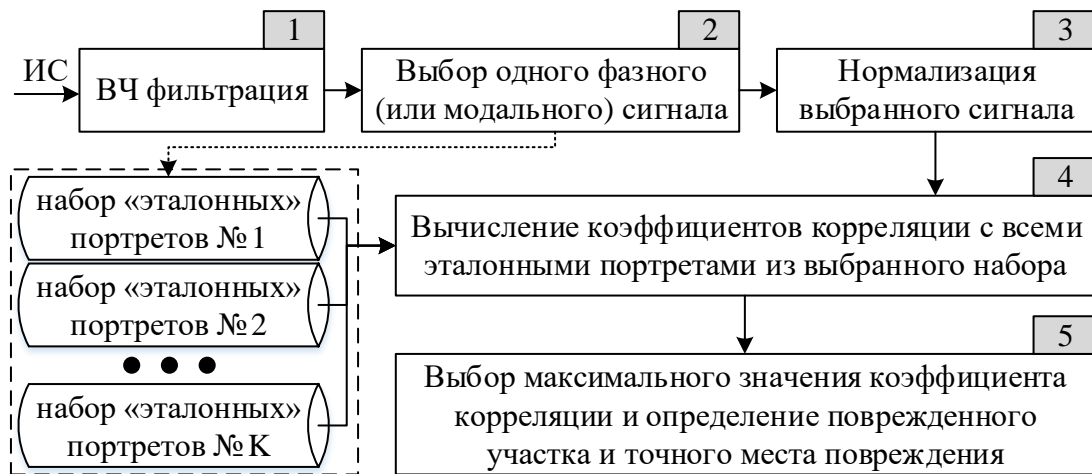


Рисунок 3.12 – Поясняющая диаграмма корреляционного алгоритма с упрощенной предварительной обработкой сигналов

На следующем этапе производится вычисление коэффициентов корреляции нормированного реального волнового портрета со всеми эталонными волновыми портретами из выбранного набора (блок 4, рисунок 3.12) согласно выражению 3.26. При этом используемый набор эталонных портретов выбирается исходя из определенного ранее вида повреждения. На заключительном этапе (блок 5, рисунок 3.12) производится выбор максимального значения коэффициента корреляции и определение поврежденного участка и точного места повреждения по номеру эталонного портрета с максимальным коэффициентом корреляции.

Рисунок 3.13 иллюстрирует зависимости значения коэффициента корреляции при определенном месте КЗ на воздушном участке (красный цвет) и КЗ на кабельном участке (синий цвет) от длины линии (номера эталонного портрета). Каждая точка на графиках отображает коэффициент корреляции тестового волнового портрета и эталонного волнового портрета КЗ на расстоянии, соответствующим текущей координате. Рассматриваются два случая КЗ: на воздушном участке на расстоянии 1,34 км от кабельно-воздушного перехода (рисунок 3.13,а) и на кабельном участке на расстоянии 3,13 км от перехода (рисунок 3.13,б).

Дополнительно место повреждения может быть уточнено путем, например, линейной интерполяции значений коэффициента корреляции, ближайших к максимальному, как показано на рисунке 3.14.

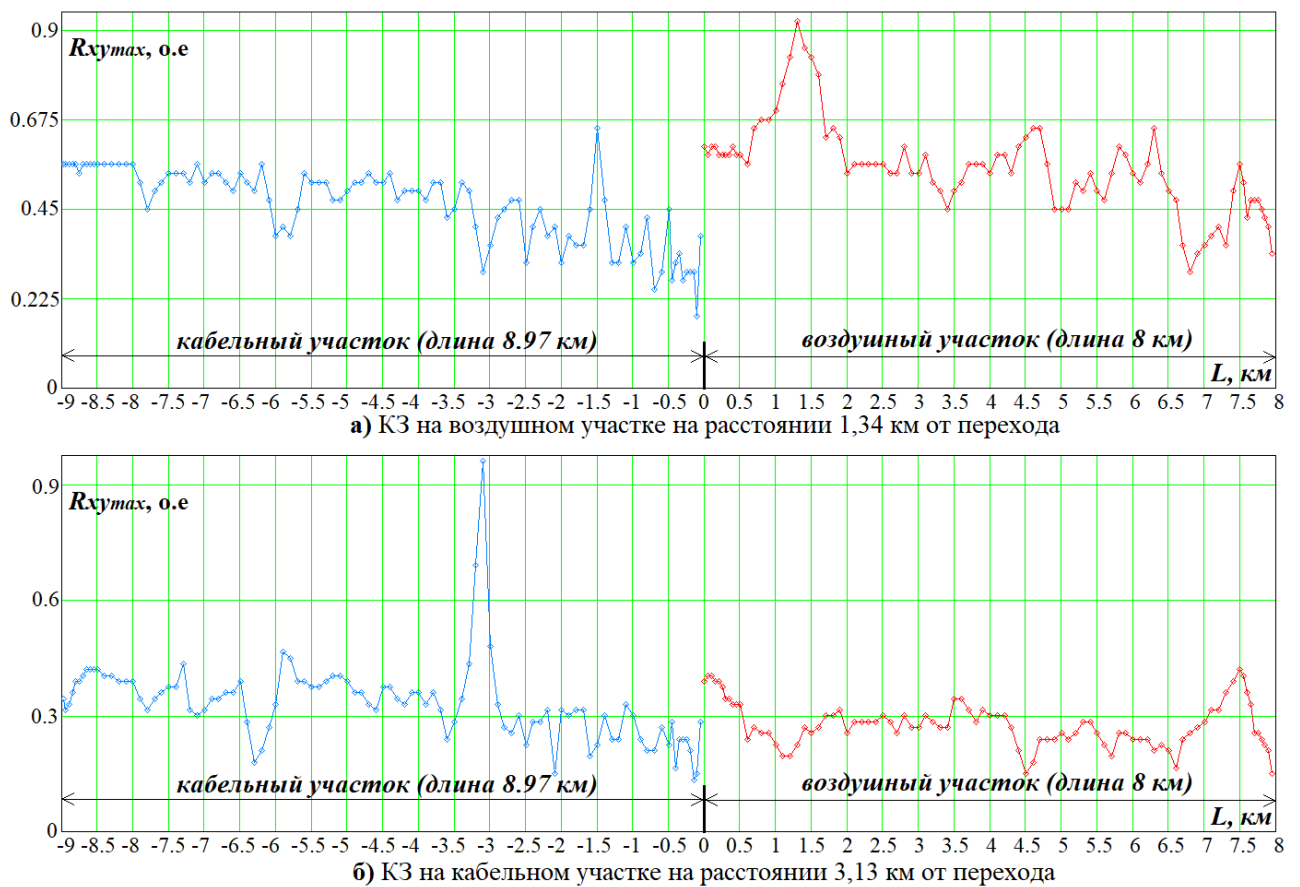


Рисунок 3.13 – Зависимость значений коэффициента корреляции от длины линии (номера эталонного портрета).

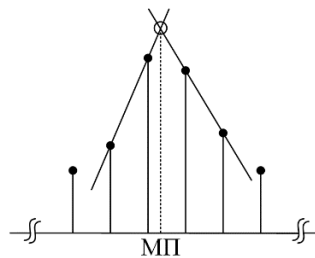


Рисунок 3.14 – Уточнение места повреждения путем линейной интерполяции

Стоит отметить, что для снижения количества вычислений при расчете корреляции (блок 4 на рисунке 3.12) целесообразно перед этим вычислить Фурье-образ нормированного реального сигнала посредством быстрого преобразования Фурье (БПФ). Эталонные волновые портреты при этом хранятся в виде массивов комплексных значений ДПФ. Вычисление корреляции таким образом сводится к перемножению комплексных значений гармонических составляющих Фурье-образов сравниваемых сигналов и вычислению обратного БПФ. Такой технический прием позволяет в разы ускорить вычисление корреляции при добавлении незначительной погрешности при вычислениях БПФ и обратного БПФ.

Более подробно алгоритм одностороннего определения поврежденного участка и места повреждения КВЛ, основанный на вычислении коэффициентов корреляции представлен в Приложении Б (п. 4.5). Также в Приложении Г представлены различные вариации корреляционного алгоритма распознавания волновых портретов при различной предобработке измеряемого сигнала [138, 139].

3.3.3 Моделирование одностороннего алгоритма определения поврежденного участка и места повреждения кабельно-воздушных ЛЭП на основе распознавания волновых портретов

Главной целью имитационных испытаний является оценка разработанного алгоритма одностороннего АПВ и ОМП КВЛ с точки зрения правильного определения поврежденного участка КВЛ и точности ОМП. Испытания проводились на трех основных конфигурациях ЛЭП:

- 1) КЛ-ВЛ (один кабельный участок с одного конца линии);
- 2) ВЛ-КЛ-ВЛ (кабельная вставка на определенном участке трассы ЛЭП);
- 3) ВЛ.

Порядок испытаний следующий. В программном комплексе *PSCAD* разрабатывается имитационная модель электрической сети, содержащей заданную линию, параметры элементов сети должны быть максимально приближенными к реальным. Аналогичные параметры элементов сети вносятся в математическую модель ЛЭП, в которой итерационно рассчитываются сигналы при перемещении места повреждения вдоль длины линии с заданным шагом. При каждой итерации рассчитанные сигналы записываются в файлы, которые формируют базу данных эталонных волновых портретов. Затем на имитационной модели в *PSCAD* итерационно проводится ряд тестовых запусков программы. При каждом запуске произвольно выбирается место повреждения и тип повреждения. По завершению расчетов программы полученные сигналы записываются в файлы, которые формируют набор тестовых сигналов, имитирующих реальный замеренный сигнал.

Полученный набор эталонных портретов загружается в базу данных математической модели испытываемого алгоритма. Такая модель была реализована в программном комплексе

Mathcad. Далее поочередно на вход модели алгоритма загружаются тестовые сигналы, запускается расчет модели и записываются выходные сигналы, отражающие поврежденный участок ЛЭП (воздушный или кабельный), расстояние до места повреждения в единицах длины и значение максимальной нормированной корреляции.

Для каждого поврежденного участка следует провести не менее 5 испытаний с перемещением места повреждения, при этом самые крайние точки мест повреждения должны располагаться на расстоянии равном не менее 95% длины линии.

Проведем испытания на модели КВЛ, содержащей один кабельный участок с одного конца линии. В *PSCAD* была создана имитационная модель КВЛ 110 кВ «Кислородная-Жегалово II цепь» (ПАО «МОЭСК») с учетом её реальных параметров. Эта КВЛ состоит из 2-х участков (рисунок 3.15): воздушного между ПС «Жегалово» и ПП, и кабельного между ПП и ПС «Кислородная». Параметры рассматриваемой линии: длина воздушного участка 8 км, провод АС150; длина кабельного участка 8,97 км, кабель типа АПвПУ-1х350-64/11.

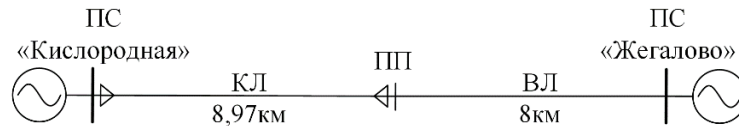


Рисунок 3.15 – Структурная схема КВЛ первого типа конфигурации

На исследуемой КВЛ в *PSCAD* имитировались 12 однофазных КЗ на кабельном участке и 11 однофазных КЗ на воздушном участке. Эталонные волновые портреты формировались с шагом 100 м вдоль всей длины КВЛ. На расстоянии 500 м до края каждого из участков (кабельного и воздушного) шаг был снижен до 50 м. Результаты испытания алгоритма представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Результаты испытания алгоритма на КВЛ первого типа

| Номер КЗ | Расстояние до точки КЗ | Определенное МП | Определенный участок | Номер КЗ | Расстояние до точки КЗ | Определенное МП | Определенный участок |
|---------------------------------------|------------------------|-----------------|----------------------|----------|------------------------|-----------------|----------------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Моделирование КЗ на кабельном участке | | | | | | | |
| 1 | 0,04 | 0 | КЛ | 7 | 4,18 | 4,2 | КЛ |
| 2 | 0,53 | 0,5 | КЛ | 8 | 5,05 | 5 | КЛ |
| 3 | 0,97 | 1 | КЛ | 9 | 6,19 | 6,2 | КЛ |
| 4 | 1,34 | 1,3 | КЛ | 10 | 7,1 | 7,1 | КЛ |
| 5 | 2,58 | 2,6 | КЛ | 11 | 7,91 | 7,9 | КЛ |
| 6 | 3,13 | 3,1 | КЛ | 12 | 8,53 | 8,55 | КЛ |

Продолжение таблицы 3.1

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|---------------------------------------|------|-----|----|----|------|-----|----|
| Моделирование КЗ на воздушном участке | | | | | | | |
| 1 | 0,04 | 0,1 | ВЛ | 7 | 4,18 | 4,2 | ВЛ |
| 2 | 0,53 | 0,5 | ВЛ | 8 | 5,05 | 5,1 | ВЛ |
| 3 | 0,97 | 1 | ВЛ | 9 | 6,19 | 6,2 | ВЛ |
| 4 | 1,34 | 1,3 | ВЛ | 10 | 7,1 | 7,1 | ВЛ |
| 5 | 2,58 | 2,6 | ВЛ | 11 | 7,91 | 7,9 | ВЛ |
| 6 | 3,13 | 3,1 | ВЛ | - | - | - | - |

Далее проведем испытания на модели КВЛ, содержащей кабельную вставку в середине ЛЭП. Параметры модели КВЛ с конфигурацией второго типа (рисунок 3.16): длина воздушного участка ВЛ1 11 км; длина кабельного участка КЛ 9 км, кабель типа АПвПУ-1х350-64/110; длина воздушного участка ВЛ2 30 км.

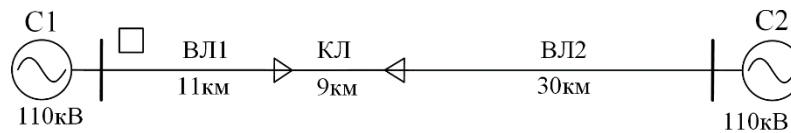


Рисунок 3.16 – Структурная схема КВЛ второго типа конфигурации

На исследуемой КВЛ в PSCAD имитировались однофазные КЗ на разных участках. Эталонные волновые портреты формировались с шагом 200м вдоль всей длины ВЛ и 100м вдоль всей длины КЛ. Результаты испытания алгоритма представлены в таблице 3.2.

Также проведем испытания на модели однородной ВЛ. Параметры модели ВЛ: длина ВЛ 50 км. Рисунок не приводится. Эталонные портреты были получены с шагом 200м вдоль всей длины рассматриваемой линии. На модели ВЛ исследовалась применимость разработанных алгоритмов для целей ОМП на обычных ВЛ. Результаты испытания алгоритма представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.2 – Результаты испытания алгоритма на КВЛ с кабельной вставкой в середине

| Номер КЗ | Расстояние до точки КЗ | Определенное МП | Определенный участок | Номер КЗ | Расстояние до точки КЗ | Определенное МП | Определенный участок |
|---|------------------------|-----------------|----------------------|----------|------------------------|-----------------|----------------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Моделирование КЗ на воздушном участке ВЛ1 | | | | | | | |
| 1 | 0,04 | 0 | ВЛ1 | 4 | 5,3 | 5,4 | ВЛ1 |
| 2 | 0,5 | 0,5 | ВЛ1 | 5 | 7 | 7 | ВЛ1 |

Продолжение таблицы 3.2

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|---|-------|------|-----|---|------|------|-----|
| 3 | 2,75 | 2,8 | ВЛ1 | 6 | 8,5 | 8,4 | ВЛ1 |
| Моделирование КЗ на кабельном участке КЛ | | | | | | | |
| 1 | 0,02 | 0,1 | КЛ | 4 | 3,5 | 3,5 | КЛ |
| 2 | 0,5 | 0,5 | КЛ | 5 | 7,5 | 7,5 | КЛ |
| 3 | 3,05 | 3 | КЛ | 6 | 8,98 | 8,8 | КЛ |
| Моделирование КЗ на воздушном участке ВЛ2 | | | | | | | |
| 1 | 1 | 1 | ВЛ2 | 4 | 15 | 15 | ВЛ2 |
| 2 | 7 | 7 | ВЛ2 | 5 | 20,7 | 20,6 | ВЛ2 |
| 3 | 11,15 | 11,2 | ВЛ2 | 6 | 9 | 29 | ВЛ2 |

Таблица 3.3 – Результаты испытания алгоритма на ВЛ

| Номер КЗ | Расстояние до точки КЗ | Определенное МП | Номер КЗ | Расстояние до точки КЗ | Определенное МП | Номер КЗ | Расстояние до точки КЗ | Определенное МП |
|----------|------------------------|-----------------|----------|------------------------|-----------------|----------|------------------------|-----------------|
| 1 | 1,1 | 1,2 | 4 | 21,05 | 21,2 | 7 | 47,9 | 48 |
| 2 | 4 | 4 | 5 | 28,73 | 28,8 | 8 | 49,4 | 49,4 |
| 3 | 7,13 | 7 | 6 | 35,4 | 35,4 | - | - | - |

Анализ результатов имитационных испытаний разработанного алгоритма одностороннего АПВ и ОМП КВЛ позволяет сделать следующие выводы:

- 1) При всех тестовых случаях были верно определены поврежденные участки;
- 2) Погрешность определения места повреждения на воздушном участке составляет не более шага моделирования (в этом случае 100м или 200м).

3.4. Алгоритмы цифровой обработки сигналов в задаче автоматического повторного включения и определения места повреждения кабельно-воздушных ЛЭП

Теме ВОМП ЛЭП в последнее время уделяется много внимания. Подавляющее большинство работ посвящено разработке алгоритмов ВОМП и исследованию их эффективности с применением имитационного моделирования. При этом уделяется мало внимания вопросам цифровой фильтрации с целью выделения высокочастотных составляющих фронтов волн.

Получение сигнала с малым шагом дискретизации (например, 1мкс) лишь начальное необходимое условие дальнейшей цифровой обработки сигнала (ЦОС), содержащего

высокочастотные составляющие. Поскольку для оценки волнового процесса для целей ВОМП и волновой РЗА зачастую важно оценить относительную величину фронтов волн и относительное время их прибытия, то составляющая промышленной частоты, а также другие низкочастотные (до нескольких кГц) гармонические составляющие являются помехой. Поэтому необходимо выделить из сигнала высокочастотные компоненты.

Выполнить поставленную задачу возможно различными способами. Например, реализовать полосовой фильтр, пропускающий сигнал только в определенном диапазоне частот. Это могут быть различные цифровые фильтры, линейные и нелинейные, с высоким или низким порядком передаточной функции, например, фильтры Чебышева или Баттерворта [134]. Однако реализация подобных фильтров приводит к повышенной вычислительной нагрузке на устройство. Поэтому целесообразно рассмотреть более простые способы фильтрации. В диссертационной работе будут рассматриваться только фильтры с конечной импульсной характеристикой (КИХ) [134].

Известно, что основные измерительные преобразователи (ТТ, ТН) искажают волновой сигнал в силу своих частотных характеристик, а также вследствие переходных процессов в самих преобразователях и в их вторичных цепях [63, 135]. Дополнительно могут исказить сигнал различные ВЧ помехи, а также шумы квантования АЦП устройства. В некоторых случаях искажения значительны и не позволяют применять простые методы фильтрации, в частности, дифференцирующий фильтр (частный случай фильтра верхних частот (ФВЧ)):

$$y_1(n) = x(n) - x(n-1), \quad (3.34)$$

где n – номер текущего отсчета сигнала.

Указанное обстоятельство стало одной из причин широкого распространения методов двустороннего ВОМП, где используется оценка только первых волн переходного процесса. Обнаружение полезного сигнала на фоне помех в таком техническом решении проще, чем его фильтрация на фоне совокупности мешающих сигналов. То есть зафиксировать время прихода первой волны технически проще, чем сформировать неискаженный волновой портрет.

Таким образом, актуален анализ способов КИХ фильтрации высокочастотных сигналов, а также их применимость для различных методов ВОМП и АПВ КВЛ. Далее в этом пункте для демонстрационных целей используются сигналы реальных осциллограмм с частотой дискретизации 1МГц, зафиксированные на присоединениях ВЛ 220 кВ Парская-Сасово в ходе исследований, отмеченных в работах [63, 140].

3.4.1 Предварительная обработка волновых сигналов

Часто при обработке высокочастотных сигналов ЛЭП переходят от фазного представления к модальному (волновые каналы) [63, 135]. Рассмотрим теоретическое основание такого преобразования.

При составлении дифференциальных уравнений напряжения и тока для w – проводной линии получается система из $2w$ уравнений, которая определяет токи и напряжения в каждом проводе. При анализе и решении этих уравнений для удобства представляют падающую волну напряжения (или тока) в виде суммы w падающих волн, которые принято называть модами (модальными составляющими). Каждая из этих волн характеризуется своими коэффициентами распространения, волновым сопротивлением и т.д. Таким образом, модальные составляющие распространяются по своим волновым (модальным) каналам с определенными присущими им параметрами независимо друг от друга [63, 66, 114].

Итак, для w -проводной линии существует w независимых волновых каналов, каждый из которых охватывает все или часть проводов линии, причем в любом случае один канал является каналом «все провода – земля» (земляной канал), а остальные – междупроводами (междуфазными – в случае, если на линии нет (не учитываются) грозозащитных тросов), так как токи в этих каналах протекают в основном по проводам. Так для трехпроводной линии существует два междуфазных модальных канала и один – земляной. Первым междуфазным модальным каналом является канал «средняя фаза – крайние фазы» (ток в одном направлении протекает по средней фазе и возвращается по двум крайним фазам), а вторым – канал «фаза – фаза крайние» (ток в прямом направлении протекает по одной крайней фазе и в обратном – по другой крайней фазе). В земляном (нулевом) канале «три фазы – земля» ток течет по всем трем фазам и возвращается через землю. Ниже представлены уравнения, связывающие токи и напряжения в проводах с соответствующими модальными составляющими, в матричной форме [66]:

$$[u_m] = [\lambda]^{-1} \cdot [u_{ph}]; [i_m] = [\delta]^{-1} \cdot [i_{ph}], \quad (3.35)$$

где $[U_{ph}]$, $[U_m]$ – столбовые матрицы соответственно полных напряжений в проводах и напряжений модальных составляющих; $[i_{ph}]$, $[i_m]$ – тоже для токов; $[\lambda]$, $[\delta]$ – квадратные матрицы коэффициентов (матрицы трансформации) напряжения и тока соответственно, определяющие соотношения величин в фазах и модальных составляющих.

Матрицы коэффициентов модального преобразования в общем случае могут отличаться для напряжения и тока. В отечественной практике принято следующее разложение на волновые каналы [66]:

$$[\lambda] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \lambda_{2(1)} & 0 & \lambda_{2(0)} \\ 1 & -1 & 1 \end{bmatrix}; \quad [\delta] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \delta_{2(1)} & 0 & \delta_{2(0)} \\ 1 & -1 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3.36)$$

где $\lambda_{2(1)}$, $\lambda_{2(0)}$, $\delta_{2(1)}$, $\delta_{2(0)}$ – коэффициенты, зависящие от параметров линии, земли, и частоты. Эти коэффициенты обычно принимаются равными $\lambda_{2(1)} = \delta_{2(1)} = -2$; $\lambda_{2(0)} = \delta_{2(0)} = 1$.

Необходимо иметь ввиду, что нумерация фаз в матрицах (3.35) может быть выбрана произвольной, тогда существует по крайней мере 3 комбинации (по числу фаз) междуфазных модальных составляющих в зависимости от выбора «начальной» фазы (провода). При этом в случае однофазного КЗ в зависимости от поврежденной фазы и выбранного «начального» провода модальные составляющие будут отличаться.

Стоит отметить, что существуют разные виды разложения на модальные составляющие. Например, симметричные составляющие, преобразование Кларк и т.д. При этом наиболее широко распространено применение преобразования Кларк, матрица трансформации (выражение 3.37) при котором почти аналогична указанной выше [135]. Для преобразования, аналогичному (3.36) один канал (мода) является земляным, а остальные - междуфазными.

Поскольку в междуфазных волновых каналах энергия волны сосредоточена в относительно узком пространстве между проводами, то параметры распространения волн в этих волновых каналах практически одинаковые и существенно отличаются от земляного волнового канала, энергия волны в котором распределяется в существенно большем пространстве в воздушной среде и частично в поверхностном слое земли. Известно [63, 66], что параметры земляного волнового канала, как правило, отличаются от междуфазных следующим образом: меньше групповая скорость распространения волн, более явно выражен эффект дисперсии (зависимость скорости распространения от частоты сигнала), что влечет к большему искажению фронта волны, больше затухание. Дополнительно на земляной волновой канал приходится значительная часть как естественных помех, возникающих на ЛЭП, так и искусственных помех, создаваемых отдельными узлами самого устройства ВОМП, например, блоком питания.

Так на рисунке 3.11 показаны сигналы тока в трех фазах (рисунок 3.11,а) во время прихода первой волны от места повреждения для случая однофазного КЗ в фазе *B*, а также разложение на модальные составляющие для фазы *B* (рисунок 3.11,б). На рисунке 3.11 принята следующая маркировка сигналов: серая сплошная линия - ток фазы *A* (рисунок 3.11,а) и ток "нулевой" модальной составляющей ("земляной" волновой канал) (рисунок 3.11,б); черная сплошная линия - ток фазы *B* (рисунок 3.11,а) и ток первой модальной составляющей (волновой канал две фазы крайние - фаза средняя) (рисунок 3.11,б); черная пунктирная линия - ток фазы *C* и ток второй модальной составляющей (рисунок 3.11,б). При моделировании алгоритмов фильтрации были выбраны матрицы трансформации для фазы *B*, аналогичные (3.36), за исключением смены знаков в 1-ом столбце матриц $[\lambda]$ и $[\delta]$, таким образом:

$$[\lambda] = [\delta] = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 1 \\ 2 & 0 & 1 \\ -1 & -1 & 1 \end{bmatrix}; [\delta]^{-1} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} -0,5 & 1 & -0,5 \\ 1,5 & 0 & -1,5 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}. \quad (3.37)$$

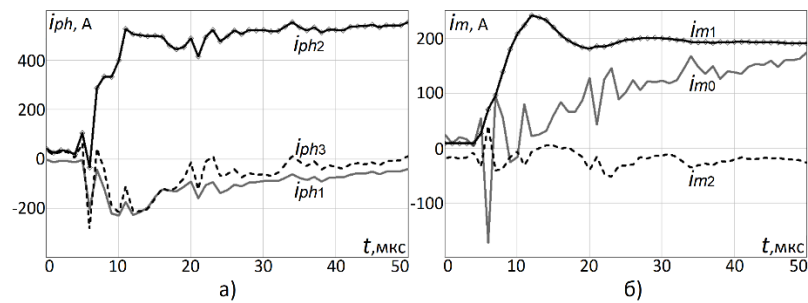


Рисунок 3.11 – Сигналы тока в начале переходного процесса: фазные токи (а); модальные составляющие тока (б)

Как видно из рисунка 3.11 при разложении на модальные составляющие большая часть искажений фронта волны приходится на "земляной" волновой канал, как и было отмечено выше. Если сравнить сигнал поврежденной фазы (фаза В, рисунок 3.11,а) и сигнал первой модальной составляющей (рисунок 3.11,б) можно сделать вывод, что во втором сигнале искажений значительно меньше. Поэтому при определении приращения для этих двух сигналов (рисунок 3.11) во втором случае фронт волны имеет более лучшую форму для оценки как времени его появления, так и его амплитуды. Стоит отметить, что анализ осциллограмм на временном интервале, не показанном на рисунках 3.11, позволяет сделать вывод, что многие шумовые компоненты в фазных сигналах идентичны как по времени появления, так и по амплитуде и полярности. Это позволяет сделать предположение, что источник этих шумов искусственный и возможно расположен где-то на ПС. Более того наиболее вероятным представляется вариант, что источник данных шумов расположен внутри устройства ВОМП, зарегистрировавшего наблюдаемые на рисунок 3.11 сигналы. Например, это может быть источник питания, который примерно одинаково влияет на каждую фазу и именно поэтому данные шумы очень хорошо фильтруются при вычислении первой междуфазной модальной составляющей (вычитание «нулевой» модальной составляющей).

Таким образом в общем случае целесообразно выделять и оценивать первую модальную составляющую вместо фазного сигнала. При этом следует вычислять модальную составляющую относительно каждой фазы и выбирать ту, амплитуда фронта волны в которой больше.

3.4.2 Методы синтеза цифровых фильтров

При формировании импульсных характеристик КИХ фильтров для целей ВОМП возможны разные подходы. Первый – классический (частотный), связанный с реализацией частотной характеристики в определенной полосе частот (например, применение ФВЧ). Возможна адаптивная фильтрация с характеристикой, обеспечивающей компенсацию искажений (например, ТТ). При другом подходе используется статистическая обработка данных. Его особенность заключается в том, что значения сигнала в окне данных такого фильтра рассматриваются как выборка значений некоторой случайной величины и вычисляется заданная

статистическая оценка. Некоторые методы фильтрации, например, вычитание постоянной составляющей (выражение 3.39) соответствуют как одному подходу (ФВЧ), так и другому (центрирование случайной величины). На рисунке 3.12,а показан эффект фильтрации согласно выражению 3.39 при $N=20$. Рисунок 3.12,б иллюстрирует амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) фильтра 3.38 (кривая 2), для сравнения АЧХ фильтра согласно 3.34 соответствует кривой 1 [141, 142].

$$y_2(n) = x(n) - \bar{x}(n), \quad \bar{x}(n) = \frac{1}{N} \cdot \sum_{k=0}^{N-1} x(n-k), \quad (3.38)$$

где N – число отсчетов в окне данных (число коэффициентов импульсной характеристики фильтра).

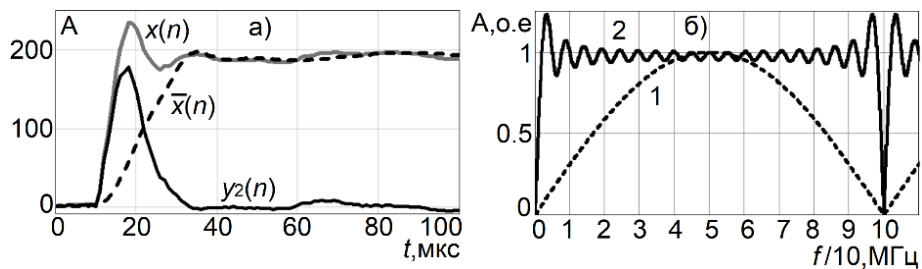


Рисунок 3.12 – Эффект фильтрации согласно выражению 3.38 (а); АЧХ фильтров, соответствующих выражениям 3.34 и 3.38 (при $f_d=1$ МГц) (б)

В работе [135] предложен вариант дифференциально-сглаживающей фильтрации (рисунок 3.13,а), которую можно разбить на два этапа: сигнал сначала проходит через сглаживающий фильтр (СФ), а затем через дифференцирующий фильтр (ДФ) по выражению (1). Такое решение является частным случаем полосовой фильтрации, включающей последовательно соединенные фильтры нижних и верхних частот. В [135] показан пример оценки времени прихода волн с учетом рассматриваемой фильтрации.

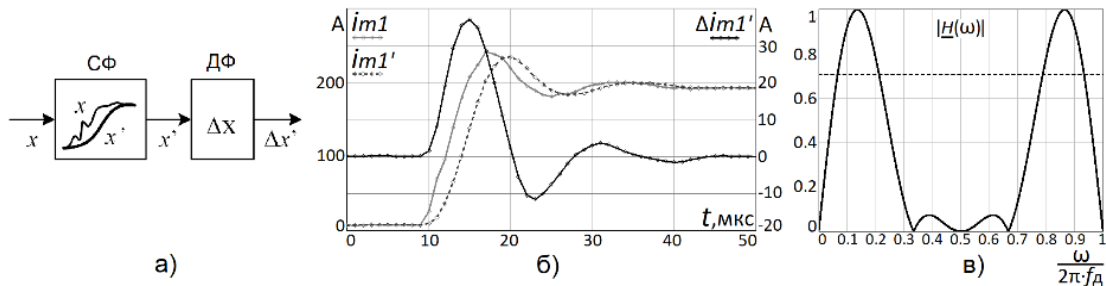


Рисунок 3.13 – Структурная схема полосовой фильтрации согласно [135] (а); результаты фильтрации по предложенной схеме (б); АЧХ полосового фильтра (в).

Стоит отметить, что в [135] предложено в качестве СФ использовать треугольный фильтр, т.е. фильтр, имеющий треугольную импульсную характеристику. При этом итоговая импульсная характеристика всего фильтрующего звена (СФ - ДФ) имеет ступенчатую форму. Таким образом такую фильтрацию можно оценивать как согласованную фильтрацию при допущении, что в

сигнале фронты волн имеют ступенчатую форму. И хотя на практике фронты волн имеют не вполне ступенчатую форму, этот метод фильтрации показывает хорошие результаты и применяется в промышленных устройствах волновой РЗА.

Возможен подход, при котором предварительно определяется частотная характеристика искажающего звена ($H(\omega)$), например ТТ, и вычисляется обратная ей характеристика ($H^{-1}(\omega)$). Методы вычисления импульсной характеристики фильтра, устраняющего искажения, т.е. обратной импульсной характеристики, известны и изложены, например в [143].

В ходе исследований для получения импульсной характеристики ТТ реализовалось имитационное моделирование и сопоставление модельных сигналов с реальными осциллограммами аварийных процессов. Например, на рисунке 3.14 показаны аварийные составляющие ($i_{ав}(n) = i(n) - i(n-T)$) сигнала тока реальной осциллограммы (i_{real}) и сигнала тока, полученный путем имитационного моделирования ЛЭП 220 кВ Парская-Сасово в программном комплексе *PSCAD* (i_{model}) (Приложение А). На рисунке 3.14,а представлены сигналы тока поврежденной фазы, а на рисунке 3.14,б – составляющие первого междуфазного волнового канала. Рисунок 3.15 иллюстрирует импульсные характеристики, полученные способом сопоставления модельных и реальных сигналов, для фазного сигнала (рисунок 3.15,а) и для модального сигнала (рисунок 3.15,б).

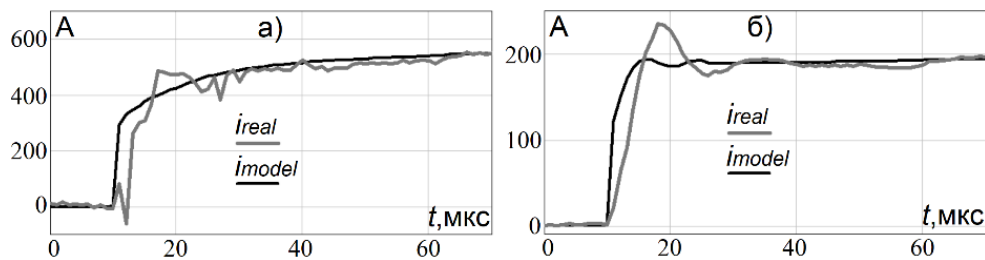


Рисунок 3.14 – Реальный и модельный сигналы тока

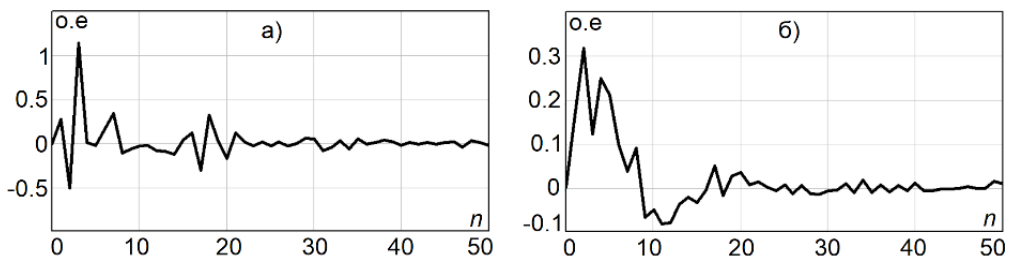


Рисунок 3.15 – Импульсные характеристики

Известно, что одним из наиболее эффективных методов обнаружения высокочастотных сигналов на фоне некоррелированных помех является согласованная фильтрация [144]. Поэтому применительно к рассматриваемой задаче перспективны исследования методов согласованной фильтрации, где импульсная характеристика фильтра согласовывается с волновым сигналом с учетом импульсной характеристики ТТ.

3.5. Выводы по главе

1. Разработан метод двустороннего АПВ КВЛ, использующий несинхронизированные измерения и упрощенную обработку волновых сигналов, позволяющий определить поврежденный участок КВЛ и заблокировать АПВ при КЗ на КЛ. Основными требованиями к устройству, реализующему предлагаемый способ АПВ КВЛ, являются применение АЦП с высокой частотой дискретизации (не менее 1 МГц) и наличие канала связи между ПС по концам ЛЭП. При этом не требуется точная синхронизация времени между полукомплектами устройства, в отличие от существующих устройств двустороннего волнового ОМП.

2. Предложен метод двустороннего АПВ и ОМП КВЛ, использующий синхронизированные измерения, позволяющий определить поврежденный участок и место повреждения КВЛ и заблокировать АПВ при КЗ на КЛ. Основные требования к устройству, реализующему этот способ АПВ КВЛ, такие же как для предыдущего способа, но дополнительно необходимо наличие высокоточной синхронизации времени между устройствами.

3. Разработан метод одностороннего АПВ и ОМП КВЛ, основанный на распознавании волновых портретов. Волновые портреты представляют собой высокочастотные составляющие переходного процесса, зарегистрированные на одном из концов ЛЭП на определенном временном промежутке и характеризующие повреждение линии. Разработанный алгоритм распознавания волновых портретов состоит в вычислении коэффициентов корреляции замеренного и обработанного заданным образом сигнала с эталонными портретами, полученными заранее путем имитационного моделирования.

Разработанные методы АПВ и ОМП применимы для КВЛ с любым количеством и типом участков.

4. Проведен анализ особенностей фильтрации высокочастотных составляющих электромагнитного волнового процесса при повреждениях ЛЭП. Рассмотрено применение методов фильтрации, позволяющих компенсировать искажения сигналов тока и напряжения.

4 ПОЛУНАТУРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ И РЕАЛИЗАЦИЯ СПОСОБОВ АВТОМАТИЧЕСКОГО ПОВТОРНОГО ВКЛЮЧЕНИЯ КАБЕЛЬНО-ВОЗДУШНЫХ ЛЭП, ОСНОВАННЫХ НА ОЦЕНКЕ ВОЛНОВОГО ПРОЦЕССА

4.1. Полунатурные испытания способов автоматического повторного включения и определения места повреждения кабельно-воздушных ЛЭП, основанных на контроле волновых переходных процессов

Проведем испытания разработанных алгоритмов АПВ и ОМП КВЛ, основанных на контроле волновых переходных процессов, предложенных в предыдущей главе. При этом для испытаний используем сигналы реальных осциллограмм пяти случаев КЗ на КВЛ 220кВ Тамань-Кафа I цепь, записанных устройствами ВОМП производства НПП Бреслер с частотой дискретизации 2,5 МГц. Таким образом такие испытания можно охарактеризовать как полунатурные, поскольку имитируется подача реальных сигналов на вход алгоритмов.

Как отмечено в предыдущей главе для работы волновых методов АПВ и ОМП КВЛ необходимо определить основные волновые параметры участков КВЛ, такие как: волновая длина участка (длина реального пути, который проходят волны при распространении по участку), время пробега волн по участку, затухание, волновое сопротивление. Помимо этого, одним из основных разработанных алгоритмов АПВ и ОМП КВЛ является односторонний алгоритм на основе распознавания волновых портретов с использованием кросскорреляции. А для работы данного алгоритма необходимо сформировать набор эталонных волновых портретов с использованием имитационной модели КВЛ. Поэтому для проведения полунатурных испытаний используются параметры КВЛ 220 кВ Тамань – Кафа, приведенные в главе 2. А для вычисления набора эталонных волновых портретов также будет использована модель КВЛ, приведенная в главе 2.

4.1.1 Настройка алгоритмов автоматического повторного включения и определения места повреждения кабельно-воздушных ЛЭП, основанных на контроле волновых переходных процессов

Перед тем как провести испытания алгоритмов АПВ и ОМП КВЛ зададим параметры работы (уставки) алгоритмов, используя разработанную модель КВЛ 220кВ Тамань-Кафа I цепь. В качестве начала отсчета расстояния на КВЛ выберем ПС Тамань.

Первым рассмотрим алгоритм ОМП и АПВ КВЛ на основе двусторонних синхронизированных измерений времени прибытия фронта начальных волн (п. 3.2). Уставки этого алгоритма и как они используются в расчетах алгоритмом представлены в Приложении В (п. 5.1). Основными уставками являются значения длины участков и времени распространения волн по участкам, данные о необходимости запрета АПВ на том или ином участке, а также величина запаса по зоне блокирования АПВ, которая имеет следующий смысл. Если определен

воздушный участок, а расстояние от рассчитанного места повреждения до ближайшего кабельно-воздушного перехода меньше чем величина запаса по зоне блокирования АПВ, то будет сформирован сигнал запрета АПВ. Зона запаса выбирается исходя из вероятной погрешности ОМП. Для полунатурных испытаний было выбрано значение 200 м.

На рисунке 4.1 показана расчетная зависимость времени распространения от места повреждения в заданной точке на КВЛ до ПС Тамань. Эта характеристика построена по значениям длины участков и времени распространения волн по участкам КВЛ, определенным в главе 2. На рисунке 4.1 пунктирными линиями обозначены значения времени, соответствующие границам зоны блокирования. Синие линии соответствуют воздушным участкам, а коричневая линия – кабельному.

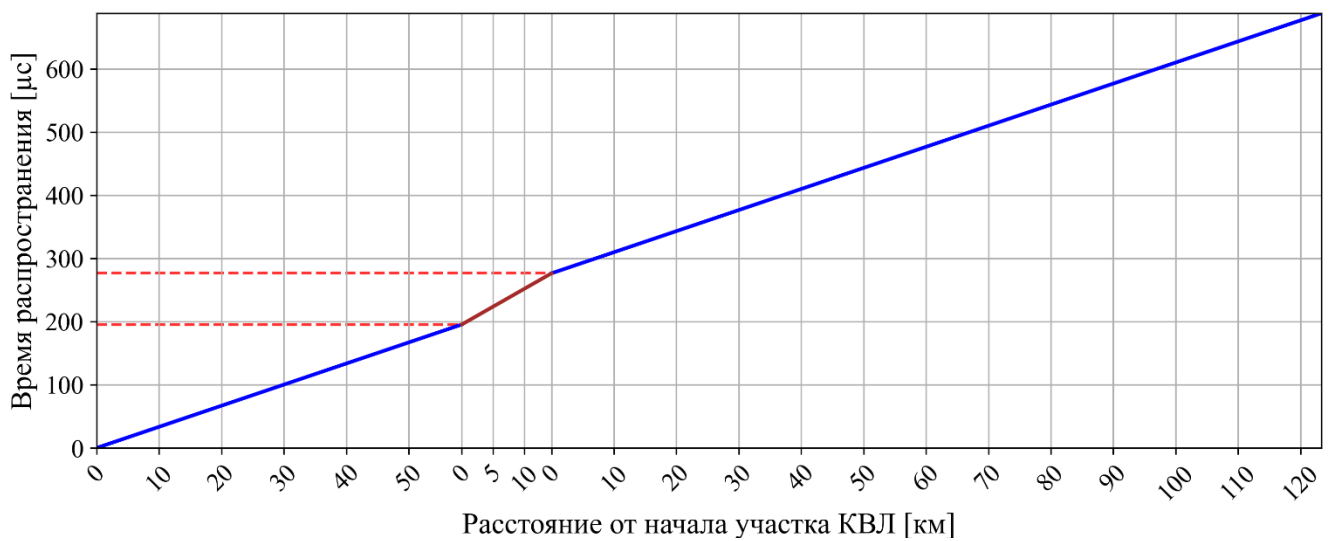


Рисунок 4.1 – Расчетная зависимость времени распространения от места повреждения в заданной точке на КВЛ до ПС Тамань и зона блокирования АПВ

Вторым рассматриваемым алгоритмом является алгоритм АПВ КВЛ на основе двусторонних несинхронизированных измерений амплитуды фронта начальных волн (п. 3.1). Настройки этого алгоритма и как они используются в расчетах алгоритмом представлены в Приложении В (п. В.5.2).

Основными уставками алгоритма являются значения верхних и нижних границ отношения амплитуд для соответствующей зоны блокирования АПВ КВЛ. Для определения уставок воспользуемся разработанной в главе 2 моделью КВЛ и построим зависимость отношения амплитуды фронта волны в сигнале тока на ПС Тамань к амплитуде фронта волны в сигнале тока на ПС Кафа. На рисунке 4.2 показана такая зависимость для фазных сигналов, а на рисунке 4.3 – для сигналов первой междуфазной модальной составляющей. Дополнительно на рисунке 4.4 более детально показана зависимость на кабельном участке для фазных сигналов. На рисунках 4.2 – 4.4 по оси ординат отложены значения отношения амплитуд в логарифмическом масштабе,

а по оси абсцисс – значения расстояния от начала участков КВЛ. Синие линии соответствуют воздушным участкам, а коричневая линия – кабельному.

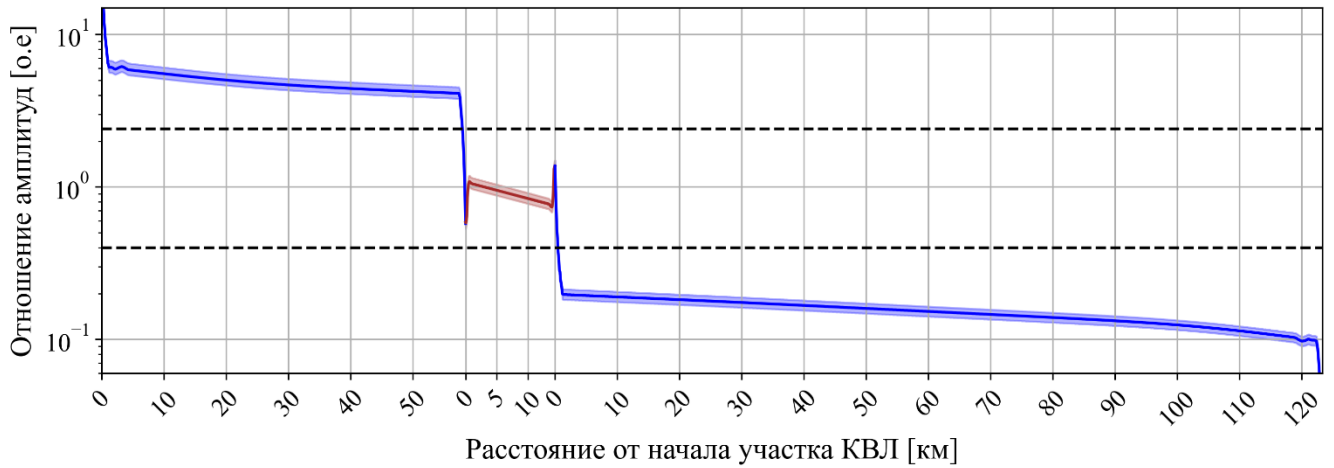


Рисунок 4.2 – Модельная зависимость отношения амплитуды фронта волн по концам КВЛ от места КЗ для фазных сигналов

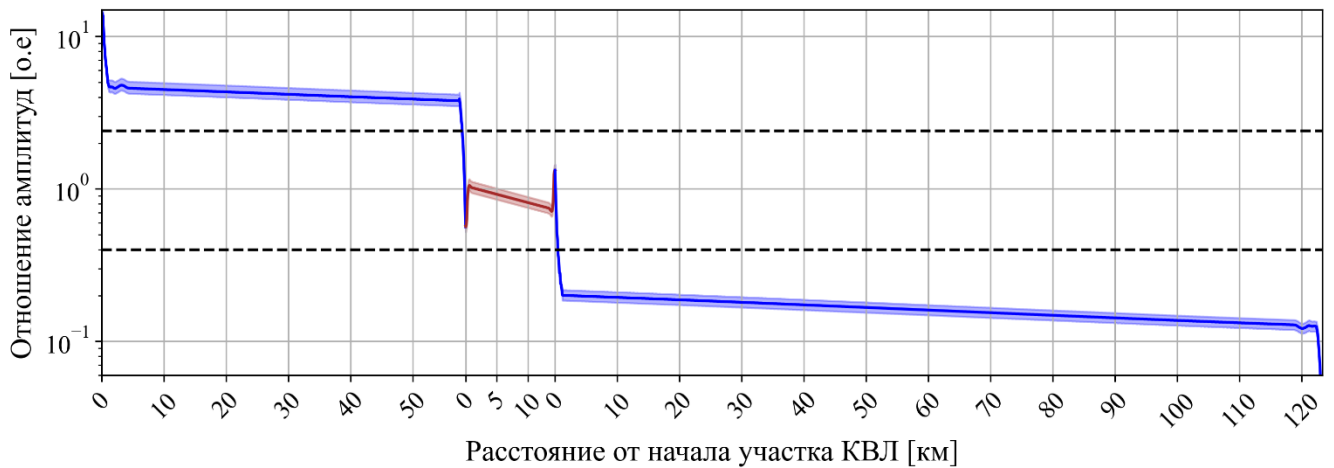


Рисунок 4.3 – Модельная зависимость отношения амплитуды фронта волн по концам КВЛ от места КЗ для сигналов междуфазного волнового канала

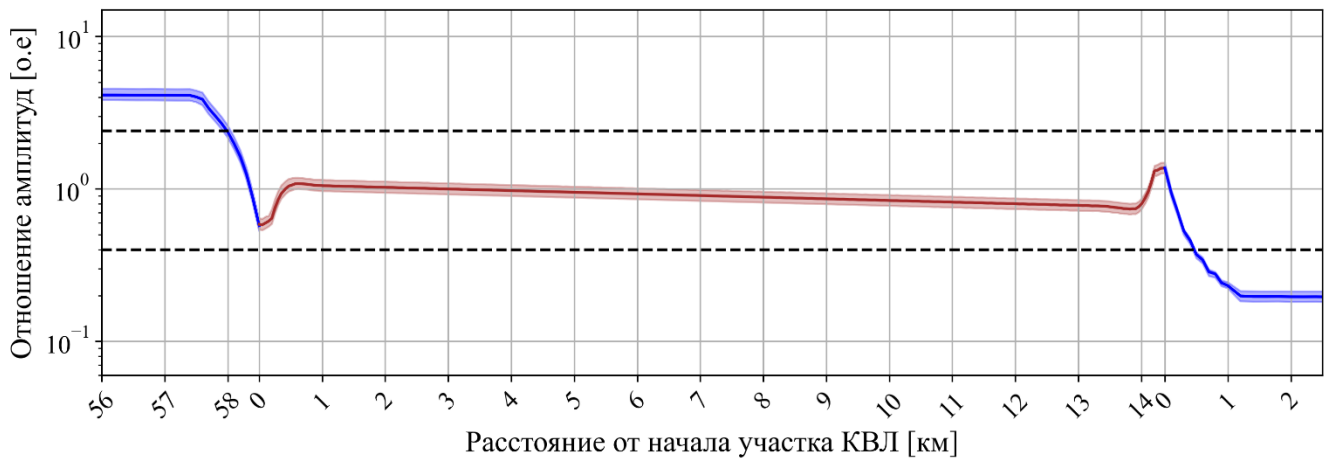


Рисунок 4.4 – Модельная зависимость отношения амплитуды фронта волн по концам КВЛ от места КЗ для фазных сигналов (кабельный участок)

При построении этих характеристик модельные сигналы после фильтрации проходили свертку с импульсными характеристиками токового измерительного звена, определенными в главе 2. При этом поскольку импульсные характеристики ТТ разных фаз отличаются, как показано в главе 2, зависимости отношения амплитуд построены с учетом этих отличий. Так на рисунках 4.2 – 4.4 яркая линия соответствует среднему значению, а более тусклая область вокруг нее – отклонениям значений при использовании импульсной характеристики двух других фаз. Таким образом построенные характеристики учитывают изменение амплитуды фронта волны при измерениях на ПС, вызванное отличиями передаточной характеристики токового измерительного звена каждой фазы.

Как можно видеть из рисунков 4.2 и 4.3 характеристики отношения амплитуд для фазных сигналов и сигналов междуфазного волнового канала отличаются незначительно, причем вблизи кабеля отличий практически нет.

Горизонтальные черные пунктирные линии на рисунках 4.2 – 4.4 отображают значения верхней и нижней границ отношения амплитуд для зоны блокирования АПВ КВЛ. Эти значения выбраны с учетом отстройки от кабельного участка и равны соответственно 2,4 и 0,4. При таких значениях как видно из рисунка 4.4 зона блокирования АПВ выходит за кабельный участок не более чем на несколько сотен метров.

Третьим испытуемым алгоритмом является односторонний алгоритм АПВ и ОМП КВЛ на основе распознавания волновых портретов (п. 3.3). Настройки этого алгоритма и как они используются в расчетах алгоритмом представлены в Приложении В (п. 4.5 и п. 5.3).

Основными параметрами алгоритма являются наборы эталонных портретов при повреждениях на разных участках КВЛ и на разном расстоянии на ЛЭП и при повреждениях разных фаз. Разработанная в главе 2 модель КВЛ использовалась для набора эталонных портретов путем моделирования однофазных КЗ вдоль всей длины КВЛ с шагом 100 м на воздушных участках и 50 м на кабельном. Эталонные портреты проходили свертку с импульсными характеристиками ТТ каждой фазы, а также фильтрацию, аналогичную фильтрации реальных сигналов. Таким образом были созданы по три набора эталонных портретов повреждений каждой фазы на КВЛ 220кВ Тамань-Кафа I цепь для ПС Тамань и для ПС Кафа. Как показано в главе 2 вид повреждения не столь значительно влияет на волновой портрет, поэтому при междуфазных повреждениях для обработки будет выбран сигнал той фазы, амплитуда в которой больше.

Поскольку два алгоритма (№1 и №3) могут формировать разные результаты ОМП, что будет показано далее, то целесообразно сформировать некоторую обобщенную оценку ОМП, используя данные двух алгоритмов ОМП КВЛ. Такой алгоритм расчета итоговой оценки места повреждения представлен в Приложении В (п. 5.4).

Далее будут представлены результаты работы отдельных алгоритмов, а затем общий результат АПВ и ОМП КВЛ. При этом будут приведены результаты работы алгоритмов для фазных сигналов. При осуществлении модального преобразования сигналов перед фильтрацией результаты получились аналогичные.

На рисунке 4.5 показана зависимость времени распространения от места повреждения в заданной точке на КВЛ до ПС Тамань и зона блокирования АПВ аналогично рисунку 4.1, но с нанесением точек реальных КЗ, которые отображены красными маркерами-звездами. Эти точки имеют следующие координаты: расстояние соответствует предполагаемому месту повреждения, определенному вручную, а время распространения определено алгоритмом.

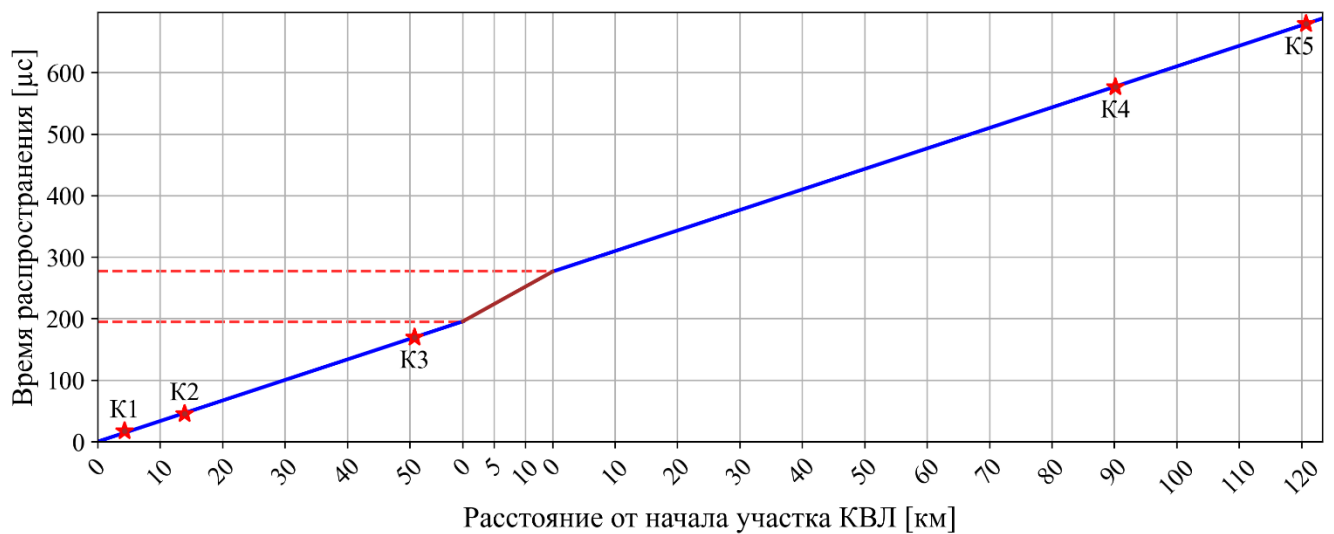


Рисунок 4.5 – Расчетная зависимость времени распространения от места повреждения до ПС Тамань и точки реальных КЗ

Анализируя рисунок 4.5, можно сказать, что поврежденный участок определен верно и промахов ОМП нет. Однако по рисунку трудно оценить точность ОМП. Количественные показатели работы алгоритма приведены в п. 4.3.4.

На рисунке 4.6 показана модельная зависимость отношения амплитуды фронта волн по концам КВЛ от места КЗ аналогично рисунку 4.2, но с нанесением точек реальных КЗ, которые отображены красными маркерами-звездами. Эти точки имеют следующие координаты: расстояние соответствует предполагаемому месту повреждения, определенному вручную, а отношение амплитуд определено алгоритмом. Также по точкам реальных КЗ построены аппроксимирующие характеристики, которые отображены красными линиями.

Анализируя рисунок 4.6, можно заключить, что поврежденный участок определен верно, а ряд точек реальных КЗ лежат достаточно близко к модельной характеристике. Тем не менее можно наблюдать и более значительное отклонение некоторых реальных точек КЗ от модельной характеристики, которое можно объяснить некоторым несоответствием затухания реальных ЛЭП и затуханием ЛЭП в модели.

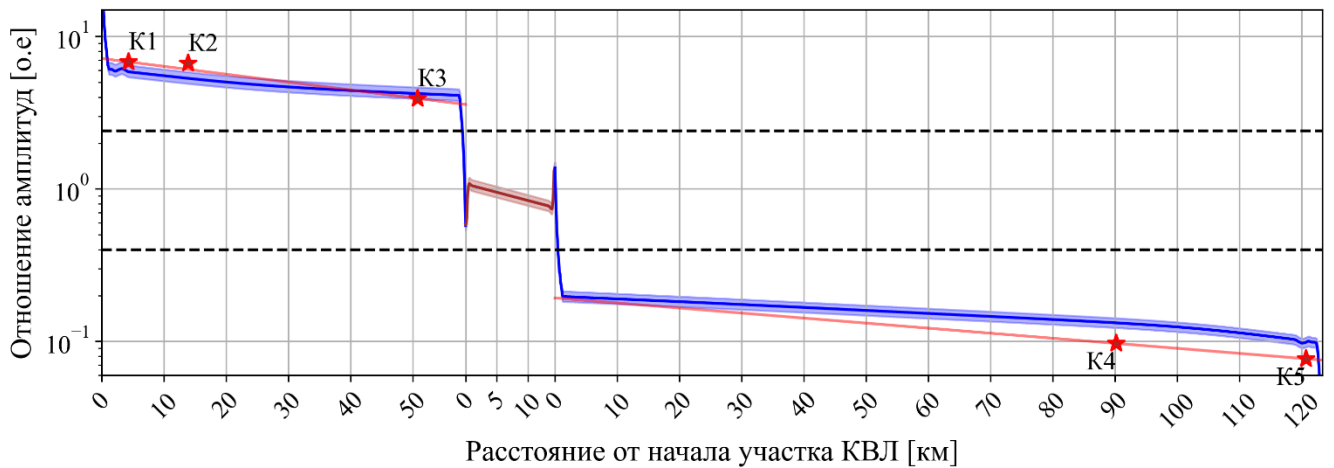


Рисунок 4.6 – Модельная зависимость отношения амплитуды фронта волн по концам КВЛ от места КЗ для фазных сигналов и точки, соответствующие реальным КЗ

Оценим работу корреляционного алгоритма АПВ и ОМП КВЛ следующим образом. Для каждого случая КЗ вычислим значения коэффициента корреляции реального волнового портрета с каждым эталонным портретом из набора и построим зависимость значений коэффициента корреляции от возможного места повреждения. Так на рисунке 4.7 показаны такие зависимости при использовании сигналов со стороны ПС Тамань, а на рисунке 4.8 – со стороны ПС Кафа. На каждом из рисунков построено пять графиков, соответствующих пяти случаям реального КЗ, причем верхний график соответствует первому случаю КЗ, а нижний – пятому. На рисунках синие линии соответствуют воздушным участкам, коричневые – кабельному. Пунктирные черные прямые линии показывают максимальное значение коэффициента корреляции, которое соответствует месту повреждения, определяемому алгоритмом, численные значения которых также отображены на графиках.

На рисунках 4.7 – 4.8 для всех случаев КЗ наблюдаются отчетливые пики в месте повреждения, определяемом алгоритмом. Однако для второго случая КЗ (второй сверху график на рисунках 4.7 – 4.8) заметно, что в некоторых точках, не соответствующих реальному месту повреждения, также наблюдаются пики с локальными максимумами, значение коэффициента корреляции в которых близко к глобальному максимуму. Это объясняется тем, что фронты волн в сигналах, соответствующих второму случаю КЗ, имеют отличную от всех остальных случаев искаженную форму, что также отмечалось в главе 2. Это может быть связано со сложными условиями возникновения повреждения в этом случае КЗ. Тем не менее алгоритм правильно определил поврежденный участок и место повреждения и в этом случае и во всех остальных.

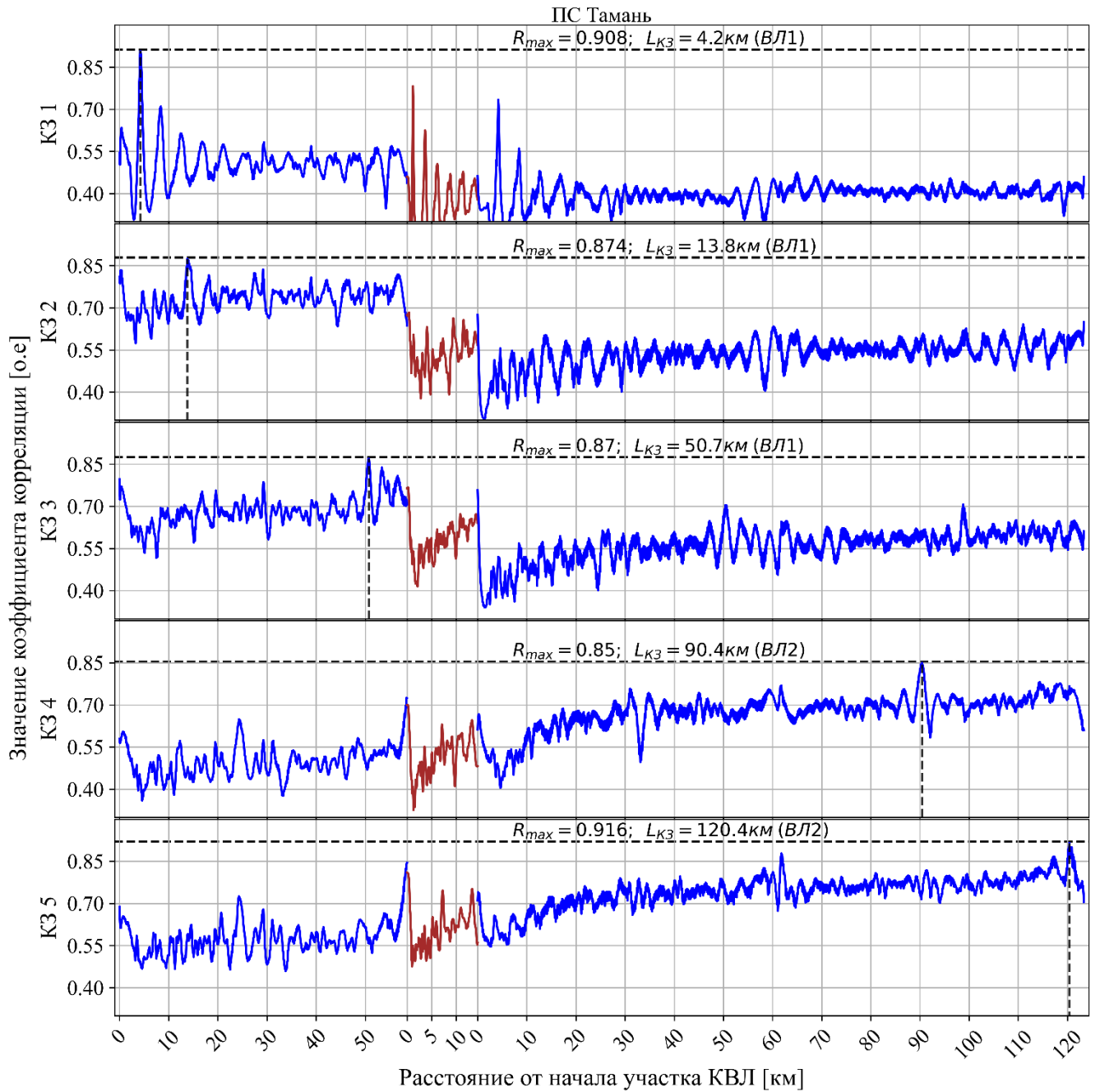


Рисунок 4.7 – Зависимость значений коэффициента корреляции от возможного места повреждения для каждого случая КЗ (со стороны ПС Тамань)

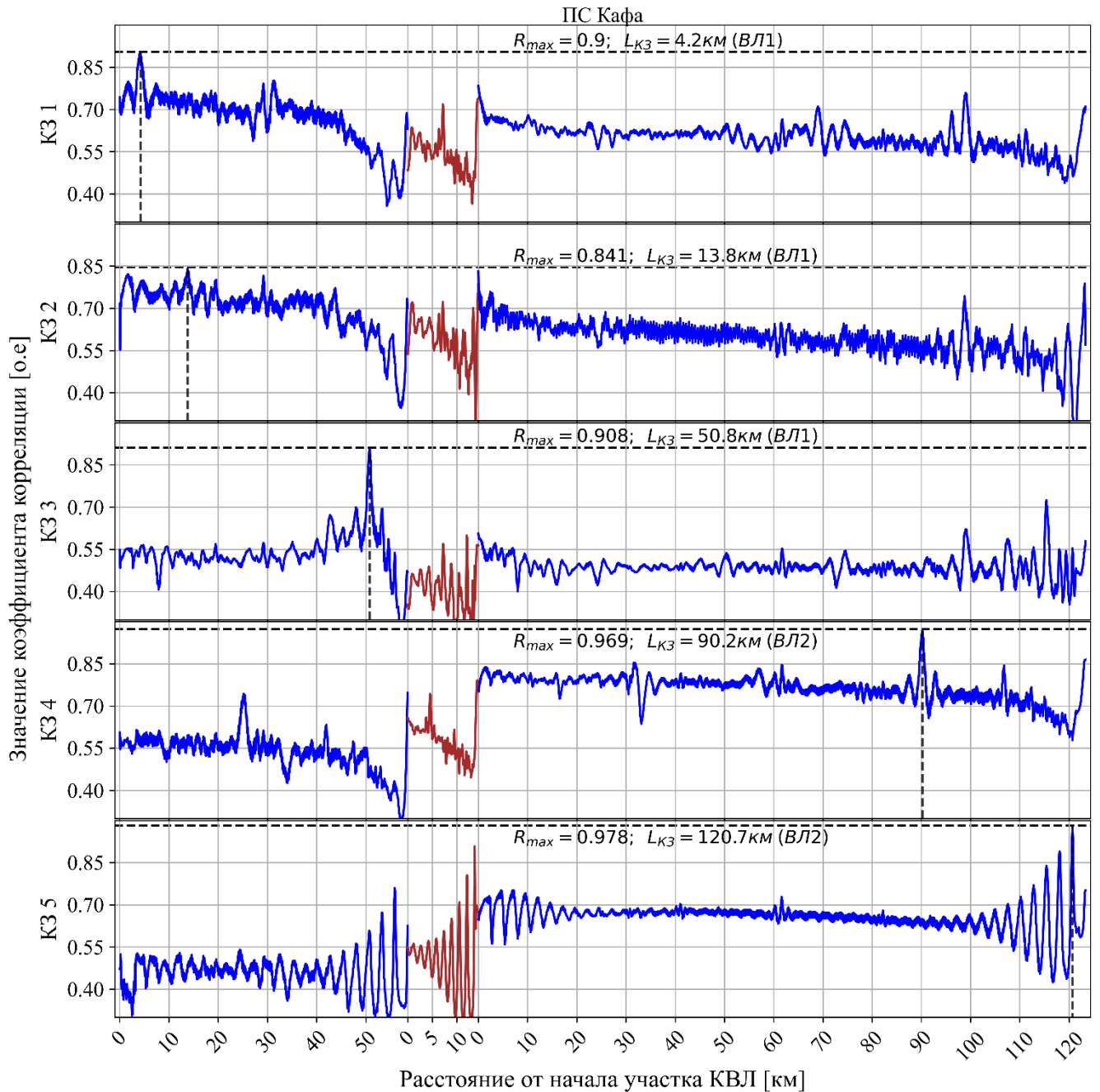


Рисунок 4.8 – Зависимость значений коэффициента корреляции от возможного места повреждения для каждого случая КЗ (со стороны ПС Кафа)

4.1.3 Анализ результатов полунатурных испытаний волновых способов АПВ и ОМП КВЛ

Как показано выше все алгоритмы верно определили поврежденный участок во всех случаях реальных КЗ. Соответственно во всех случаях КЗ каждый алгоритм не сформировал сигнал запрета АПВ КВЛ (все случаи КЗ приходятся на воздушные участки) и в соответствии с общей логикой принятия решения, предложенной в п. 4.2.1, сформирован результирующий разрешающий сигнал. Таким образом подтверждена успешность решения задачи АПВ КВЛ.

Далее оценим количественно результаты ОМП КВЛ. Но прежде того стоит отметить следующее. Во многих работах по теме ОМП, например [81], точность оценивается путем

сравнения результата дистанционного ОМП с результатами обхода ЛЭП. При этом сами результаты обхода ЛЭП могут быть неверными. Например, за место текущего зарегистрированного повреждения принято другое место, в котором наблюдаются следы какого-то иного повреждения и т.п. Даже если верно обнаружены следы реального места повреждения и определен номер ближайшей опоры или пролет ЛЭП, то неточные данные о длинах участков ЛЭП приведут к неточному определению расстояния до места повреждения по результатам обхода. Поэтому определение истинной точности конкретного результата дистанционного ОМП – на самом деле нетривиальная задача, являющаяся поводом дискуссий в научно-техническом сообществе.

В диссертационной работе одной из задач испытаний является определение алгоритмической погрешности ОМП, поэтому результаты работы алгоритмов ОМП КВЛ будут оцениваться относительно результатов ОМП, полученных при ручном анализе осциллограмм.

В таблице 4.1 представлены результаты ОМП КВЛ алгоритмов №1 (двусторонний замер времени) и №3 (корреляционный алгоритм) в сравнении с результатами ОМП, полученными при ручном анализе осциллограмм. Также в таблице 4.1 показаны ошибки ОМП соответствующих алгоритмов относительно предполагаемого расстояния до места повреждения (МП). Поскольку алгоритм №3 является односторонним, то приведены результаты работы этого алгоритма для двух концов КВЛ.

Таблица 4.1 – Результаты работы алгоритмов ОМП КВЛ

| Предполагаемое расстояние от начала поврежденного участка до МП на участке, км | Рассчитанное алгоритмом расстояние до МП, км | | | | | |
|--|--|---------------|-----------------|---------------|-----------------|---------------|
| | Алгоритм №1 | | Алгоритм №3 | | | |
| | | | ПС Тамань | | ПС Кафа | |
| | Значение, км | Ошибка, км | Значение, км | Ошибка, км | Значение, км | Ошибка, км |
| 4,3 (ВЛ1) | 5,079 | 0,779 | 4,2 | -0,1 | 4,2 | -0,1 |
| 13,9 (ВЛ1) | 13,633 | -0,267 | 13,8 | -0,1 | 13,8 | -0,1 |
| 50,9 (ВЛ1) | 50,813 | -0,087 | 50,7 | -0,2 | 50,8 | -0,1 |
| 90,3 (ВЛ2) | 89,979 | -0,321 | 90,4 | 0,1 | 90,2 | -0,1 |
| 120,7 (ВЛ2) | 120,695 | -0,005 | 120,4 | -0,3 | 120,7 | 0 |
| Средняя абсолютная ошибка | - | 0,292 | - | 0,16 | - | 0,08 |

Как видно по таблице 4.1 средняя погрешность алгоритма №1 больше средней погрешности алгоритма №3, что в основном связано с погрешностью определения точного времени прибытия фронта волны к месту измерения, что никак не влияет на корреляционный

алгоритм в соответствии с его принципом действия. Также может сказываться неучет в алгоритме №1 дополнительного времени распространения сигнала по вторичным цепям тока от места установки высоковольтного ТТ до места установки измерительного прибора, что рассмотрено, например, в [115]. Этот фактор также не влияет на работу корреляционного алгоритма. При этом можно видеть, что для первого случая (4,3 км) ошибка ОМП алгоритма №1 составляет около 800 м. Вероятно такая большая ошибка связана с увеличенной в момент записи сигналов погрешностью синхронизации времени между устройствами ВОМП, записавшими осциллограммы, поскольку начало фронта волн в этом случае было определено алгоритмом с минимальной погрешностью [145].

Оценим погрешность алгоритма расчета итоговой обобщенной оценки места повреждения, настройка которого рассмотрена в п. 4.1.1. В таблице 4.2 представлены результаты работы этого алгоритма.

Таблица 4.2 – Результаты работы алгоритма расчета итоговой обобщенной оценки места повреждения

| Предполагаемое расстояние от начала поврежденного участка до МП на участке, км | Итоговая обобщенная оценка МП, рассчитанная алгоритмом, км | | | |
|--|--|--------|----------|--------|
| | ПС Тамань | | ПС Кафа | |
| | значение | ошибка | значение | ошибка |
| 4,3 (ВЛ1) | 4,2 | -0,1 | 4,2 | -0,1 |
| 13,9 (ВЛ1) | 13,717 | -0,183 | 13,717 | -0,183 |
| 50,9 (ВЛ1) | 50,757 | -0,143 | 50,807 | -0,093 |
| 90,3 (ВЛ2) | 89,979 | -0,321 | 90,09 | -0,21 |
| 120,7 (ВЛ2) | 120,548 | -0,152 | 120,698 | -0,002 |
| Средняя абсолютная ошибка | - | 0,18 | - | 0,12 |

Как можно видеть по таблице 4.2 средняя абсолютная погрешность алгоритмов ОМП на ВЛ участке при использовании обобщенной оценки ОМП КВЛ составляет менее 200 м (длина пролета ВЛ).

Таким образом результаты полунатурных испытаний показали высокую эффективность разработанных алгоритмов как при решении задачи АПВ КВЛ, так и при решении задачи ОМП КВЛ.

4.2. Реализация способов автоматического повторного включения кабельно-воздушных ЛЭП, основанных на контроле волновых процессов, в опытном устройстве

Для реализации волновых способов АПВ и ОМП КВЛ, предложенных в главе 3, была инициирована разработка опытного устройства АПВ КВЛ. Это устройство реализует одновременно три алгоритма определения повреждённого участка КВЛ (два алгоритма позволяют одновременно реализовать ОМП), рассмотренные в главе 3, а также автоматику управления выключателем. Реализация одновременно трёх различных алгоритмов АПВ КВЛ (1. Алгоритм АПВ и ОМП КВЛ на основе двусторонних синхронизированных измерений времени прибытия фронта начальных волн; 2. Алгоритм АПВ КВЛ на основе двусторонних несинхронизированных измерений амплитуды фронта начальных волн; 3. Алгоритм АПВ и ОМП КВЛ на основе распознавания волновых портретов) необходима для взаимного резервирования работы алгоритмов. В этом случае при нормальной работе всей аппаратуры первый двусторонний алгоритм, основанный на синхронизированном измерении времени прихода волны резервирует работу новых, не опробованных на практике алгоритмов. В случае обнаружения какого-либо отказа аппаратуры синхронизации времени оценка повреждённого участка и места повреждения этим алгоритмом не учитывается, а используются только два других алгоритма. В случае какого-либо отказа аппаратуры передачи данных между подстанциями (полуккомплектами устройства), когда двусторонние алгоритмы не могут работать, используется только корреляционный алгоритм на основе односторонних измерений.

На момент написания диссертационной работы проект находится на этапе разработки программного обеспечения опытно-промышленного устройства. В этом пункте изложены ряд аспектов разработки устройства.

Поскольку различные реализуемые алгоритмы могут вычислять разные оценки поврежденного участка, необходима объединяющая логика формирования итоговой обобщенной оценки, которая представлена далее.

4.2.1 Логика принятия решения автоматического повторного включения кабельно-воздушных ЛЭП

Реализовать АПВ КВЛ возможно используя существующие микропроцессорные терминалы релейной защиты и автоматики с функциями автоматики управления выключателем совместно с устройством АПВ КВЛ. Как показано выше, различные алгоритмы позволяют получить как параметры, характеризующие поврежденный участок, так и расстояние до места повреждения. Оценки поврежденного участка, вычисляемые разными алгоритмами, можно представить в виде различных измерительных и пусковых органов, аналогично устройствам РЗА [146, 147]. Поэтому логика работы АПВ КВЛ должна предусматривать возможность

использования разных измерительных органов. Разработанная логика принятия решения о блокировании или разрешении АПВ КВЛ показана на рисунке 4.9.

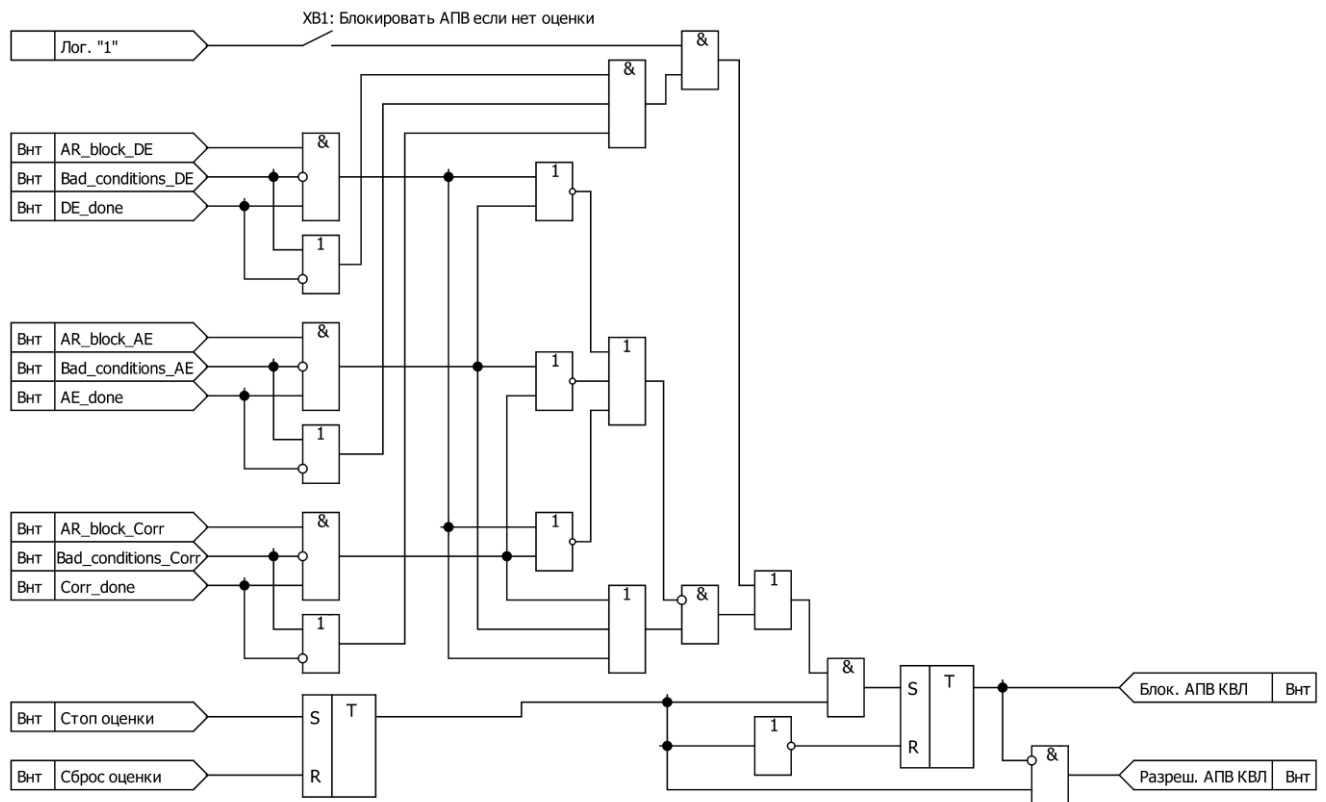


Рисунок 4.9 – Структурная схема логики формирования управляющих сигналов блокирования и разрешения АПВ КВЛ

Идея, положенная в основу логической схемы, состоит в следующем. Если хотя бы один из трех вышеуказанных алгоритмов определения поврежденного участка КВЛ сформировал сигнал запрета АПВ КВЛ, а два других алгоритма при этом не сформировали сигнала разрешения АПВ КВЛ, то будет сформирован итоговый сигнал запрета АПВ КВЛ. Иначе если определены условия отсутствия достоверной оценки места повреждения у всех трех алгоритмов и активирована уставка «Блокировать АПВ если нет оценки» (ключ *XB1* на схеме рисунка 4.9), то будет сформирован итоговый сигнал запрета АПВ КВЛ. В противном случае, если не произойдет ни один вариант формирования сигнала запрета АПВ КВЛ, будет сформирован сигнал разрешения АПВ КВЛ.

В логической схеме, изображенной на рисунке 4.9, используются англоязычные наименования логических сигналов в соответствии с описанием алгоритмов работы функций опытного устройства АПВ КВЛ, представленным в Приложении В. В таблице 4.3 представлена расшифровка этих наименований, а также описание всех остальных логических сигналов. Для удобства в таблице алгоритмом №1 называется двусторонний алгоритм оценки поврежденного участка и места повреждения на основе измерения значений времени прибытия волн по концам ЛЭП, алгоритмом №2 – двусторонний алгоритм оценки поврежденного участка на основе

измерения амплитуды фронта начальных волн по концам ЛЭП, а алгоритмом №3 – односторонний корреляционный алгоритм ОМП и АПВ КВЛ.

Таблица 4.3 – Смысловое содержание логических сигналов на рисунке 4.9

| Наименование логического сигнала | Смысловое содержание логического сигнала |
|----------------------------------|---|
| AR_block_DE | Запрет АПВ КВЛ от алгоритма №1. |
| Bad_conditions_DE | Определены плохие условия при вычислении оценки поврежденного участка алгоритмом №1, возможен промах алгоритма. |
| DE_done | Оценка поврежденного участка КВЛ алгоритмом №1 завершена. |
| AR_block_AE | Запрет АПВ КВЛ от алгоритма №2. |
| Bad_conditions_AE | Определены плохие условия при вычислении оценки поврежденного участка алгоритмом №2, возможен промах алгоритма. |
| AE_done | Оценка поврежденного участка КВЛ алгоритмом №2 завершена. |
| AR_block_corr | Запрет АПВ КВЛ от алгоритма №3. |
| Bad_conditions_Corr | Определены плохие условия при вычислении оценки поврежденного участка алгоритмом №3, возможен промах алгоритма. |
| Corr_done | Оценка поврежденного участка КВЛ алгоритмом №3 завершена. |
| Стоп оценки | Сигнал, формируемый на заданное время другой частью логической схемы устройства АПВ КВЛ по истечении заданного времени после обнаружения факта КЗ и сигнализирующий необходимость формирования итогового решения о блокировании или разрешении АПВ КВЛ. |
| Сброс оценки | Сигнал, формируемый на заданное время другой частью логической схемы устройства АПВ КВЛ по истечении заданного времени после формирования итогового решения о блокировании или разрешении АПВ КВЛ и сбрасывающий триггер в логической схеме. |
| Разреш. АПВ КВЛ | Сигнал, характеризующий разрешение АПВ КВЛ. |
| Блок. АПВ КВЛ | Сигнал, характеризующий запрет (блокировку) АПВ КВЛ. |

Разработанная структура логики формирования управляющих сигналов является расширяемой и позволяет использовать иные алгоритмы оценки волнового сигнала, позволяющие определить место повреждения или поврежденный участок КВЛ.

4.2.2 Функциональная структура устройства

Для реализации целей разработки устройство должно осуществлять измерение аналоговых сигналов токов и напряжений, приём и передачу дискретных сигналов и команд в

пределах ПС, приём сигналов синхронизации времени. Также устройство должно принимать данные с другого конца ЛЭП (с другого полукомплекта АПВ КВЛ) и передавать данные на другой конец ЛЭП. Помимо этого, устройство должно осуществлять ряд задач, которые присущи большинству микропроцессорным устройствам РЗА (осциллографирование, ведение журнала событий, отображение информации на человеко-машинном интерфейсе, приём команд оператора и прочее).

Учитывая вышеуказанные соображения была разработана функциональная схема устройства, изображённая на рисунках 4.10-4.12. При этом рисунки 4.10-4.11 отображают отдельные функциональные блоки обработки ВЧ сигналов и сигналов промышленной частоты (ПЧ) соответственно, которые на общей диаграмме (рисунок 4.12) выделены синей пунктирной линией. На рисунках 4.10-4.12 числами промаркированы следующие действия (функции) устройства:

1) Измерение трех фазных токов (при необходимости могут использоваться другие датчики для измерения фазных напряжений или линейных напряжений), а также измерение одного дополнительного сигнала, например, с ВЧ присоединения (фильтра присоединения);

2) Аппаратная фильтрация сигналов и аналого-цифровое преобразование (АЦП) с частотой дискретизации не менее 1 МГц;

3) Прием сигнала *GPS*/ГЛОНАСС для синхронизации времени;

4) Первый этап цифровой обработки сигналов: цифровая фильтрация и детектирование переходного процесса в реальном времени, запись заданной длительности сигналов в буфер;

5) Передача с сигналов на следующий этап обработки (в блок ЦОС) после детектирования;

6) Второй (основной) этап обработки сигналов:

- цифровая фильтрация;

- оценка точного времени начала переходного процесса (времени прихода волны);

- оценка амплитуды фронта волны, вычисление корреляции измеряемого сигнала с эталонными портретами.

- вычисление коэффициентов корреляции отфильтрованного сигнала с набором эталонных волновых портретов и оценка номера эталонного волнового портрета с наибольшим коэффициентом корреляции (оценка поврежденного участка и места повреждения).

Обработка на этом этапе осуществляется не в реальном времени, но ограничена по времени в связи с ограничением времени на принятие решения АПВ КВЛ;

7) Передача сигналов на запись и передача вычисленных (на этапе ЦОС) параметров в блок итоговой обработки;

8) Прием дискретных сигналов;

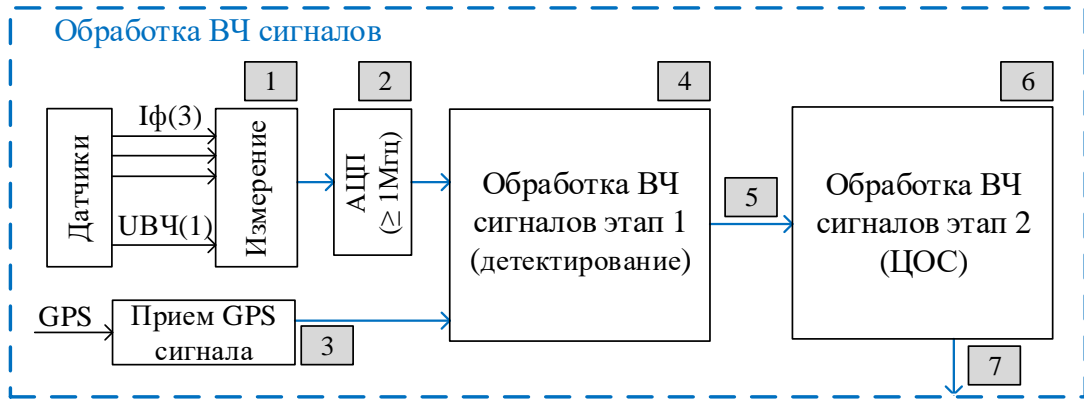


Рисунок 4.10 – Блок-схема функционального блока обработки ВЧ сигналов

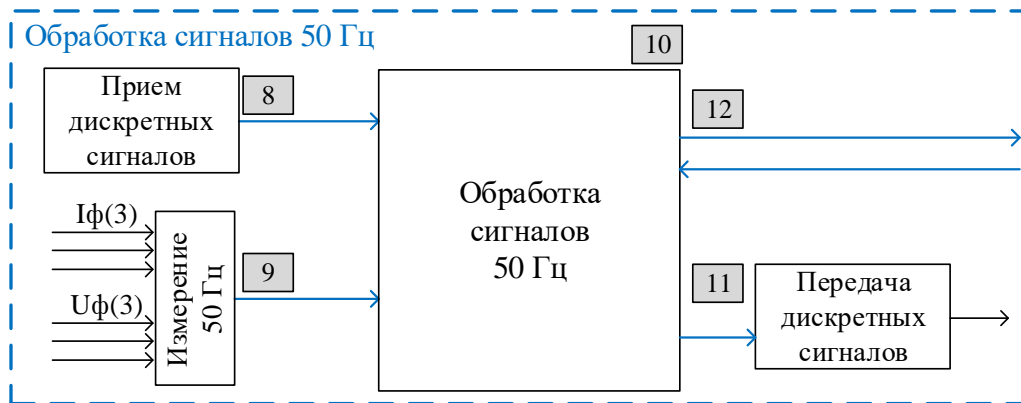


Рисунок 4.11 – Блок-схема функционального блока обработки сигналов ПЧ

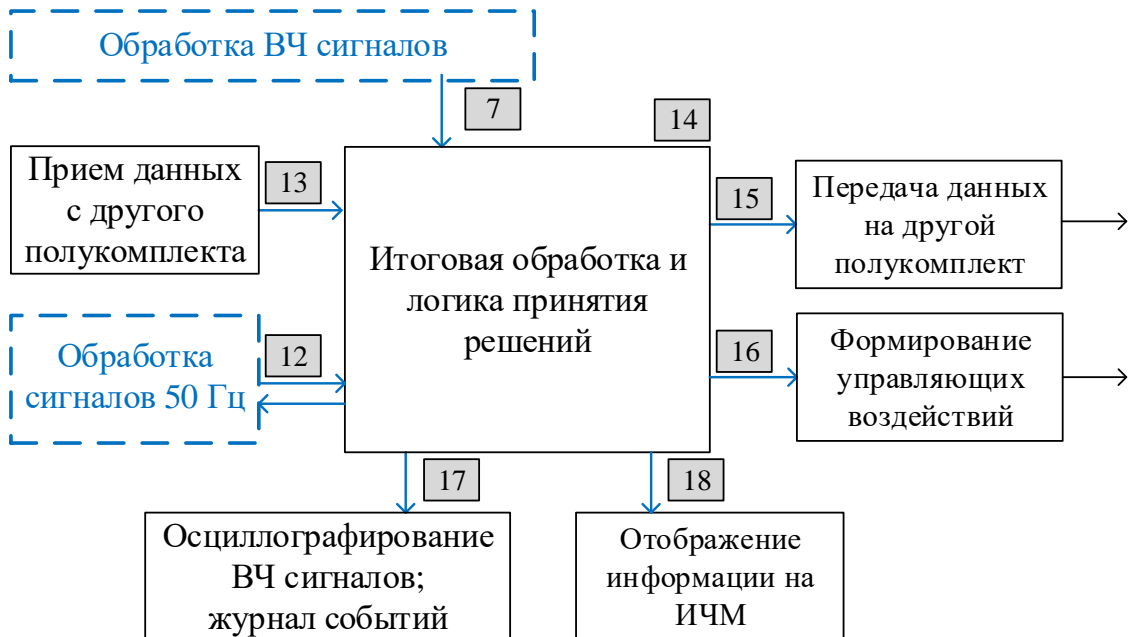


Рисунок 4.12 – Общая функциональная блок-схема

- 9) Измерение аналоговых сигналов промышленной частоты (3 тока, 3 напряжения);
- 10) Обработка сигналов промышленной частоты (пусковые органы (ПО) РЗА);
- 11) Передача дискретных сигналов (управление реле) на другие устройства ПС;

12) Передача дискретных сигналов и сигналов ПО РЗА в блок итоговой обработки, передача сигналов промышленной частоты на запись. Прием команд управления реле из блока итоговой обработки;

13) Прием данных с другого конца ЛЭП (с другого полукомплекта). Параметры: время, амплитуда и т.п.;

14) Заключительная обработка (сравнение параметров с уставками, обработка вычисленных параметров с разных полукомплектов в соответствии с двусторонними алгоритмами ОМП и АПВ КВЛ, возможно, взаимная обработка сигналов с разных полукомплектов), логика принятия решений;

15) Передача данных на другой конец ЛЭП. Параметры: время, амплитуда и пр.;

16) Формирование и передача команд управления на другие устройства ПС в виде дискретных физических сигналов путем замыкания соответствующих реле (осуществляется посредством блока обработки сигналов 50Гц через функцию 12 и 11) или путем передачи информации по выбранному протоколу цифровой связи, например, по протоколу *GOOSE* в соответствии с МЭК 61850;

17) Передача ВЧ сигналов в исходной форме (после АЦП, без обработки), вычисленных параметров (время прихода волны, поврежденный участок, место повреждения и пр.), дискретных сигналов, сигналов промышленной частоты и др. на запись;

18) Передача данных для отображения на интерфейс человек-машина (ИЧМ) (монитор).

4.2.3 Аппаратная структура устройства

По изложенной выше функциональной схеме устройства была разработана аппаратная структура, показанная на рисунках 4.13-4.14. На этих рисунках цифрами промаркированы функциональные узлы, соответствующие перечисленным выше функциям устройства.

С учетом разработанной структуры устройства можно выделить следующие основные вычислительные узлы:

1) Вычислительный узел обработки ВЧ сигналов синхронно с реальным временем. В качестве такого узла выступает программируемая логическая интегральная схема (ПЛИС), которая на схеме (рисунок 4.13) обозначена как «*FPGA*». Основные задачи узла: обнаружение начала переходного волнового процесса, запись измеряемых сигналов в течении заданного времени до и после обнаружения переходного процесса и передача на последующую обработку;

2) Вычислительный узел обработки ВЧ сигналов асинхронно с реальным временем. В качестве такого узла выбран микрокомпьютер *NVIDIA* с программно-аппаратной архитектурой параллельных вычислений, которая позволяет существенно увеличить вычислительную производительность благодаря использованию графических процессоров (128 параллельных процессов вычисления), который на схеме (рисунок 4.13) обозначен как «*DSP NVIDIA*».

Основная задача узла – цифровая обработка ВЧ сигналов в соответствии с разработанными алгоритмами, в том числе вычисление коэффициентов корреляции с множеством эталонных портретов;

3) Вычислительный узел связи между предыдущими двумя узлами. В качестве такого узла выступает микроконтроллер, обозначен на схеме (рисунок 4.13) как «микроконтроллер». Основная задача узла – согласование передачи сигналов между узлами, поддерживающими разные протоколы связи;

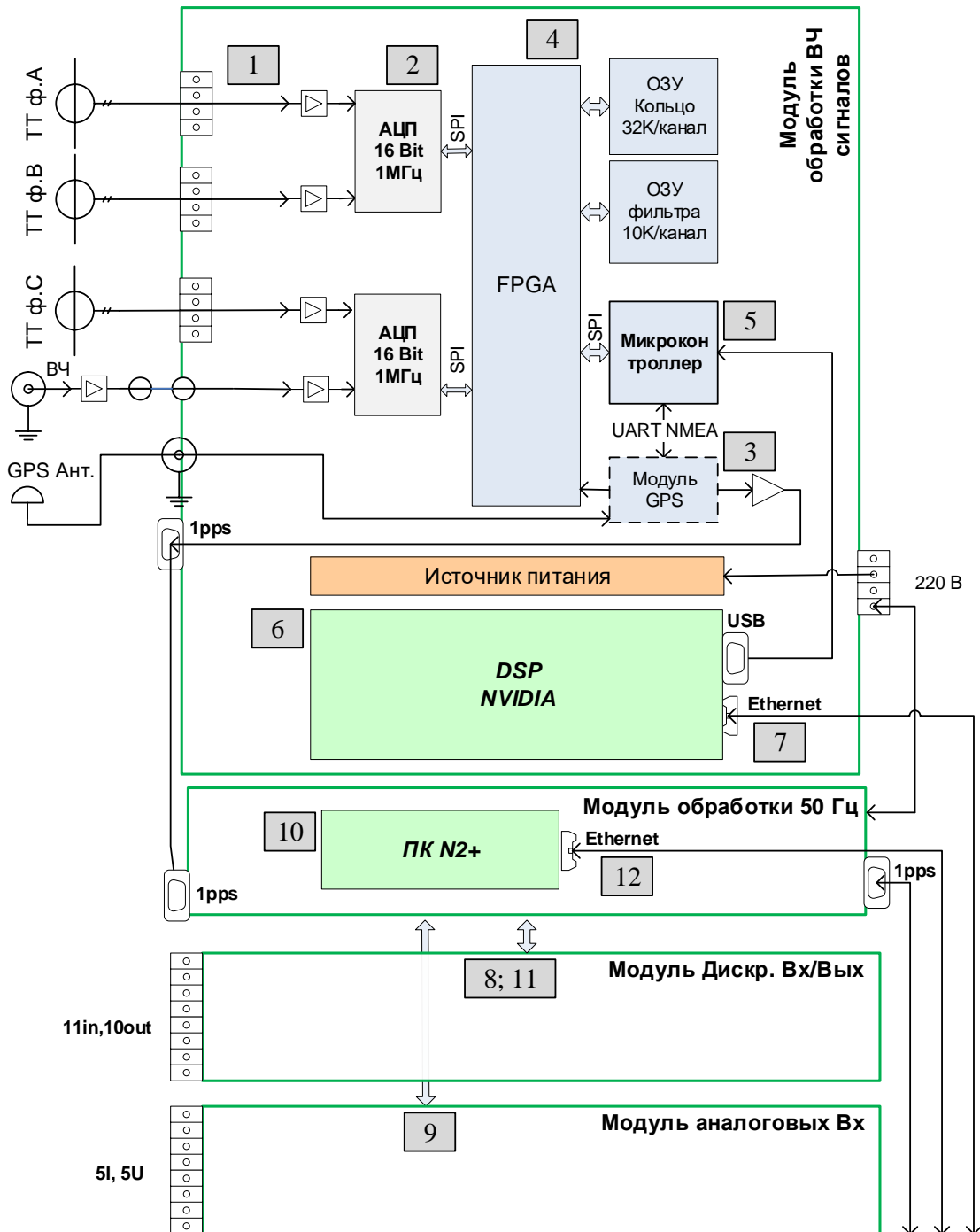


Рисунок 4.13 – Структурная схема опытного устройства АПВ КВЛ (часть 1)

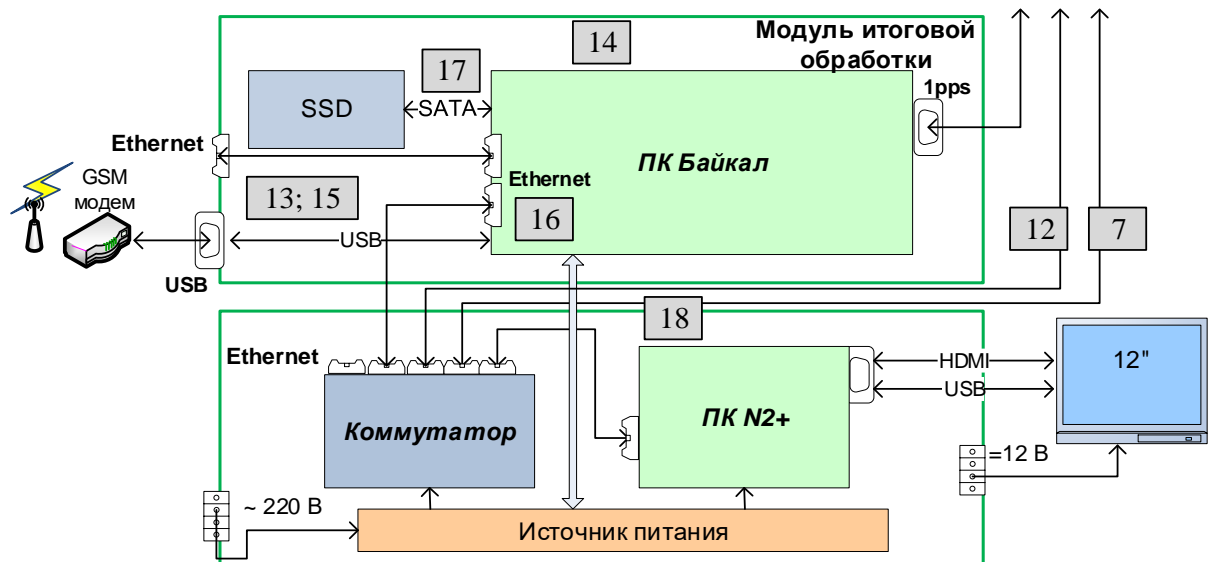


Рисунок 4.14 – Структурная схема опытного устройства АПВ КВЛ (часть 2)

4) Вычислительный узел обработки общих сигналов и принятия решений. В качестве такого узла выбран вычислительный модуль на базе российского процессора *Baikal-M*, который на схеме (рисунок 4.14) обозначен как «ПК Байкал». Основной задачей узла является реализация логики принятия решений (логическая схема). В ходе своей работы (приема и обработки логических сигналов от отдельных функциональных узлов) логическая схема формирует заданные логические сигналы, которые либо передаются на узел обработки сигналов ПЧ (в формате *GOOSE*), либо поступают в отдельные функции. При приеме определенных логических сигналов отдельные функции выполняют заданные действия;

5) Вычислительный узел обработки сигналов ПЧ. В качестве такого узла выбран микрокомпьютер *Odroid-N2+*, который на схеме (рисунок 4.13) обозначен как «ПК N2+». Основной задачей узла является прием дискретных и измерение аналоговых сигналов тока и напряжения ПЧ, формирование логических сигналов измерительных и пусковых органов ПЧ;

6) Вычислительный узел ИЧМ. В качестве такого узла выбран микрокомпьютер *Odroid-N2+*, который на схеме (рисунок 4.14) обозначен как «ПК N2+». Основной задачей узла является отображение заданной информации и предоставление локального интерфейса взаимодействия оператора с устройством.

Более подробно функции вычислительных узлов приведены в Приложении В.

Как можно видеть на рисунке 4.13 на вход АЦП устройства АПВ КВЛ поступают сигналы с датчиков тока (ТТ на рисунке 4.13). Эти ТТ могут отличаться от трансформаторов тока, устанавливаемых на плате модуля аналоговых входов ПЧ, поскольку предназначены для измерений в широком диапазоне частот. ТТ для измерений ВЧ сигналов могут располагаться как в корпусе самого устройства, так и быть вынесены вовне для установки в шкафу в зависимости от их типа. Поэтому выбор типа используемого в устройстве ТТ является важной задачей, от

которой во многом зависит качество измеряемого сигнала. В следующем пункте рассмотрены вопросы выбора и доэксплуатационных (производственных) испытаний ТТ для устройств, реализующих волновые методы.

4.3. Выбор измерительных трансформаторов, обеспечивающих необходимую передаточную характеристику для устройств, реализующих волновые методы

В этом пункте рассматриваются аспекты, связанные с испытанием датчиков тока устройств в условиях производственной лаборатории (отдел контроля качества и измерений).

Как показано в главе 2, частотная характеристика токовой измерительной цепи определяет качество измеряемого сигнала. При этом указанная цепь включает в себя не только высоковольтный ТТ и вторичные соединения (кабель, клеммные колодки и т.п.) [148], но и датчик тока, посредством которого устройство проводит измерение сигналов. Такой датчик тока необходим не только для того чтобы осуществить гальваническую развязку от вторичных цепей высоковольтных измерительных трансформаторов, но и для того чтобы преобразовать ток в низковольтное напряжение, уровень которого согласуется с диапазоном измерений АЦП устройства (например, $\pm 5\text{В}$).

Для измерительных устройств, использующих волновые методы, таких как ВОМП, необходимо проводить измерения в широком диапазоне частот с верхней граничной частотой в несколько сотен килогерц или больше. Обычно трансформаторы тока, в том числе ТТ в обычных терминалах РЗА, используются для измерений сигналов промышленной частоты, а также кратных гармоник до 1 кГц. Поэтому номенклатура ТТ, удовлетворяющих вышеизложенным требованиям, сильно ограничена.

При этом недостаточно просто выбрать ТТ по спецификации, заказать его и использовать в устройстве. Необходимо до установки устройства в эксплуатацию убедиться в том, что ТТ действительно позволяет качественно измерять сигнал в целевом диапазоне частот. Поэтому в этом пункте рассматриваются особенности измерения и оценки частотных характеристик трансформаторов тока разного типа. Так для проекта разработки опытного устройства АПВ КВЛ были приобретены пять разных ТТ с целью исследования их пригодности. Информация об этих ТТ указана в таблице 4.4.

Стоит отметить, что применение ТТ возможно не только при подключении устройства к токовым цепям ПС. В ряде работ по теме ВОМП рассматриваются варианты использования ТТ для измерения напряжения в электрической сети посредством подключения ТТ в цепь емкостного делителя напряжения, а также в цепи конденсатора связи (КС) и фильтра присоединения (ФП), используемые для ВЧ связи.

В работе [149] рассматривается система централизованного ВОМП, при которой

производится измерение напряжения на шинах ПС для обеспечения ВОМП сразу на нескольких ЛЭП. В этой работе представлены испытания нескольких ДТ, включая ДТ типа *RFCT* (№5 в таблице 4.4), при подключении их в цепь емкостного делителя напряжения высоковольтного ТН. В другой работе [150] изложен опыт регистрации волнового сигнала при различном подключении датчиков тока типа *RFCT* (№5 в таблице 4.4). В этой работе особо выделяется подключение датчиков к цепям ВЧ присоединения. Однако при таком способе подключения есть недостатки, связанные с тем, что нагрузка КС нелинейная из-за наличия разрядника, защищающего ФП и ВЧ кабель от перенапряжений. Появляются дополнительные сильные искажения фронтов волн при работе разрядника. Поэтому такой метод может использоваться только для метода АПВ и ОМП КВЛ, основанного на фиксации времени прибытия начальной волны к месту измерения. Для других методов волнового АПВ и ОМП КВЛ такое подключение нецелесообразно.

При подключении ТТ к цепям емкостного делителя или КС перед подачей сигнала с ТТ на АЦП устройства следует реализовать аналоговую сглаживающую фильтрацию (фильтр нижних частот) с учетом частоты дискретизации (f_d) устройства (например, частота среза фильтра выбирается равной $0,4 \cdot f_d$ или ниже) [151]. Это необходимо для уменьшения влияния возможных ВЧ шумов, поскольку ТТ типа *RFCT* и аналогичные имеют большой коэффициент передачи на частотах выше 1МГц. Применение подобных датчиков тока, но при подключении к токовым цепям отмечено в [152].

Таблица 4.4 – Параметры испытываемых ТТ

| № | Наименование; тип ТТ; производитель | Номинальный диапазон измерений: по току/ по частоте | Относительная цена |
|---|---|---|--------------------|
| 1 | ТТ11СУ-150А-2000-К/0; ТТ с сердечником; ООО «ВП «АИСТ» (РФ) | ≤ 238 А; 3Гц-100кГц | 8-11 у.е. |
| 2 | <i>OPCT16AL-50A/1V</i> ; ТТ с размыкаемым сердечником; « <i>Nanjing UP Electronic Technology Co., LTD</i> » (Китай) | ≤ 150 А; 50Гц-200кГц | 3-4 у.е. |
| 3 | АС1100-51/19; ТТ с сердечником; « <i>Talema Group LLC</i> » (Индия) | ≤ 250 А; 50Гц | 10-13 у.е. |
| 4 | ТТР32-2000-1,1мВ/А; воздушный ТТ (пояс Роговского); «ООО ВП АИСТ» (РФ) | ≤ 210 А; ≤ 200 кГц | 7-10 у.е. |
| 5 | <i>RFCT-7</i> ; датчик частичных разрядов с размыкаемым сердечником; ООО «Димрус» | ≤ 50 А; 150кГц-30МГц | 170 у.е. |

4.3.1 Программа испытаний ТТ

Для измерения частотных характеристик ТТ был разработан и собран стенд, блок-схема которого изображена на рисунке 4.14. Он включает генератор сигнала, усилитель мощности, осциллограф, нагрузочные резисторы для усилителя и испытуемого трансформатора тока, компьютер оператора, а также сетевое оборудование для организации локальной вычислительной сети.

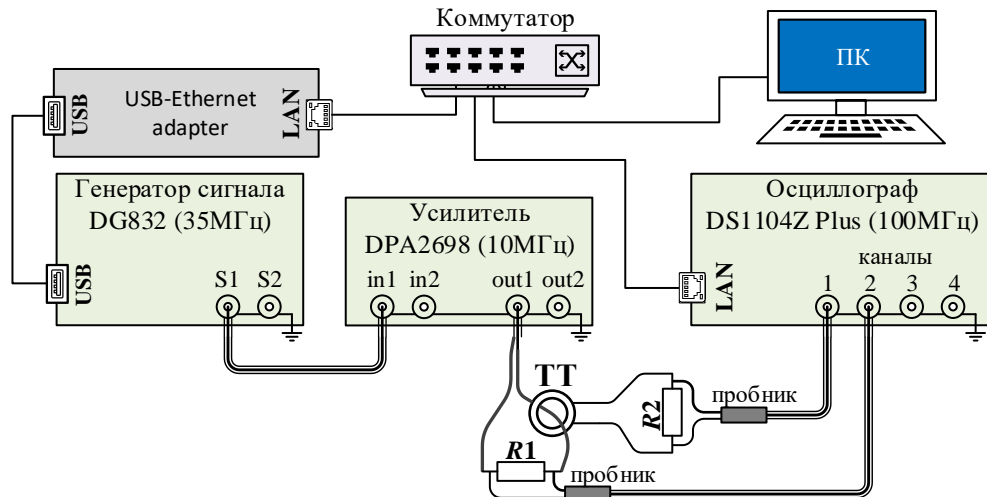


Рисунок 4.14 – Блок-схема стенда для измерения частотных характеристик ТТ

Используемый усилитель мощности, показанный на рисунке 4.14, способен без заметных искажений формы сигнала выдавать ток амплитудой до 0,4 А при нагрузке до 10 Ом (R_1 на рисунке 4.14). Для увеличения тока в первичной обмотке ТТ, например, до действующего значения 1 А, выполняется несколько витков через отверстие первичной обмотки ТТ. При этом длина проводов на выходе усилителя составляла несколько десятков сантиметров и поэтому в измеряемом диапазоне частот (до 1 МГц) можно рассматривать такую цепь как цепь с сосредоточенными параметрами. Сопротивление нагрузочного резистора, подключенного ко вторичной обмотке ТТ, (R_2 на рисунке 4.14) подбиралось исходя из его типа и номинальных параметров. Так для ТТ №1-3 (нумерация в соответствии с таблицей 4.2) использовались резисторы сопротивлением 100 Ом, для ТТ №4 – 2,7 кОм, а для ТТ №5 - 50 Ом.

Используемые измерительные приборы (генератор сигналов и осциллограф) поддерживают дистанционное управление посредством компьютера по стандарту *VISA* (*Virtual instrument software architecture* – архитектура программного обеспечения виртуальных приборов). Поэтому для автоматизации изложенного далее процесса измерения частотных характеристик использовался язык программирования *Python* и библиотека *PyVISA*, которая позволяет через различные интерфейсы связи (*USB*, *Ethernet* и пр.) обмениваться сообщениями с измерительными приборами посредством символьных команд в соответствии со стандартом

SCPI (Standard Commands for Programmable Instruments – стандартные команды для программируемых приборов).

Измерение частотных характеристик проводится следующим образом. Посредством компьютера оператора на выходе генератора сигналов задаётся синусоидальный сигнал с определенной амплитудой и частотой. Этот сигнал поступает на вход усилителя мощности, выход которого подключен двумя проводами к нагрузочному резистору ($R1$ на рис 4.14) через разъёмное соединение. При этом один из проводов пропускается через отверстие испытуемого ТТ, являясь таким образом первичной обмоткой ТТ, по которой протекает синусоидальный ток с амплитудой пропорциональной напряжению на выходе усилителя и той же частоты. Вторичная обмотка испытуемого ТТ подключена к другому нагрузочному резистору ($R2$ на рис 4.14). Напряжение на нагрузочных резисторах посредством измерительных щупов поступает на каналы осциллографа, который может измерять такие параметры как: амплитуда сигналов и фазовый сдвиг. Измеряемые параметры передаются на компьютер оператора.

Значение амплитуды напряжения на нагрузочном резисторе усилителя сравнивается с заданным значением и если разность больше допустимой погрешности, то корректируется значение напряжения на выходе генератора. Эта процедура повторяется пока не установится заданное напряжение (с учётом допустимой погрешности) на нагрузочном резисторе усилителя. Таким образом контролируется амплитуда тока первичной обмотки ТТ при которой измеряется частотная характеристика. После того как целевое значение установлено, на компьютер оператора передаются значение амплитуд сигналов в каналах осциллографа, их фазовый сдвиг, а также сами измеряемые сигналы, где они сохраняются для дальнейшего анализа. Указанные действия повторяются для каждого значения частоты из заданного диапазона значений.

На компьютере оператора измеренные значения амплитуд сигналов в первичной и вторичной обмотках ТТ на разных частотах используются для построения АЧХ, а значения фазового сдвига - для построения ФЧХ. Дополнительно по записанным формам сигналов оцениваются их нелинейные искажения (гармонические составляющие) на разных частотах, посредством вычисления коэффициента гармоник по выражению 4.1.

$$K_G = \frac{1}{A_1} \cdot \sqrt{\sum_{k=2}^{N/2} (A_k)^2} \quad (4.1)$$

где A_1 – амплитуда основной гармоники сигнала на заданной частоте; A_k – амплитуда k -ой гармонической составляющей сигнала.

Помимо частотных характеристик аналогичным образом регистрируется отклик ТТ на ступенчатый сигнал с целью оценки формы переходной характеристики.

4.3.2 Измерение и оценка частотных характеристик ТТ

В соответствии с изложенной выше программой испытаний были измерены частотные характеристики испытуемых ТТ, параметры которых указаны в таблице. При этом в ходе испытаний выяснилось, что у всех ТТ кроме ТТ №5 измеряемая частотная характеристика в той или иной степени зависит от расположения провода, выполняющего роль первичной обмотки, внутри отверстия ТТ (по центру или у краев). Поэтому частотные характеристики для одного и того же типа ТТ снимались несколько раз при различном расположении провода с целью определить степень этой зависимости. Помимо этого, для каждого типа ТТ испытанием подвергались по три образца, исключением является только тип ТТ №5, для которого использовался только один образец для испытаний.

Измеренные частотные характеристики изображены на рисунках 4.15-4.24, где на графиках а,б,в изображены соответственно АЧХ, ФЧХ и зависимость коэффициента гармоник от частоты сигнала. Линиями разных цветов показаны характеристики разных образцов ТТ одного типа. Для ТТ №1-2 и №4 построено по два рисунка, отображающих различия при разном расположении провода первичной обмотки в отверстии ТТ. Для ТТ №3 построено три рисунка, поскольку ТТ этого типа показали гораздо лучшие результаты, чем стоило ожидать. А для ТТ №5 построен один рисунок, поскольку зависимости частотной характеристики от расположения провода в отверстии первичной обмотки ТТ не было обнаружено.

Стоит отметить что поскольку в ходе текущих испытаний нет задачи оценить коэффициент трансформации разных ТТ, то АЧХ на рисунках нормированы по значению на частоте 10кГц (АЧХ ТТ №5 нормирована по значению на частоте 150кГц) для лучшей сравнимости характеристик ТТ.

Анализ построенных характеристик приведен после рисунков.

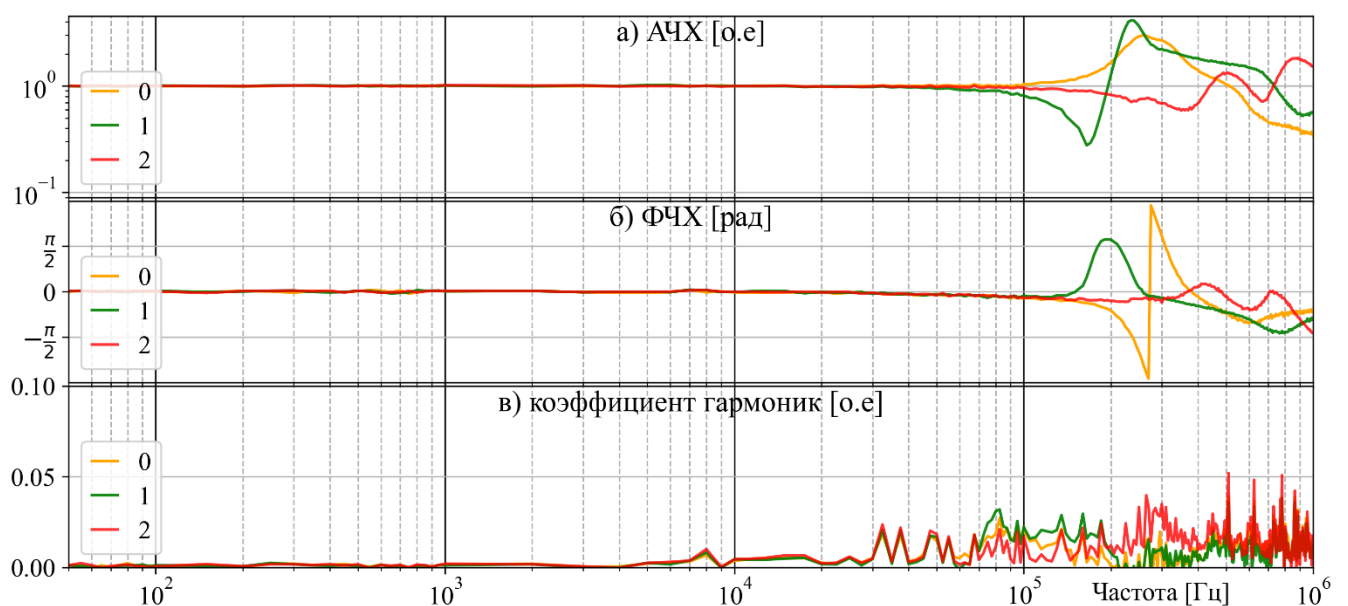


Рисунок 4.15 – Частотные характеристики образцов ТТ №1 (ТТ11СУ) (часть 1/2)

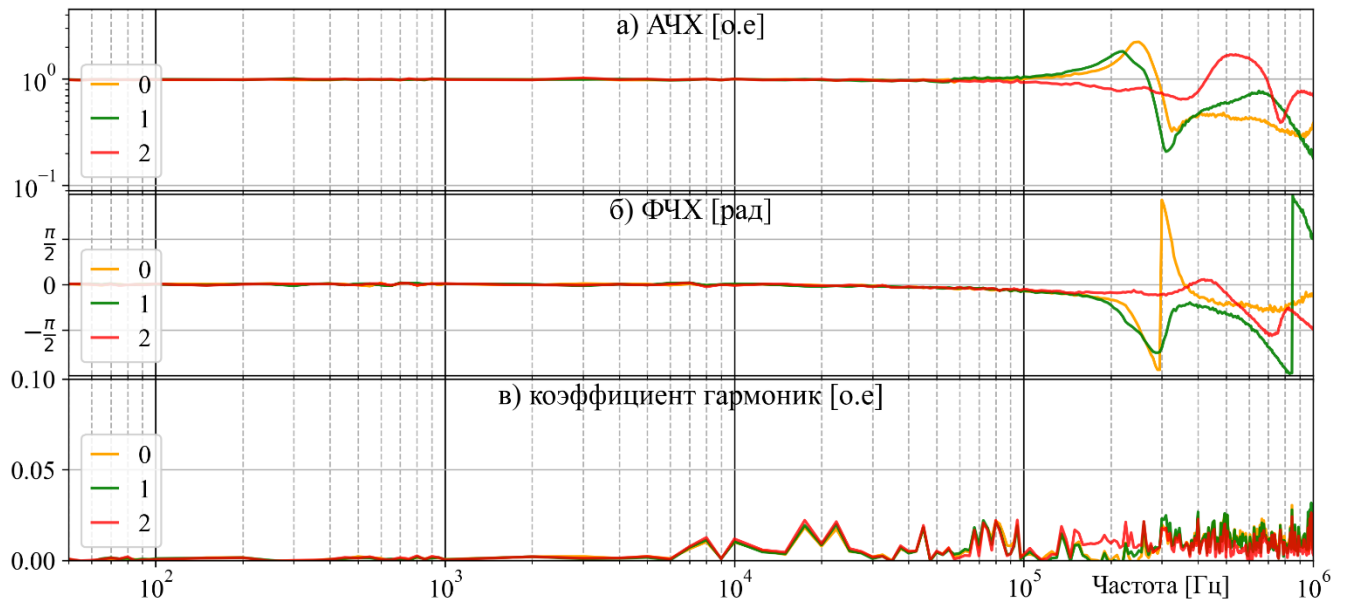


Рисунок 4.16 – Частотные характеристики образцов ТТ №1 (ТТ11СУ) (часть 2/2)

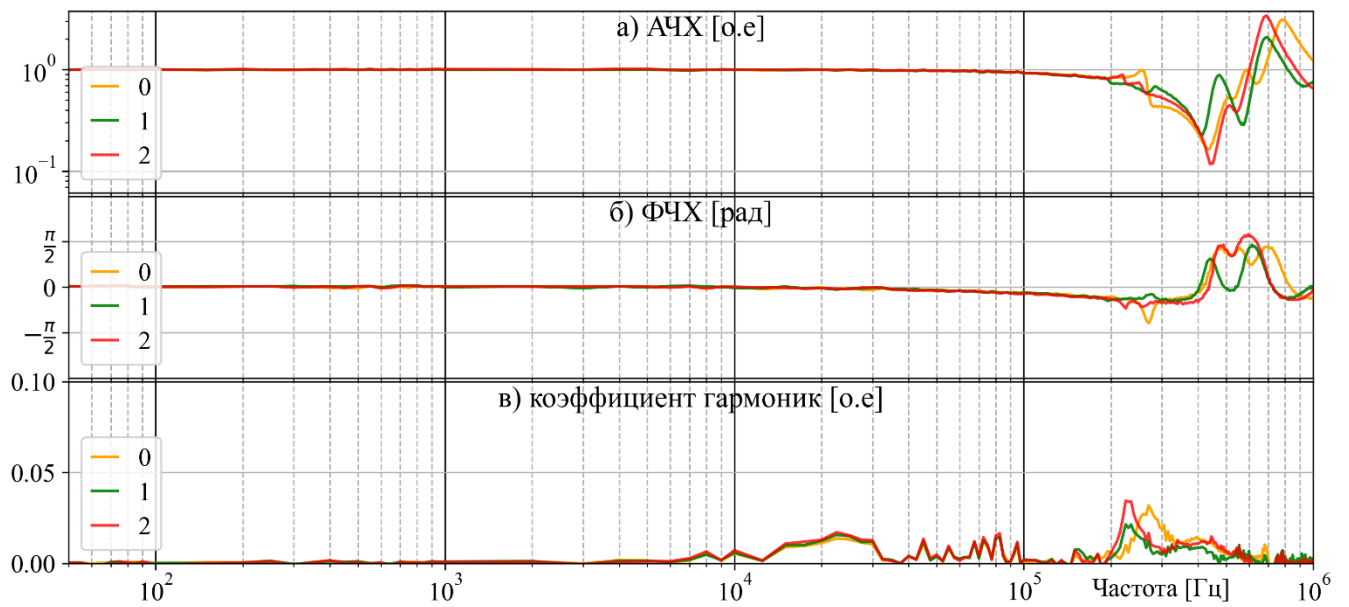


Рисунок 4.17 – Частотные характеристики образцов ТТ №2 (ОРСТ16АL) (часть 1/2)

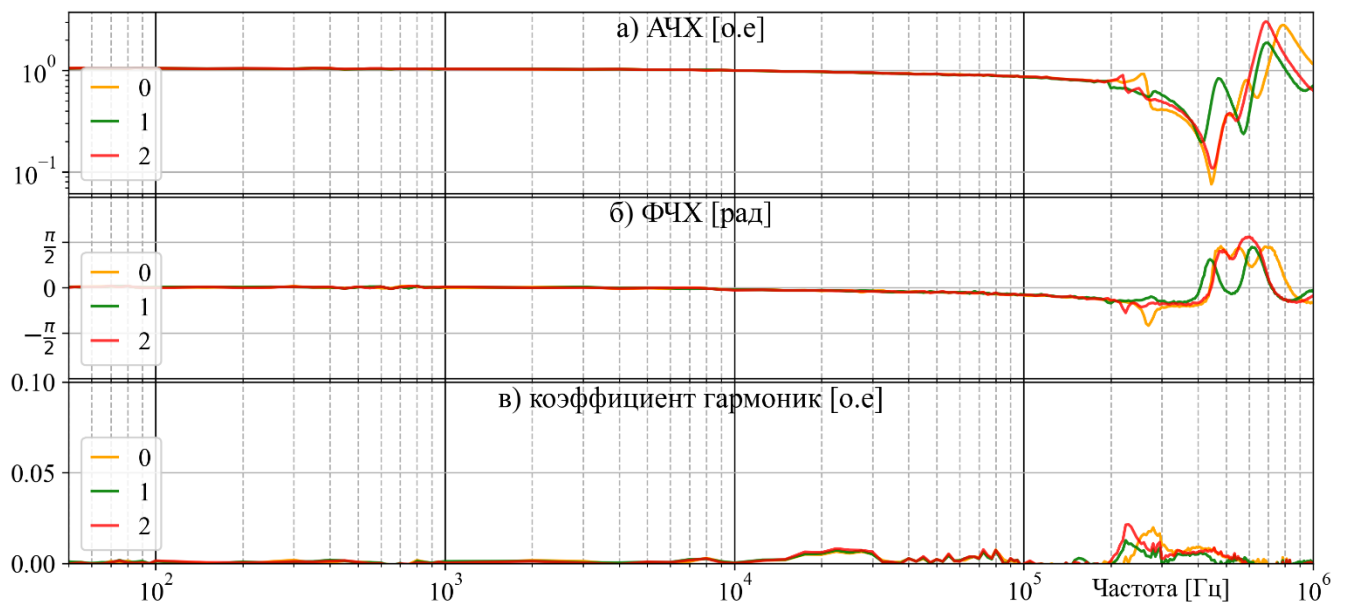


Рисунок 4.18 – Частотные характеристики образцов ТТ №2 (ОРСТ16АL) (часть 2/2)

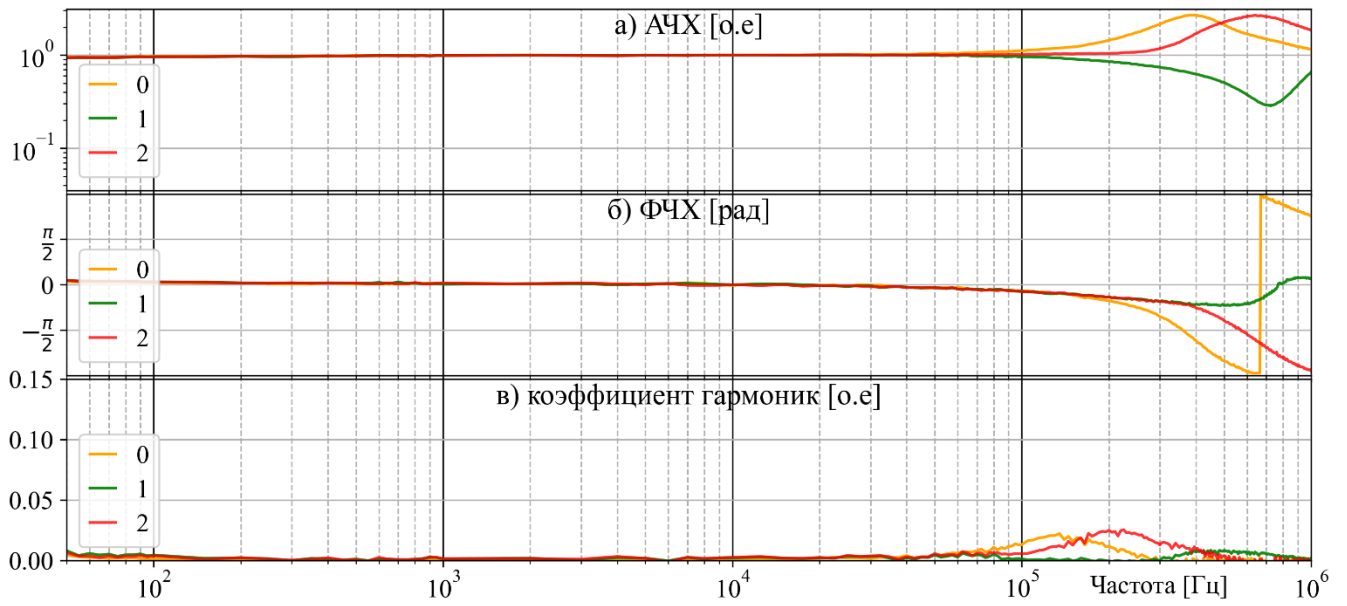


Рисунок 4.19 – Частотные характеристики образцов ТТ №3 (АС1100) (часть 1/3)

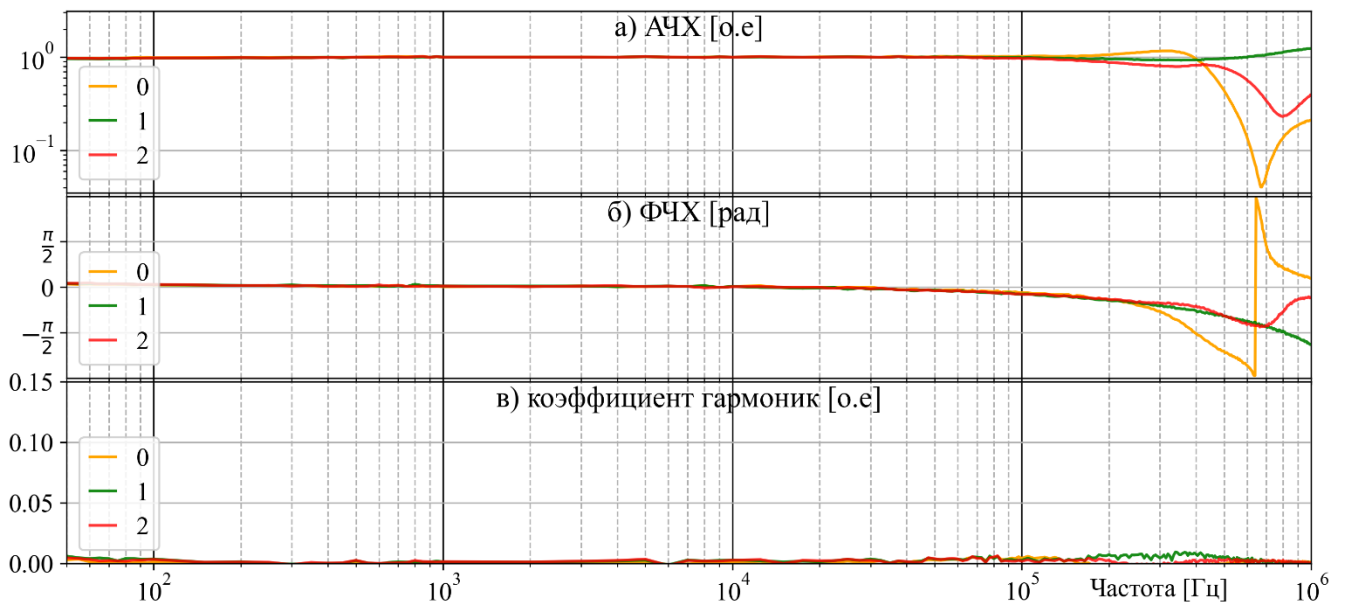


Рисунок 4.20 – Частотные характеристики образцов ТТ №3 (АС1100) (часть 2/3)

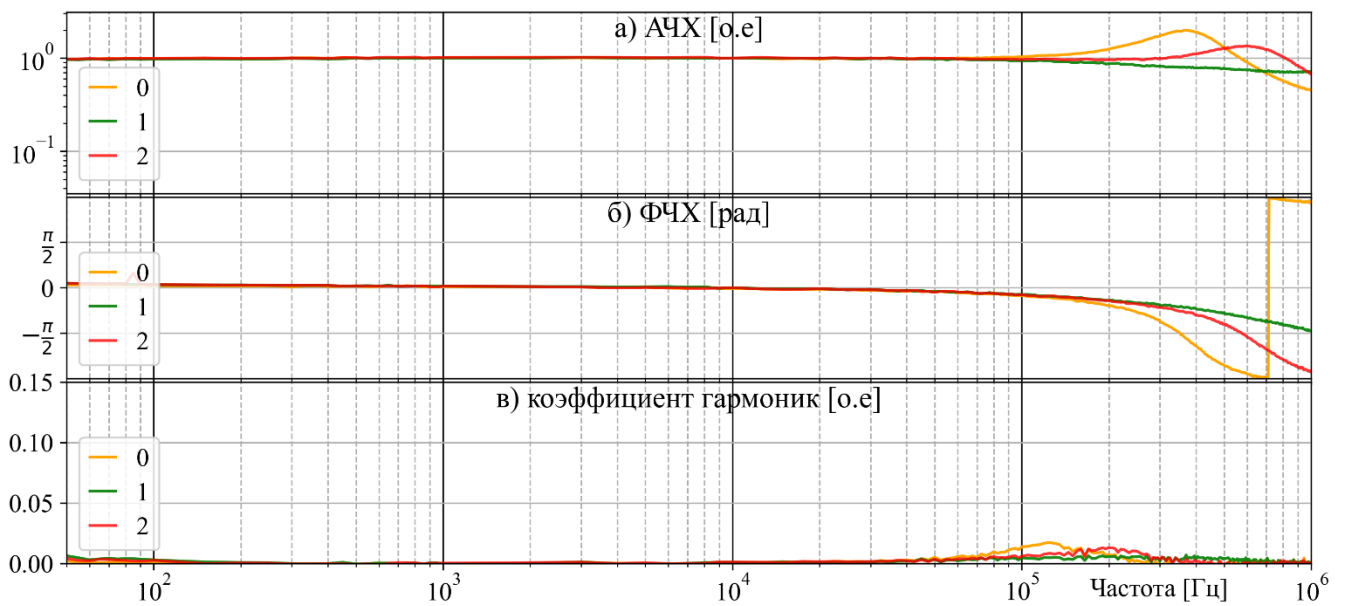


Рисунок 4.21 – Частотные характеристики образцов ТТ №3 (АС1100) (часть 3/3)

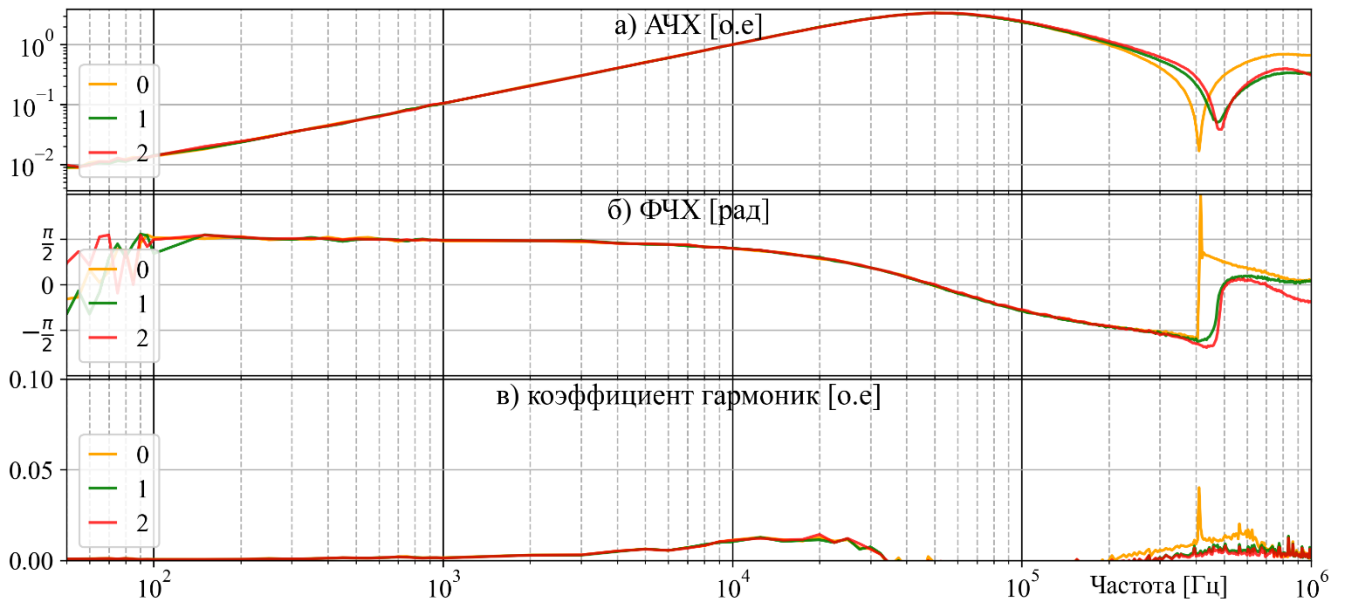


Рисунок 4.22 – Частотные характеристики образцов ТТ №4 (ТТР32) (часть 1/2)

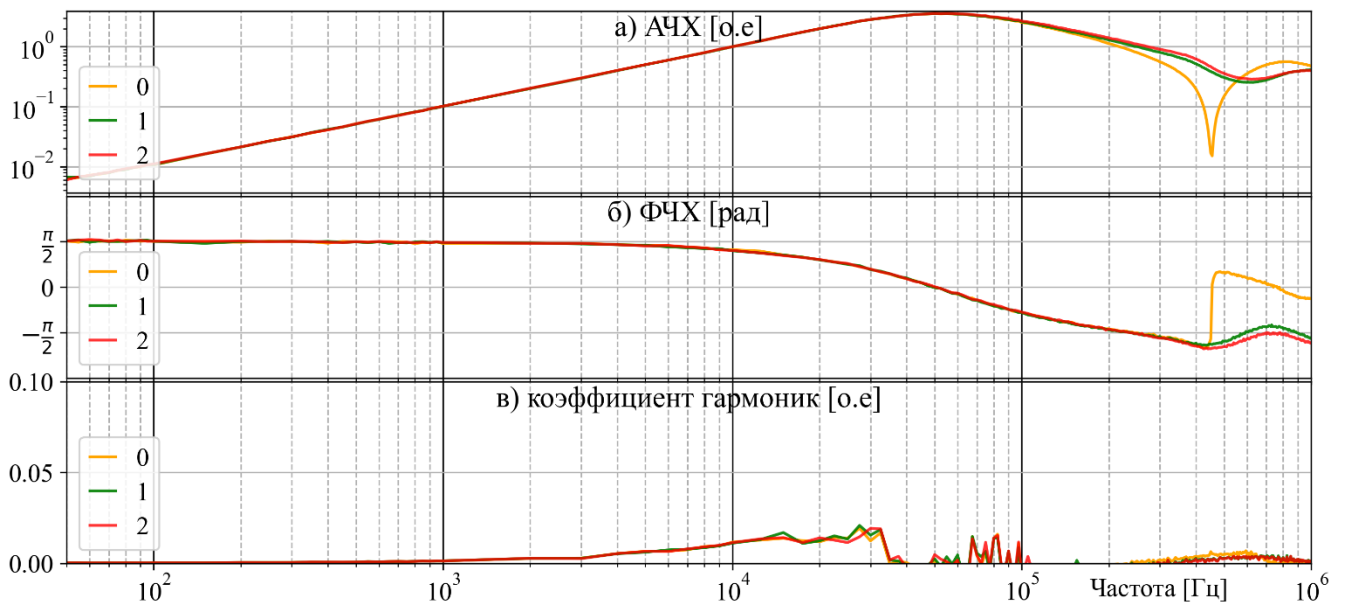


Рисунок 4.23 – Частотные характеристики образцов ТТ №4 (ТТР32) (часть 2/2)

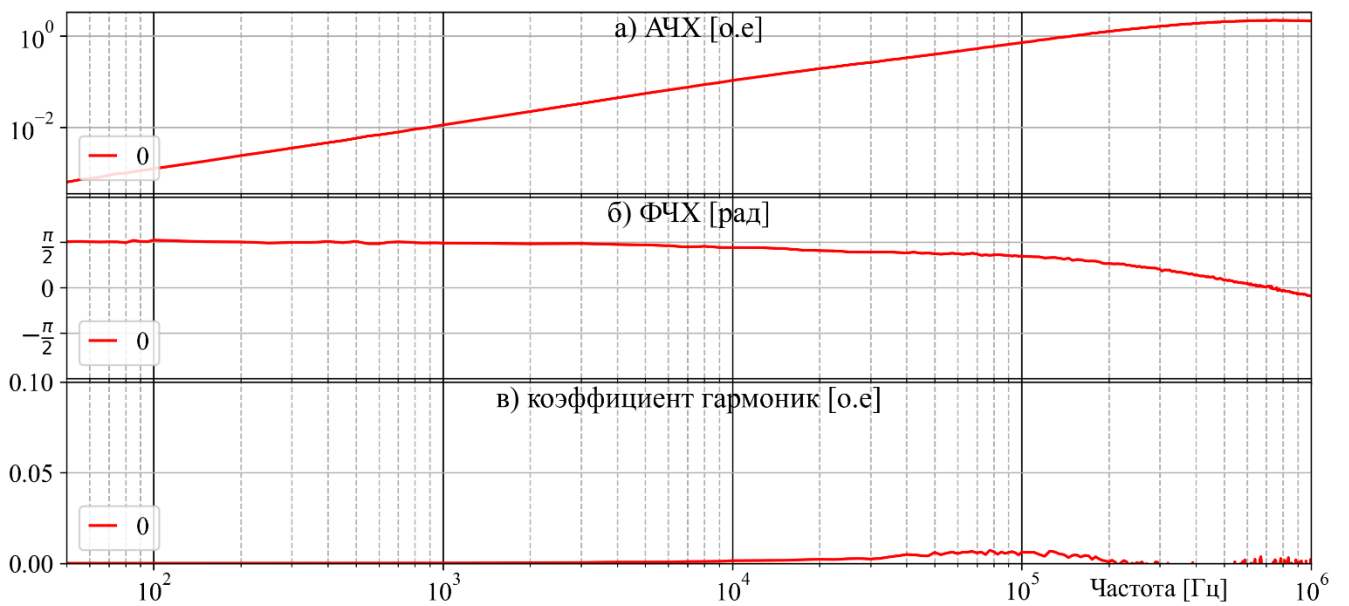


Рисунок 4.24 – Частотные характеристики образца ТТ №5 (RFCT-7)

Анализируя частотные характеристики на рисунках можно сделать следующие выводы.

Образцы ТТ №1 продемонстрировали сильную зависимость от расположения провода первичной обмотки, что проявляется в сдвиге резонансных пиков АЧХ у некоторых образцов более чем на 100 кГц и в целом в изменении формы АЧХ и ФЧХ. Также у этих образцов обнаруживаются нелинейные искажения в широком диапазоне частот выше 100 кГц. В целом же испытания образцов этого типа ТТ подтверждают заявленный диапазон измерений по частоте (до 100кГц). При этом у одного из трех образцов полоса пропускания шире и доходит до 200 кГц.

Образцы ТТ №2 показали гораздо меньшую зависимость частотных характеристик от расположения провода, а заявленный производителем диапазон измерений по частоте (до 300кГц) подтверждается измерениями. При этом наблюдались незначительные нелинейные искажения сигналов на некоторых частотах.

Образцы ТТ №3 показали неожиданно хорошие результаты измерений. Несмотря на сильную зависимость частотных характеристик от расположения провода первичной обмотки, все образцы имеют линейные АЧХ и ФЧХ в диапазоне частот до 100 кГц. А при определенном фиксированном расположении провода эффективный диапазон измерений по частоте у некоторых образцов достигает 1 МГц. Это означает, что если заранее в лабораторных условиях определить наиболее эффективное расположение провода первичной обмотки и зафиксировать его в этом положении, можно обеспечить частотный диапазон измерений вплоть до 1МГц.

Типы ТТ №4-5 по своему устройству имеют отличные от остальных частотные характеристики, сигнал на выходе этих датчиков тока является производной функцией от входного сигнала и чем выше частота, тем сильнее коэффициент передачи. Поэтому эти ТТ оказывают фильтрующее воздействие на измеряемый сигнал, ослабляя низкие частоты и усиливая высокие. Так ТТ №4 по результатам измерений обнаруживают практическую возможность измерения сигналов в диапазоне частот от 10 до 200 кГц при использовании дополнительной фильтрации для компенсации нелинейности АЧХ и ФЧХ. При этом наблюдается зависимость частотных характеристик от расположения провода на частотах выше 200 кГц. А для ТТ №5 диапазон частот эффективных измерений, как и заявлено, начинается на частоте около 150 кГц и выше.

На рисунках 4.25-4.29 изображены переходные характеристики испытуемых образцов ТТ, зарегистрированных при подаче на их первичную обмотку ступенчатого сигнала. Если провести анализ изображенных графиков, то подтверждаются выводы, сделанные по частотным характеристикам. Для ТТ, у которых полоса пропускания шире, переходная функция быстрее достигает установившегося значения, а, следовательно, короче импульсная характеристика. Что применительно к задаче волнового ОМП (в том числе ОМП и АПВ КВЛ) означает возможность различать более близко расположенные фронты волн в сигналах.

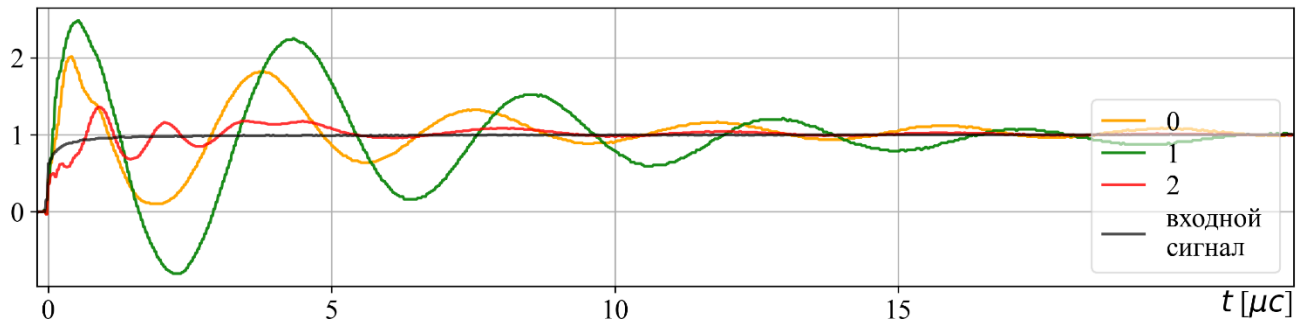


Рисунок 4.25 – Переходная характеристика образцов ТТ №1 (ТТ11СУ)

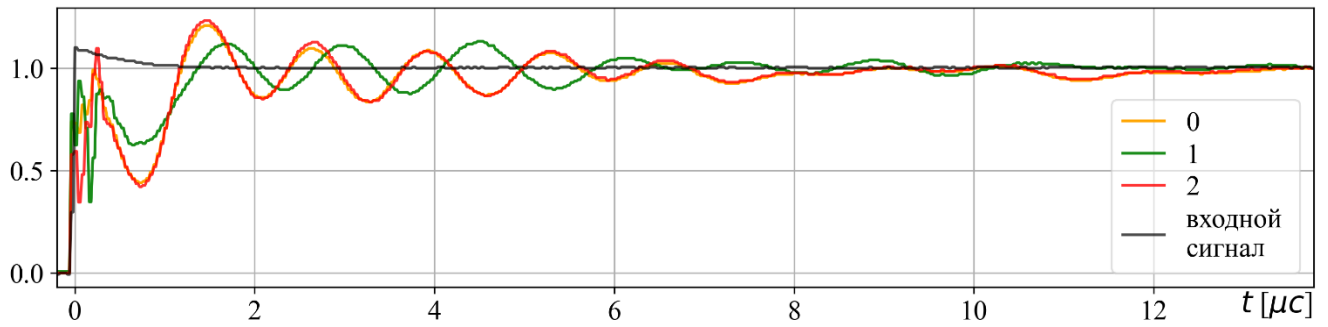


Рисунок 4.26 – Переходная характеристика образцов ТТ №2 (OPCT16AL)

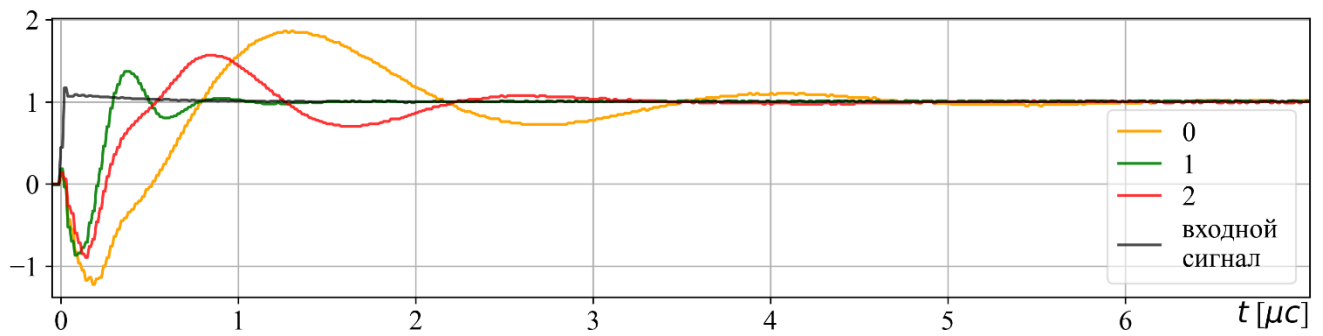


Рисунок 4.27 – Переходная характеристика образцов ТТ №3 (AC1100)

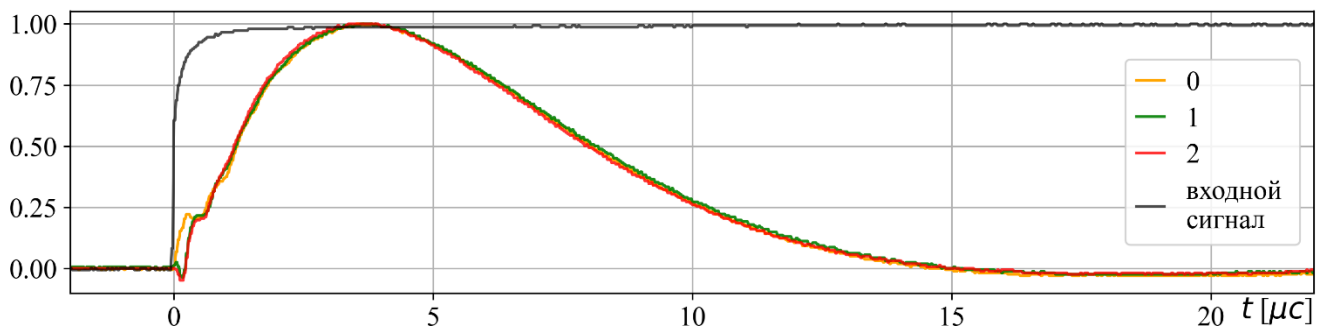


Рисунок 4.28 – Переходная характеристика образцов ТТ №4 (TTP32)

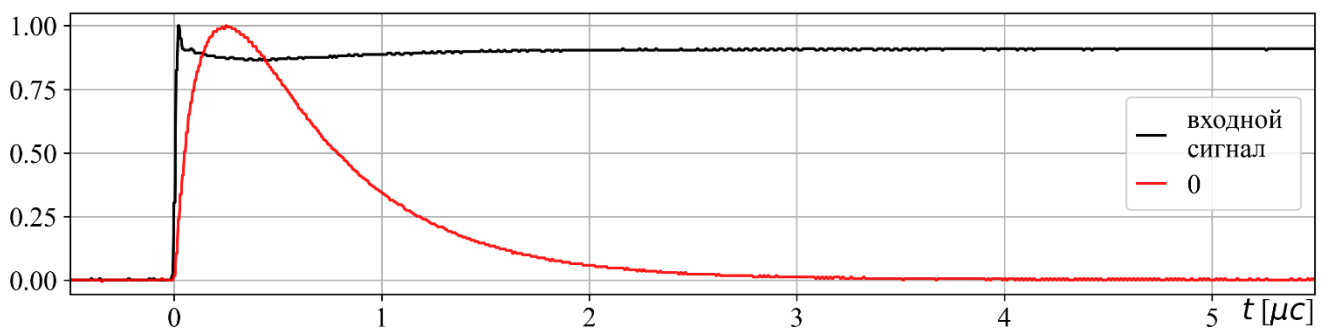


Рисунок 4.29 – Переходная характеристика образца ТТ №5 (RFCT-7)

Проведённые испытания показали возможность использования обычных ТТ в устройствах, в которых реализуются волновые алгоритмы. При этом необходимо проводить отбор ТТ до их использования в устройствах, поскольку разные образцы ТТ одного типа могут иметь совершенно разные частотные характеристики. Использование же дифференцирующих датчиков тока, таких как испытуемые ТТ №4 и №5 целесообразно только в случае, когда необходимо при небольшом разрешении АЦП устройства по амплитуде регистрировать высокочастотные составляющие в сигналах как на малых, так и на больших токах промышленной частоты, поскольку эти типы ТТ подавляют низкие частоты.

Стоит отметить что частотные характеристики, изображенные ранее на рисунках 4.15-4.24, возможно вычислить и с использованием переходных функций, изображённых на рисунках 4.25-4.29, подобно тому как это производилось в главе 2 для модельного и реального сигналов. Однако из-за ограничений по вертикальному разрешению осциллографа, которое даже для относительно дорогих моделей зачастую ограничено 8 битами на диапазон измерений, полученная таким образом частотная характеристика будет несколько искажена [153]. Тем не менее для целей отбора ТТ на производстве такой вариант вполне допустим и позволяет ускорить процесс измерений.

При этом для того чтобы получить аналогичное разрешение по частоте, необходимо использовать относительно большое окно данных в 20 мс, что при частоте дискретизации осциллографа, например 250 МГц, означает количество выборок в сигналах 5 миллионов. Тем не менее современные цифровые осциллографы имеют достаточную для этого память, а современные компьютеры достаточную вычислительную мощность для достаточно быстрого вычисления ДПФ таких сигналов.

В дальнейшем целесообразно оценить подобным образом большее количество ТТ различных производителей, которые рассчитаны на измерение сигналов промышленной частоты и не рассчитаны на измерение ВЧ сигналов. Поскольку как выяснилось в ходе испытаний подобные ТТ вполне возможно могут обладать широкой полосой пропускания.

4.4. Выводы по главе

1. Проведены полунатурные испытания разработанных способов АПВ и ОМП КВЛ с использованием сигналов реальных осциллограмм пяти случаев КЗ на КВЛ 220кВ Тамань-Кафа. Рассмотрен процесс задания настроек разработанных алгоритмов АПВ и ОМП КВЛ на примере настроек алгоритмов для КВЛ 220кВ Тамань-Кафа I цепь.

2. Предлагаемый подход определения поврежденного участка и места повреждения, основанный на использовании корреляционных функций, при моделировании показал хорошие результаты работы, причем погрешность алгоритма определения места повреждения,

основанного на вычислении корреляции, в общем случае составляет шаг моделирования повреждения при составлении эталонных портретов. Испытания двусторонних методов АПВ КВЛ также показало хорошие результаты, при этом зона блокирования АПВ на воздушных участках вблизи ВЛ-КЛ перехода составляет до нескольких сотен метров.

3. Таким образом результаты испытаний показали высокую эффективность разработанных алгоритмов. Оценка поврежденного участка производится правильно с высокой степенью достоверности, а оценка расстояния до места повреждения производится со средней погрешностью около 150 м.

4. Были рассмотрены вопросы практической реализации разработанных способов АПВ и ОМП КВЛ. Предложен программно-аппаратный комплекс опытного устройства АПВ и ОМП КВЛ, реализующий одновременно три алгоритма определения повреждённого участка КВЛ (два алгоритма позволяют одновременно реализовать ОМП), а также автоматику управления выключателем. Для повышения надежности оценки поврежденного участка КВЛ и предотвращения АПВ при повреждении на кабельном участке используется логика объединения результатов работы сразу нескольких алгоритмов определения поврежденного участка, что необходимо для взаимного резервирования работы различных способов.

5. Обосновано, что выбор типа используемого в устройстве ТТ является важной задачей, от которой во многом зависит качество измеряемого сигнала. Продемонстрирован метод испытания ТТ на предмет их пригодности для использования в устройствах, использующих волновые методы, посредством измерения и оценки частотных характеристик.

6. Проведённые испытания показали возможность использования обычных ТТ в устройствах, в которых реализуются волновые алгоритмы. При этом необходимо проводить отбор ТТ до их использования в устройствах, поскольку разные образцы ТТ одного типа могут иметь совершенно разные частотные характеристики.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Реализуемые на практике алгоритмы АПВ воздушных ЛЭП неэффективны на КВЛ, так как могут приводить к значительным повреждениям и дорогостоящему ремонту кабельной части. Для эффективного АПВ высоковольтных КВЛ необходимо достоверно определить на каком из участков (воздушном или кабельном) произошло повреждение, т.е. реализовать селективное АПВ.

2. Предложена классификация способов селективного АПВ КВЛ по принципу действия, выполнен сопоставительный анализ технических решений. Показано, что существующие дифференциальные способы селективного АПВ КВЛ обладают недостатками, снижающими их эффективность. Основные недостатки связаны прежде всего с необходимостью установки дополнительного оборудования как на ПС, так и в месте кабельно-воздушного перехода, организации специального канала связи. Дифференциальные способы АПВ КВЛ целесообразно использовать при конфигурациях КВЛ «КЛ-ВЛ» и «КЛ-ВЛ-КЛ» с кабельными участками относительно небольшой длины при заходе на распределительное устройство ПС. Для конфигураций КВЛ, при которых кабельные участки отстоят от ПС, а также с кабельными заходами на ПС значительной длины (несколько сотен метров и более) и где переходный пункт ВЛ-КЛ находится вне территории ПС применение дифференциальных методов нецелесообразно, за исключением отдельных частных случаев слишком сложной конфигурации КВЛ, когда дистанционные методы могут быть малоэффективны.

3. Дистанционные пассивные методы АПВ КВЛ целесообразно применять в большинстве вариантов конфигураций КВЛ. В случае относительно коротких КЛ участков отдельные пассивные дистанционные методы АПВ КВЛ могут быть неэффективными, поэтому перспективно совмещение нескольких способов, использующих различные информативные признаки волнового процесса. Обоснована актуальность разработки и реализации новых дистанционных методов АПВ КВЛ на основе цифровой обработки волновых сигналов токов и напряжений. Развитие волновых методов АПВ и ОМП КВЛ позволяет в дальнейшем использовать алгоритмы оценки сигналов для развития перспективных волновых устройств РЗА.

4. Проведены исследования волновых переходных процессов на имитационных моделях КВЛ различной конфигурации. Произведена оценка влияния факторов разного рода на волновой процесс и, как следствие, на волновые портреты линии. Показано, что повреждения на разных участках КВЛ существенно отличаются волновыми параметрами токов и напряжений. При этом большую часть факторов, влияющих на волновой портрет, возможно учесть при составлении модели конкретного объекта.

5. Рассмотрен процесс определения волновых параметров КВЛ, а также разработки и валидации имитационной модели КВЛ с использованием сигналов реальных осциллограмм,

записанных с высокой частотой дискретизации, на примере КВЛ 220кВ Тамань-Кафа I цепь. Рассмотрен процесс косвенного вычисления частотных характеристик токовых измерительных цепей на ПС (ТТ со вторичными цепями) по реальному и модельному сигналам. Эти характеристики затем учитываются в модельных сигналах для повышения соответствия реальным сигналам. Разработанная имитационная модель КВЛ отличается высокой достоверностью (наибольший коэффициент корреляции модельных и реальных сигналов составил 0,977). Построены кросскорреляционные карты для модели реальной КВЛ, показывающие уникальность волновых портретов каждого места КЗ вдоль всей длины КВЛ.

6. Разработан метод двустороннего АПВ КВЛ, использующий несинхронизированные измерения и упрощенную обработку волновых сигналов, позволяющий определить поврежденный участок КВЛ и заблокировать АПВ при КЗ на КЛ. Основными требованиями к устройству, реализующему предлагаемый способ АПВ КВЛ, являются применение АЦП с высокой частотой дискретизации (не менее 1 МГц) и наличие канала связи между ПС по концам ЛЭП. При этом не требуется точная синхронизация времени между полуккомплектами устройства, в отличие от существующих устройств двустороннего волнового ОМП.

7. Предложен метод двустороннего АПВ и ОМП КВЛ, использующий синхронизированные измерения, позволяющий определить поврежденный участок и место повреждения КВЛ и заблокировать АПВ при КЗ на КЛ. Основные требования к устройству, реализующему этот способ АПВ КВЛ, такие же как для предыдущего способа, а также необходимо наличие высокоточной синхронизации времени между устройствами.

8. Разработан метод одностороннего АПВ и ОМП КВЛ, основанный на распознавании волновых портретов. Волновые портреты представляют собой высокочастотные составляющие переходного процесса, зарегистрированные на одном из концов ЛЭП на определенном временном промежутке и характеризующие повреждение линии. Разработанный алгоритм распознавания волновых портретов состоит в вычислении коэффициентов корреляции замеренного и обработанного заданным образом сигнала с эталонными портретами, полученными путем имитационного моделирования. Разработанные методы АПВ и ОМП применимы для КВЛ любой конфигурации.

9. Проведен анализ особенностей фильтрации высокочастотных составляющих электромагнитного волнового процесса при повреждениях ЛЭП. Рассмотрено применение методов фильтрации, позволяющих компенсировать искажения сигналов тока и напряжения.

10. Проведены полунатурные испытания разработанных способов АПВ и ОМП КВЛ с использованием сигналов реальных осциллограмм пяти случаев КЗ на КВЛ 220кВ Тамань-Кафа. Рассмотрен процесс задания настроек разработанных алгоритмов АПВ и ОМП КВЛ на примере настроек алгоритмов для КВЛ 220кВ Тамань-Кафа I цепь. Предлагаемый подход определения

поврежденного участка и места повреждения, основанный на использовании корреляционных функций, при моделировании показал хорошие результаты работы, причем погрешность алгоритма определения места повреждения, основанного на вычислении корреляции, в общем случае составляет шаг моделирования повреждения при составлении эталонных портретов. Испытания двусторонних методов АПВ КВЛ также показало хорошие результаты, при этом зона блокирования АПВ на воздушных участках вблизи ВЛ-КЛ перехода составляет до нескольких сотен метров. Таким образом результаты испытаний показали высокую эффективность разработанных алгоритмов. Оценка поврежденного участка производится правильно с высокой степенью достоверности, а оценка расстояния до места повреждения производится со средней погрешностью менее 200 м (длина пролета ЛЭП).

11. Рассмотрены особенности практической реализации разработанных способов АПВ и ОМП КВЛ. Предложен программно-аппаратный комплекс опытного устройства АПВ и ОМП КВЛ, реализующий одновременно три алгоритма определения повреждённого участка КВЛ (два алгоритма позволяют одновременно реализовать ОМП), а также автоматику управления выключателем. Для повышения надежности оценки поврежденного участка КВЛ и предотвращения АПВ при повреждении на кабельном участке разработана логика объединения результатов работы сразу нескольких алгоритмов определения поврежденного участка, что необходимо для взаимного резервирования работы различных способов.

12. Продемонстрирован метод испытания ТТ на предмет их пригодности для использования в устройствах, использующих волновые методы, посредством измерения и оценки частотных характеристик. Проведённые испытания показали возможность использования обычных ТТ в устройствах, в которых реализуются волновые алгоритмы. Обоснована необходимость проведения отбора трансформаторов тока при производстве устройств АВП КВЛ и разработана методика проведения испытаний. Введение контроля необходимо из-за неодинаковых частотных характеристик образцов трансформаторов тока одного типа.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

- АПВ – автоматическое повторное включение;
АЦП – аналого-цифровое преобразование;
АЧХ – амплитудно-частотная характеристика;
ВЛ – воздушная линия;
ВОЛС – волоконно-оптическая линия связи;
ВОМП – волновое определение места повреждения;
ВЧ – высокочастотный;
ДФФ – дискретное преобразование Фурье;
ДТ – датчик тока;
ДФ – дифференцирующий фильтр;
ИЧМ – интерфейс человек-машина;
КВЛ – кабельно-воздушная линия электропередачи;
КЗ – короткое замыкание;
КИХ – конечная импульсная характеристика;
КЛ – кабельная линия;
КРУЭ - комплектное распределительное устройство с элегазовой изоляцией;
КС – конденсатор связи;
ЛЭП – линия электропередачи;
МП – место повреждения;
ОМП – определение места повреждения;
ОПН – ограничитель перенапряжения;
ПАР – параметры аварийного режима;
ПЛИС – программируемая логическая интегральная схема;
ПО – пусковой орган;
ПП – переходной пункт;
ПС – подстанция;
ПЧ – промышленная частота;
ПУЭ – правила устройства электроустановок;
РЗА – релейная защита и автоматика;
РУ – распределительное устройство;
РФФИ – Российский фонд фундаментальных исследований;
СФ – сглаживающий фильтр;
ТН – трансформатор напряжения;
ТТ – трансформатор тока;

ФВЧ – фильтр верхних частот;

ФП – фильтр присоединения;

ФЧХ – фазо-частотная характеристика;

ЦОС – цифровая обработка сигнала;

ЭВМ – электронно-вычислительная машина;

ЭТК – электротехнический комплекс.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богорад, А.М. Автоматическое повторное включение в энергосистемах / А.М. Богорад, Ю.Г. Назаров. – М.: «Энергия», 1969. – 336 с. : ил.
2. Беркович, М.А. Основы автоматики энергосистем / М.А. Беркович, А.Н. Комаров, В.А. Семенов. – М.: Энергоиздат, 1981. – 432 с. : ил.
3. Голубев, М.Л. Автоматическое повторное включение в распределительных сетях / М.Л. Голубев. – М.: Энергоиздат, 1982. – 96 с., ил.
4. Овчинников, В.В. Автоматическое повторное включение / В.В. Овчинников. – М.: НТФ "Энергопрогресс", 2001. – 108 с.: ил. – [Библиотечка электротехника, приложение к журналу "Энергетик"; Вып. 2(26)].
5. CIGRE Working Group B5.23. Short Circuit Protection of Circuits with Mixed Conductor Technologies in Transmission Networks: CIGRE technical brochure № 587. – 2014. – 241 p.
6. Халитов, В. Высоковольтные кабельные линии: новые приоритеты. Обзор итогов 47-й сессии СИГРЭ / В. Халитов, Д. Пасынков // Новости ЭлектроТехники. – 2019. – № 2(116). – С. 50-52.
7. Халитов, В. Кабельные линии 6–500 кВ. Повышение надежности кабелей, проложенных в трубах / В. Халитов // Новости ЭлектроТехники. – 2019. – № 4(118)–5(119). – с. 76-78.
8. Правила устройства электроустановок (ПУЭ). Издание 6-е и 7-е (утв. Приказом Минэнерго России от 08.07.2002. № 204).
9. Положение ПАО «Россети» «О единой технической политике в электросетевом комплексе». Утверждено Советом Директоров ПАО «Россети» (протокол от 08.11.2019 № 378).
10. СТО 56947007-29.240.10.248-2017 Нормы технологического проектирования подстанций переменного тока с высшим напряжением 35-750 кВ (НТП ПС). Утвержден и введен в действие: Приказом ПАО «ФСК ЕЭС» от 25.08.2017 № 343.
11. Методические указания по применению в ПАО «Россети Московский регион» основных технических решений по эксплуатации, реконструкции и новому строительству электросетевых объектов. Утверждены приказом ПАО «Россети Московский регион» от 26.05.2022 № 545 (в редакции приказов от 04.07.2022 № 711, от 15.07.2022 № 771).
12. Дмитриев, М. Высоковольтные линии с однофазными кабелями. Защита от перенапряжений / М. Дмитриев // Новости ЭлектроТехники. – 2016. – № 6(102). – С. 38-41.
13. Дмитриев, М. Кабельно-воздушные линии 35-500 кВ. Требования к заземлению переходных опор / М. Дмитриев // Новости ЭлектроТехники. – 2017. – № 1(103). – С. 2-5.

14. Бурлаков, Е. Переходные процессы и перенапряжения в однофазных кабельных линиях высокого напряжения / Е. Бурлаков, Г. Евдокунин, А. Карпов, Д. Шатилов // *Электротехника: сетевой электронный научный журнал*. – 2017. – Т. 4, № 1. – С. 3-9.
15. Вычегжанин, В.В. Обзор мирового опыта строительства переходных пунктов кабельно-воздушных линий высокого напряжения / В.В. Вычегжанин, Я.В. Ткачук, М.В. Дмитриев, М.С. Ермошина // *Электроэнергия. Передача и распределение*. –2018. –№5(50). – С. 74-82.
16. Ермошина, М. Кабельно-воздушные линии 35–110 кВ. Обеспечение коммутаций на переходных пунктах / М. Ермошина, М. Александрова, С. Глинский // *Новости ЭлектроТехники*. – 2019. – № 2(116). – С. 54-56.
17. Патент № 2739911 Российская Федерация, МПК E04H 12/00 (2020.08), H02G 7/00 (2020.08). Цифровой переходный пункт с контрольным оборудованием : № 2020108242 : заявл. 25.02.2020 : опубл. 29.12.2020 / Ермошина М.С., Вычегжанин В.В., Ткачук Я.В., Сильверстов С.М.. – 13 с. : ил.
18. Пушкарский, Д. А. Устройства автоматического повторного включения кабельно-воздушных линий электропередачи в мегаполисах ПАО "МОЭСК" / Д.А. Пушкарский, А.В. Смирнов, М.Г. Линт // *Электроэнергия. Передача и распределение*. – 2019. – № 2(53). – С. 68-74.
19. Kulikov, A.L. Methods for the implementation of automatic reclosing on combined overhead and underground cable power lines 110-500 kV / Kulikov A.L., Pelevin P., Loskutov A. [et al.] // *Przeglad Elektrotechniczny*. –2022. –No. 7. – P. 52-57.
20. Патент № 033001 Испания, МПК G01R 33/032 (2006.01), 15/24 (2006.01). Optical system for identifying faults in mixed power transmission lines : № PCT/ES2013/070621 : заявл. 04.09.2013 : опубл. 12.03.2015 / Gallastegi Uriarte Andoni, Sanchez Lekue Aritz. – 49 с. : ил.
21. Опыт применения оптических датчиков тока в электросетевой компании Transpower New Zealand: Цифровая подстанция [Электронный ресурс]. URL: <http://digitalsubstation.com/blog/2013/01/10/opy-t-primeneniya-opticheskikh-datchikov> (дата обращения: 01.09.2022).
22. Патент № 165635 Российская Федерация, МПК H02H 3/06 (2006.01), G01R 1/00 (2006.01). Устройство автоматического повторного включения кабельно-воздушной линии электропередачи : № 2016100463/07 : заявл. 11.01.2016 : опубл. 27.10.2016 / Догадкин Д.И., Исмуков Г.Н., Куликов А.Л. [и др.]. – 7 с. : ил.
23. Догадкин, Д. Устройство автоматического повторного включения кабельно-воздушных линий электропередачи мегаполисов/ Д. Догадкин, Р. Марин, Е. Ширшова [и др.] // *Электроэнергия. Передача и распределение*. -2016. -№ 5 (38). -С. 114-119.

24. Kawal, K. Selective Auto-Reclosing of Mixed Circuits Based on Multi-Zone Differential Protection Principle and Distributed Sensing / K. Kawal, S. Blair, Q. Hong, P.N. Papadopoulos // *Energies*. –2023. –16(6):2558. – 16 p.
25. Патент № 2669542 Российская Федерация, МПК G01R 15/24 (2006.01), H02H 3/06 (2006.01). Система селективного блокирования автоматического повторного включения на комбинированных кабельно-воздушных линиях электропередачи : № 2016100463/07 : заявл. 12.01.2018 : опубл. 11.10.2018 / Нудельман Г.С., Балашов С.В., Ерохин Е.Ю. [и др.]. – 19 с. : ил.
26. Алексеев, В.Г. Селективное автоматическое повторное включение кабельно-воздушных линий электропередачи напряжением 110 кВ и выше / Алексеев В.Г., Арутюнов С.А., Балашов С.В. [и др.] // *Электроэнергия. Передача и распределение*. –2018. –№ 3 (48). – С. 94-101.
27. Нудельман, Г.С. Система селективного автоматического повторного включения кабельно-воздушных линий электропередачи напряжением 110 кВ и выше. Результаты разработки и опыт внедрения / Г.С. Нудельман, С.В. Балашов, Е.Ю. Ерохин [и др.] // *Релейщик*. – 2020. – № 3(38). – С. 12-19.
28. Руководство по эксплуатации SEL-T400L (SEL, США). Ultra-High-Speed Transmission Line Relay Traveling-Wave Fault Locator High-Resolution Event Recorder. Instruction Manual. Schweitzer Engineering Laboratories. – 2017. – 452 с. : ил.
29. Kasztenny, B. Locating faults before the breaker opens – adaptive autoreclosing based on the location of the fault / B. Kasztenny, A. Guzman, V.M. Mangapathirao, J. Titiksha. // 44th Annual Western Protective Relay Conference. – 2017. – pp. 1-15.
30. Патент № 2658673 Российская Федерация, МПК H02H 3/06 (2006.01). Способ автоматического повторного включения кабельно-воздушной линии электропередачи : № 2017133565 : заявл. 26.09.2017 : опубл. 22.06.2018 / Куликов А.Л., Лоскутов А.А., Пелевин П.С. – 13 с. : ил.
31. Куликов, А.Л. Алгоритм идентификации поврежденного участка на кабельно-воздушных линиях электропередачи на основе распознавания волновых портретов / А.Л. Куликов, А.А. Лоскутов, П.С. Пелевин // *Электричество*, 2018, №3. – С. 11-17.
32. Куликов, А.Л. Метод автоматического повторного включения на кабельно-воздушных ЛЭП с использованием двусторонних измерений / А.Л. Куликов, А.А. Лоскутов, П.С. Пелевин // *Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева*. – Нижний Новгород, 2019, №4. – С 81-90.
33. Патент № 2719763 Российская Федерация, МПК H02H 3/06 (2006.01). Способ автоматического повторного включения кабельно-воздушной линии электропередачи :

- № 2019143621 : заявл. 25.12.2019 : опубл. 23.04.2020 / Куликов А.Л., Пелевин П.С., Лоскутов А.А. – 16 с. : ил.
34. Патент № 2663413 Российская Федерация, МПК H02H 3/06 (2006.01). Способ автоматического повторного включения кабельно-воздушной линии электропередачи : № 2017130666 : заявл. 29.08.2017 : опубл. 06.08.2018 / Куликов А.Л., Лоскутов А.А., Петрухин А.А – 11 с. : ил.
35. Пелевин, П.С. Повышение надежности кабельно-воздушных линий электропередачи путем организации интеллектуального автоматического повторного включения / П.С. Пелевин, А.А. Лоскутов, Т.Р. Шарафеев // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики: Вып. 70. Методические и практические проблемы надежности систем энергетики. Книга 2 / Отв. ред. Н.И. Воропай. Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2019. – С. 252-261.
36. Куликов, А.Л. Повышение надежности кабельно-воздушных линий электропередачи путем организации интеллектуального автоматического повторного включения / А.Л. Куликов, П.С. Пелевин, А.А. Лоскутов // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2020. –№3. –С. 88-94.
37. Pelevin, P. Improving the reliability of combined overhead and cable power lines by organizing smart autoreclosing / P. Pelevin, A. Loskutov, T. Sharafeev // Rudenko International Conference “Methodological problems in reliability study of large energy systems” (RSES 2019). –Vol. 139. – 2019. – P. 5.
38. Славинский, А. Диагностика муфт для КЛ с полиэтиленовой изоляцией. Подходы и критерии / А. Славинский, В. Устинов, С. Кассихин, Ю. Аксенов, И. Ярошенко // Новости Электротехники. – 2020. – № 3(123). – С. 36-41.
39. Куликов, А.Л. Распознавание бросков тока намагничивания трансформаторов для предотвращения излишнего действия релейной защиты в тяговых сетях переменного тока / А.Л. Куликов, П.С. Пелевин, А.А. Лоскутов // Электроника и электрооборудование транспорта. –2019. –№6. –С. 2-7.
40. Куликов, А.Л. Применение дискриминаторных методов для оценки параметров режима энергорайонов с объектами распределенной генерации / А.Л. Куликов, П.В. Илюшин, П.С. Пелевин // Электричество. –2019. –№7. –С. 22-35.
41. Шалыт, Г.М. Определение мест повреждения линий электропередачи импульсными методами / Г.М. Шалыт. - М.: «Энергия», 1968. – 216 с. : ил.
42. Барухман, В.А. Устройства для определения мест повреждения на воздушных линиях электропередачи / В.А. Барухман, А.А. Кудрявцев, А.П. Кузнецов. – М.: Энергия, 1973. – 87 с. : ил.

43. Айзенфельд, А.И. Методы определения мест короткого замыкания на воздушных линиях электропередачи при помощи фиксирующих приборов / А.И. Айзенфельд. – М: Энергия, 1974. – 80 с. : черт.
44. Шалыт, Г. М. Определение мест повреждения в электрических сетях / Г.М. Шалыт. – М.: Энергоиздат, 1982. - 312 с. : ил.
45. Айзенфельд, А.И. Определение мест короткого замыкания на линиях с ответвлениями / А.И. Айзенфельд, Г.М. Шалыт. – М : Энергия, 1977. – 205 с. : ил.
46. Арцишевский, Я.Л. Определение мест повреждения линий электропередачи в сетях с заземленной нейтралью / Я.Л. Арцишевский. – М.: Высшая школа, 1988. – 94 с.
47. Аржанников, Е.А. Методы и приборы определения мест повреждения на линиях электропередачи / Е.А. Аржанников, А.М. Чухин. – М.: НТФ "Энергопресс", 1998. – 64 с. : ил.
48. Аржанников, Е.А. Определение места короткого замыкания на высоковольтных линиях электропередачи / Е.А. Аржанников, В.Ю. Лукоянов, М.Ш. Мисриханов; Под ред. В.А. Шуина. – М.: Энергоатомиздат, 2003. – 272 с.
49. Куликов, А.Л. Дистанционное определение мест повреждений высоковольтных линий электропередачи средствами цифровой обработки сигналов : дис. ... д-ра техн. наук : 05.14.02 / Куликов Александр Леонидович. – Иваново, 2007. – 381 с.: ил.
50. Обалин, М.Д. Применение имитационного моделирования для адаптации алгоритмов определения места повреждения линий электропередачи по параметрам аварийного режима : дис. ... канд. техн. наук : 05.09.03 / Обалин Михаил Дмитриевич. – Н. Новгород, 2016. – 181 с. : ил.
51. Ананьев, В.В. Методы повышения точности многостороннего волнового определения места повреждений на воздушных линиях электропередачи с ответвлениями : дис. ... канд. техн. наук : 05.09.03 / Ананьев Виталий Вениаминович. – Нижний Новгород, 2017. – 227 с. : ил.
52. Кузнецова, Н.С. Рефлектометр с автоматической коррекцией методической погрешности для определения места повреждения линии электропередачи : дис. ... канд. техн. наук : 05.11.16 / Кузнецова Надежда Сергеевна. – Волгоград, 2017. – 111 с. : ил.
53. Куликов, А.Л. Анализ и повышение точности при определении места повреждения линий электропередачи/ А.Л. Куликов, М.Д. Обалин, П.А. Колобанов // Известия вузов. Электромеханика. – 2013. – №5. – С 57-62.
54. Thomas, D.W.P. Fault Location in Distribution Systems Based on Traveling Waves / D.W.P. Thomas, R.J.O. Carvalho, E.T. Pereira // Proceedings – IEEE Bologna Power Tech Conference. – 2003. – vol. 2. – 5 p.

55. Hizam, H. Estimation of Fault Location on a Radial Distribution Network Using Fault Generated Travelling Waves Signals / H. Hizam, P.A Crossley // *Journal of Applied Sciences*. -2007. – vol. 7 (23). – P. 3736-3742.
56. Livani, H. Intelligent Fault Location for Smart Power Grids: dissertation, Ph.D / H. Livani. – Blacksburg, 2014. – 135 p.
57. Куликов, А.Л. Дистанционное определение мест повреждений ЛЭП методами активного зондирования / А.Л. Куликов. – М: Энергоатомиздат, 2006. – 147 с.
58. Куликов, А.Л. Определение мест повреждений ЛЭП 6-35 кВ методами активного зондирования: монограф. / А.Л. Куликов, М.Ш. Мисриханов, А.А. Петрухин. – М.: Изд-во, 2009. – 164 с.
59. Петрухин, А. А. Совершенствование методов и технических средств определения мест повреждений воздушных ЛЭП 6-35 кВ на основе активного зондирования : дис. ... канд. техн. наук : 05.14.02 / Петрухин Андрей Алексеевич. – Иваново, 2009. – 176 с.
60. Минуллин, Р.Г. Определение места повреждения локационным методом на линиях электропередачи с ответвлениями / Р.Г. Минуллин, Ю.В. Писковацкий, В.А. Касимов [и др.] // *Вестник Казанского государственного энергетического университета*. – 2021. – Т. 13, № 3(51). – С. 69-80.
61. Rachidi, F. Electromagnetic time reversal. Application to Electromagnetic Compatibility and Power System / F. Rachidi, M. Rubinstein, M. Paolone // John Wiley & Sons, Ltd. –2017. – 290 p.
62. Johns, A.T. Digital protection for power systems / A.T. Johns, S.K. Salman. // Peter Peregrinus Ltd., on behalf of the Institution of Electrical Engineers, London, UK. – 1995. – 203 p.
63. Лачугин, В.Ф. Релейная защита объектов электроэнергетических систем, основанная на использовании волновых методов : дис. ... д-ра техн. наук : 05.14.02 / Лачугин Владимир Федорович. – Москва, 2015. – 437 с. : ил.
64. Куликов, А.Л. Особенности применения одностороннего определения места повреждения на ЛЭП с использованием волновых портретов / А.Л. Куликов, А.А. Лоскутов, П.С. Пелевин // 21-й Международный научно-промышленный форум «Великие реки'2019»: труды научного конгресса. Т. 3. – 2019. – С. 66-69.
65. Vajira Pathirana. A power system protection scheme combining impedance measurement and travelling waves: software and hardware implementation: dissertation, Ph.D., Winnipeg, Canada. – 2004. – 198 p.
66. Микуцкий, Г.В. Высокочастотная связь по линиям электропередачи / Г.В. Микуцкий, В.С. Скитальцев. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 448 с. : ил.

67. Valenti, A. Traveling wave fault location fo radial MV distribution systems, theoretical approach and EMTP simulations / A. Valenti, G. Huard, P. Johannet et al. // Proceedings - IPST: International Conference on Power Systems Transients. – 1999. – P. 229-234.
68. Yi-Zhuang, H. A new fault location method / H. Yi-Zhuang, Q. XiaoLin, X. MingChao // Proceedings. International Conference on Power System Technology. – 2002. – vol. 2. – P. 1142-1145.
69. Kulikov, A. Methods for implementing of the single-ended traveling wave fault locating on the transmission lines based on traveling wave pattern recognition / A. Kulikov, A. Loskutov, P. Pelevin // Proceedings – 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). – 2018. – 6 p.
70. Reis, R.L.A. An improved single-ended correlation-based fault location technique using traveling waves / R.L.A. Reis, F.V. Lopes, W.L.A. Neves [et al.] // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. – 2021. – vol. 132. – 10 p.
71. Reis, R.L.A. Correlation-based single-ended traveling wave fault location methods: A key settings parametric sensitivity analysis / R.L.A. Reis, F.V. Lopes // Electric Power Systems Research. – 2022. – vol.213. – 8 p.
72. Guzman, A. Accurate and Economical Travelling-Wave Fault Locating Without Communications / A. Guzman, B. Kasztenny, Y. Tong, M.P. Mynam // 44th Annual Western Protective Relay Conference. Spokane, Washington. – 2017. – 18 p.
73. Lopes, F.V. Practical Methodology for Two-Terminal Traveling Wave-Based Fault Location Eliminating the Need for Line Parameters and Time Synchronization / F.V. Lopes, P. Lima; J.P.G. Ribeiro [et al.] // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2019. – vol. 34, no. 6. – P. 2123-2134.
74. Lopes, F.V. Real-Time Traveling-Wave-Based Fault Location Using Two-Terminal Unsynchronized Data / F.V. Lopes, K.M. Silva, F.B. Costa [et al.] // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2015. – vol. 30, no. 3. – P. 1067-1076.
75. Chen, P. The Optimized Combination of Fault Location Technology Based on Traveling Wave Principle / P. Chen, B. Xu, J. Li // 2009 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. – 2009. – 5 p.
76. Cortón, D.L. Double-Ended Traveling-Wave Fault Locating Without Relay-to-Relay Communications / D.L. Cortón, J.V. Melado, J. Cruz, R. Kirby // Proceedings – 74th Annual Conference for Protective Relay Engineers. – 2021. – 11 p.
77. Козлов, В.Н. Расширение возможностей пассивного волнового определения места повреждения за счет отраженных волн / В.Н. Козлов, К.И. Ермаков, Ю.В. Бычков // Релейная защита и автоматизация. – 2019. – № 4(37). – С. 34-37.

78. Leite, E.J.S. Closed-Form Solution for Traveling Wave-Based Fault Location on Non-Homogeneous Lines / E.J.S. Leite, F.V. Lopes, F.B. Costa, W.L.A. Neves // *IEEE Transactions on Power Delivery*. – 2019. – vol. 34, no. 3. – P. 1138-1150.
79. Kasztenny, B. Controlling Autoreclosing on Overhead Lines With Underground Cable Sections Using Traveling-Wave Fault Location Based on Measurements From Line Terminals Only / B. Kasztenny, A. Guzman, M. Mynam, T. Joshi // *14th International Conference on Developments in Power System Protection*. – 2018. – 6 p.
80. Marx, S. Traveling-Wave Fault Locating for Multiterminal and Hybrid Transmission Lines / S. Marx, Y. Tong, M.V. Mynam // *45th Annual Western Protective Relay Conference Spokane*. – 2018. – 10 p.
81. Козлов, В.Н. Учет неоднородностей линии с целью повышения точности двухстороннего волнового ОМП / В.Н. Козлов, К.И. Ермаков, М.И. Кирюшин // *Релейная защита и автоматизация*. – 2020. – № 4(41). – С. 46-49.
82. Ермаков, К.И. Совершенствование методов и средств определения места повреждения на линиях электропередачи для организации аварийно-восстановительных работ : дис. ... канд. техн. наук : 05.14.02 / Ермаков Константин Игоревич. – Чебоксары, 2021. – 209 с.
83. Аркадьев, Д.Э. Способ локализации повреждений двухсторонним волновым методом на кабельно-воздушных линиях электропередачи / Д.Э. Аркадьев, А.О. Федоров, В.С. Петров // *Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем : материалы XIV Всероссийской научно-технической конференции*. – Чебоксары, 2021. – С. 383-386.
84. Христофоров, В.А. Локализация повреждений на кабельно-воздушных линиях электропередачи двухсторонним волновым методом / В.А. Христофоров, А.О. Федоров, В.С. Петров // *Современные тенденции развития цифровых систем релейной защиты и автоматики : Материалы научно-технической конференции молодых специалистов в рамках форума «РЕЛАВЭКСПО-2021»*. – Чебоксары, 2021. – С. 75-78.
85. Lopes, F.V. Traveling wave-based hybrid line faulted section detection: a practical approach / F.V. Lopes, E.J.S. Leite Jr., F.B. Costa, W.L.A. Neves // *Proceedings – International Conference on Power Systems Transients (IPST2019)*. – 2019. – 6 p.
86. Gilany, M. An accurate scheme for fault location in combined overhead line with underground power cable / M. Gilany, E.S.T. El Din, M.M. Abdel Aziz, D.K. Ibrahim // *IEEE Power Engineering Society General Meeting*. – 2005. – vol. 3. – P. 2521-2527.
87. Xin, Z. Smart re-close scheme of combined overhead line with underground power cable / Z. Xin, L. Wang, H. Jiang [et al.] // *Proceedings - 2010 International Conference on Power System Technology*. – 2010. – 6 p.

88. Han, J. Fault location on a mixed overhead and underground transmission feeder using a multiple-zone quadrilateral impedance relay and a double-ended travelling wave fault locator / J. Han, P.A. Crossley // 12th IET International Conference on Developments in Power System Protection (DPSP 2014). – 2014. – 6 p.
89. Куликов, А.Л. Комбинирование волновых и методов по параметрам аварийного режима для совершенствования релейной защиты / А.Л. Куликов, А.А. Лоскутов, П.С. Пелевин // Труды четырнадцатой международной научно-технической конференции Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП-2018). НГТУ, Новосибирск. – 2018 – Т.7. – С. 245-250.
90. Куликов, А.Л. Варианты объединения волновых и ступенчатых защит электрических сетей / А.Л. Куликов, А.А. Лоскутов, П.С. Пелевин // Актуальные проблемы электроэнергетики: сб. ст.– Н. Новгород, 2018. – С. 202-206.
91. Пелевин, П.С. Метод волновой РЗА, комбинирование с традиционными защитами / П.С. Пелевин, А.А. Лоскутов, рук. А.Л. Куликов // Тринадцатая международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2018»: материалы конференции. – Иваново, 2018. – Т3. – С. 69-70.
92. Kulikov, A.L. Combining of travelling wave methods and methods based on emergency mode parameters estimation for improvement of relay protection / A.L. Kulikov, A.A. Loskutov, P.S. Pelevin // Proceedings – 14th International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE). – 2018. – P. 193-198.
93. Naidu, O.D. Traveling wave based adaptive auto-reclosing and fault location for three-terminal mixed lines / O.D. Naidu, A.K. Pradhan, P. Krishnamurthy // Proceedings – 2019 IEEE PES GTD Grand International Conference and Exposition Asia (GTD Asia). – 2019. – P. 466-471.
94. Gilany, M.I. Travelling wave-based fault location scheme for aged underground cable combined with overhead line / M.I. Gilany, S.M. Eldin, M.M. Abdel Aziz, D.K. Ibrahim // International Journal of Emerging Electric Power Systems. – vol. 2. – iss. 2. – 2005. –19 p.
95. Livani, H. A Traveling wave based single-ended fault location algorithm using DWT for overhead lines combined with underground cables / H. Livani, C.Y. Evrenosoglu // IEEE PES General Meeting. – 2010. – 6 p.
96. Livani, H. A hybrid fault location method for overhead lines combined with underground cables using DWT and SVM / H. Livani, C.Y. Evrenosoglu // 2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting. – 2012. – 6 p.
97. Livani, H. A Machine Learning and Wavelet-Based Fault Location Method for Hybrid Transmission Lines / H. Livani, C.Y. Evrenosoglu // IEEE Transactions on Smart Grid. – 2014. – vol. 5, no. 1. – P. 51-59.

98. Banerjee Roy, N. Application of Signal Processing Tools and Artificial Neural Network in Diagnosis of Power System Faults (1st ed.) / N. Banerjee Roy, K. Bhattacharya. – CRC Press. – 2021. – 144 p.
99. Gashteroodkhani, O.A. A hybrid SVM-TT transform-based method for fault location in hybrid transmission lines with underground cables / O.A. Gashteroodkhani, M. Majidi, M. Etezadi-Amoli, A.F. Nematollahi, B. Vahidi // Electric Power Systems Research. – vol. 170. – 2019. – P. 205–214.
100. Burek, A. New Single Ended Fault Locator for HVDC Lines / A. Burek, P. Balcerak, H. Bjorklund [et al.] // Proceedings - 2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering. – 2018. – 6 p.
101. Burek, A. Finger print matching of Bewley's diagram and fault transients for single-ended fault location in HVDC systems / A. Burek, P. Balcerak, H. Bjorklund, J. Rezmer, T. Sikorski // Proceedings – International Conference on Power Systems Transients (IPST2019). – 2019. – 6 p.
102. Xu-ming, T. A new location method of faulty segment for hybrid transmission lines based on transient travelling wave analysis / T. Xu-ming, G. Ning-ming, X. Wei, L. Tie, Z. Cai-ping // Proceedings – 4th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE 2019). – 2019. – 10 p.
103. Руководство пользователя PSCAD/EMTDC. Transient Analysis for PSCAD Power System Simulation: EMTDC user's guide v4.6. Manitoba HVDC Research Centre. URL: <https://www.pscad.com>.
104. Куликов, А.Л. Использование имитационного моделирования для повышения точности волнового определения места повреждения линий электропередачи / А.Л. Куликов, В.В. Ананьев // Релейщик. – 2014. – №2. – С. 30-34.
105. Куликов, А.Л. Адаптивное волновое определение места повреждения линии электропередач / А.Л. Куликов, В.В. Ананьев // Вестник ИГЭУ. – 2014. – №4. – С. 21-25.
106. Куликов, А.Л. Использование псевдодальномерного метода для повышения точности многостороннего волнового определения места повреждения линий электропередачи / А.Л. Куликов, В.В. Ананьев // Электроэнергетика глазами молодежи: труды VI международной научно-технической конференции. – Иваново, 2015. – Т.2, вып. 2. – С. 47-50.
107. Куликов, А.Л. Повышение точности многостороннего волнового определения места повреждения линий электропередачи за счет использования псевдодальномерного метода / А.Л. Куликов, В.В. Ананьев // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2015. – №3. – С. 73-76.

108. Куликов, А.Л. Уточнение расстояния до повреждения при волновом ОМП ЛЭП / А.Л. Куликов, В.В. Ананьев // Актуальные проблемы электроэнергетики. Сборник статей Всероссийской научно-технической конференции. – Нижний Новгород, 2015. – С. 128-132.
109. Куликов, А.Л. Оценка скорости распространения электромагнитных волн в задаче определения места повреждения линии электропередачи / А.Л. Куликов, В.В. Ананьев // Вестник Чувашиского университета. – 2016. – №1. – С. 56-64.
110. Khuziashev, R.G. Algorithms for determining the essential features of the travelling wave for fault location purpose / R.G. Khuziashev, I.L. Kuzmin, I.I. Irkagalieva, A.M. Makletsov // Proceedings of the 3rd 2021 International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering, REEPE 2021. – 2021. – 5 p.
111. Pan, M. Simulation Model of UHV AC Transmission System Based on PSCAD / M. Pan, Z. Lan, K. Yang [et al.] // The 2021 International Conference on Smart Technologies and Systems for Internet of Things. – 2021. – vol 122. – P. 391-399.
112. Chinges, T. Lightning Transient Analysis Comparison and Wind Turbine Models Using PSCAD/EMTDC Circuit Simulator/ T. Chinges, Q. Li, J. Zhao // Journal of Physics: Conference Series (ICCEE-2022). – 2022. – 8 p.
113. СТО 56947007-33.060.40.052-2010 Методические указания по расчету параметров и выбору схем высокочастотных трактов по линиям электропередачи 35-750 кВ переменного тока. Утвержден и введен в действие: Приказом ПАО «ФСК ЕЭС» от 30.06.2010 № 454.
114. Костенко, М.В. Волновые процессы и электрические помехи в многопроводных линиях высокого напряжения / М.В. Костенко, Л.С. Перельман, Ю.П. Шкарин. – М.: «Энергия», 1973. – 272 с. : ил.
115. Козлов, В.Н. Повышение точности волновых методов ОМП высоковольтных ЛЭП / В.Н. Козлов, К.И. Ермаков, М.И. Кирюшин, А.В. Шашкий // Энергия единой сети. – 2022. – № 5-6(66-67). – С. 26-34.
116. Семенова, А.Г. Особенности модального преобразования электрических величин кабельной линии электропередачи в устройстве волнового определения места повреждения / А.Г. Семенова, А.О. Федоров, В.С. Петров, А.М. Дмитренко // Вестник Чувашиского университета. – 2022. – № 3. – С. 81-87.
117. Kulikov, A. Validation of a simulation model of an overhead transmission line for traveling wave transients investigation by calculating the correlation between simulated and real waveforms / A. Kulikov, P. Pelevin, A. Loskutov // Proceedings – ICOECS 2021: 2021 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems. – 2021. – P. 523-528.

118. Пелевин, П. С. Разработка имитационных моделей ЛЭП для исследований алгоритмов волнового ОМП / П.С. Пелевин, А.А. Лоскутов // Электроэнергетика глазами молодежи: Материалы XII Международной научно-технической конференции. Том I. – 2022. – С. 249-252.
119. Пелевин, П. С. Разработка модели ЛЭП для анализа алгоритмов волнового ОМП с использованием реальных сигналов / П.С. Пелевин, А.А. Лоскутов // Электроэнергетика: Семнадцатая всероссийская (девятая международная) научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых: материалы конференции. В 6-ти томах. Том 3. – 2022. – С. 64.
120. Канасевич, Э.Р. Анализ временных последовательностей в геофизике. Перевод с англ. В.Н. Лисина. – Москва : Недра, 1985. – 400 с. : ил.
121. Пелевин, П.С. Упрощенные методы определения поврежденного участка смешанных ЛЭП для блокирования АПВ / П.С. Пелевин, А.А. Лоскутов // Электроэнергетика. Пятнадцатая всероссийская (седьмая международная) научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых: материалы конференции. В 6 т. Т. 3. – Иваново, 2020. – С. 60-60.
122. Бездушный, Д.И. Методы распознавания аварийных режимов электротехнических комплексов на основе имитационного моделирования и алгоритмов анализа данных : дис. ... канд. техн. наук : 05.09.03 / Бездушный Дмитрий Игоревич. – Н. Новгород, 2022. – 181 с.
123. Куликов, А.Л. Методы цифровой фильтрации высокочастотных составляющих переходного процесса при ОМП ЛЭП / А.Л. Куликов, А.А. Лоскутов, П.С. Пелевин // V Международная научно-практическая конференция РЕЛАВЭКСПО-2019: Сборник докладов научно-технической конференции молодых специалистов. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2019. – С. 17-23.
124. Kulikov, A. The Method of Faulted Section Estimation for Combined Overhead and Cable Power Lines Using Double-Ended Measurements / A. Kulikov, A. Loskutov, P. Pelevin // 2020 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), Chelyabinsk. – 2020. – P. 70-75.
125. 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: ЧГУ имени И.Н. Ульянова, 2022. – С. 396-398.

126. Kulikov, A. Recognizing of Traveling Wave Patterns on Digital Substations for Automatic Reclosing of High-Voltage Overhead-Cable Power Lines Transmissions / A. Kulikov, A. Loskutov, A. Loskutov, P. Pelevin. // International Journal of Applied Engineering Research. – 2017. – vol. 12. – num. 21. – P. 11118-11123.
127. Loskutov, A. Pattern recognition methods application to power systems protection and control / A. Loskutov, P. Pelevin // 2018 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). – 2018. – 5 p.
128. Лоскутов, А.А. Применение методов распознавания образов в задачах защиты и управления электроэнергетических систем / А.А. Лоскутов, П.С. Пелевин // Пром-Инжиниринг: труды IV международной научно-технической конференции. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2018. – С. 309-313.
129. Lukowicz, M. Fault type classification in high voltage power systems using artificial neural networks / M. Lukowicz, E. Rosolowski // Wroclaw University of Technology, Poland. – 1996. – 6 p.
130. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020612951 Российская Федерация. Программа формирования набора сигналов волнового переходного процесса на линиях электропередачи: № 2020612017 : заявл. 29.02.2020 : опубл. 06.03.2020 : Бюл. №3. / Пелевин П.С. – 1 с.
131. Пелевин, П.С. Автоматическое повторное включение кабельно-воздушных линий электропередачи 110 кВ, основанное на контроле волновых переходных процессов / П.С. Пелевин, А.Л. Куликов, А.А. Лоскутов // Будущее технической науки: сборник материалов XVI Международной молодежной научно-технической конференции. – Н. Новгород, 2017. – С. 152-153.
132. Куликов, А.Л. Принципы реализации релейной защиты, основанной на распознавании волновых портретов / А.Л. Куликов, А.А. Лоскутов, П.С. Пелевин // Интеллектуальные энергосистемы: труды V Международного молодежного форума: в 3 т. – Томск: Изд-во ТПУ, 2017. – Т. 3. – С. 59-63.
133. Бессонов, Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: Учебник / Л.А. Бессонов. – 10-е изд. – М.: Гардарики, 2002. – 638 с.: ил.
134. Oppenheim, A.V. Discrete-Time Signal Processing. 3rd edition / A.V. Oppenheim, R.W. Schaffer. – Prentice Hall, 2009. – 1120 p.
135. Schweitzer, E.O. Locating Faults by the Travelling Waves They Launch / E.O. Schweitzer, A. Guzman, M.V. Mynam, V. Skendzic // Proceedings – 67th Annual Conference for Protective Relay Engineers. – 2014. – 16 p.

136. Куликов, А.Л. Моделирование волновых процессов на линиях электропередачи для повышения точности определения места повреждения / А.Л. Куликов, В.Ф. Лачугин, В.В. Ананьев, В.Ю. Вуколов, П.С. Платонов // Электрические станции. –2015. –№7. –С. 45-53.
137. Kulikov, A. Application of Correlation Methods for Traveling Wave Fault Locating and Automation of Intelligent Electrical Networks / A. Kulikov, L. Aleksey, L. Anton, P. Pelevin // Proceedings – 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). – 2019. – P. 1-6.
138. Куликов, А.Л. Реализация функций АПВ кабельно-воздушных ЛЭП на основе обработки волновых портретов / А.Л. Куликов, А.А. Лоскутов, П.С. Пелевин // КИБЕРНЕТИКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ: Сборник материалов XL сессии научного семинара по тематике "Диагностика энергооборудования". – 2018. – С. 350-354.
139. Куликов, А.Л. Особенности реализации автоматического повторного включения кабельно-воздушных ЛЭП с использованием волновых методов / А.Л. Куликов, А.А. Лоскутов, П.С. Пелевин // Проблемы и перспективы развития энергетики, электротехники и энергоэффективности: материалы II Междунар. Науч.-техн. Конф. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. Ун-та, 2018. – С. 74-80.
140. Смирнов, А.Н. Волновой метод двухсторонних измерений для определения места повреждения воздушной линии электропередачи 110 – 220 кВ : дис. ... канд. техн. наук : 05.14.02 / Смирнов Александр Николаевич. – Москва, 2015. – 209 с. : ил.
141. Пелевин, П.С. Особенности цифровой обработки волновых составляющих переходного процесса при повреждениях ЛЭП / П.С. Пелевин, А.А. Лоскутов, В.Ю. Вуколов, рук. А.Л. Куликов // Четырнадцатая всероссийская (международная) научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2019»: материалы конференции. Т. 3. – 2019. – С. 45-45.
142. Пелевин, П.С. Особенности цифровой обработки волновых составляющих переходного процесса при повреждениях ЛЭП / П.С. Пелевин, А.А. Лоскутов, В.Ю. Вуколов, рук. А.Л. Куликов // Четырнадцатая международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2019»: Материалы конференции. Т. 4. – Иваново: ИГЭУ, 2019. – С. 48-49.
143. Восстановление цифровых сигналов: Национальная библиотека им. Н.Э. Баумана [Электронный ресурс]. URL: https://ru.bmstu.wiki/Восстановление_цифровых_сигналов (дата обращения: 01.09.2022).
144. Ширман, Я.Д. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех / Я.Д. Ширман, В.Н. Манжос. – М.: Радио и связь, 1981. – 416 с.: ил.

145. Козлов, В.Н. О точности современных устройств ОМП / В.Н. Козлов, Ю.В. Бычков, К.И. Ермаков // Релейная защита и автоматизация. – 2016. – № 1(22). – С. 43-47.
146. Лоскутов, А.А. Разработка логической части интеллектуальной многопараметрической релейной защиты / А.А. Лоскутов, П.С. Пелевин, М. Митрович // Электричество. –2020. – №5. – С. 12-18.
147. Loskutov, A. Development of the logical part of the intellectual multi-parameter relay protection / A. Loskutov, P. Pelevin, M. Mitrovic // Rudenko International Conference “Methodological problems in reliability study of large energy systems” (RSES 2019). E3S Web of Conferences. – 2019. – Vol. 139.– 5 p.
148. Ластовкин, В. Практика определения мест повреждения на ВЛ. Схемы коммутации вторичных цепей / В. Ластовкин, С. Алексенко // Новости электротехники. – 2021. –№ 2(128)–3(129). – С. 40-45.
149. Лачугин, В.Ф. Разработка и применение устройств определения места повреждения на линиях электропередачи с использованием волновых методов / В.Ф. Лачугин, Д.И. Панфилов, С.Г. Попов [и др.] // Энергия единой сети. – 2021. – № 5-6(60-61). – С. 50-67.
150. Булычев, А. Волновой метод определения мест повреждения на ВЛ 35 кВ. Сравнительный анализ датчиков волны / А. Булычев, К. Ермаков, В. Козлов, К. Михеев, О. Бойко // Новости электротехники. – 2020. –№ 6(126). – С. 22-23.
151. Lopes, F.V. How much “villain” is the anti-aliasing filter for traveling wave-based fault location methods? / F.V. Lopes, R. Reis, D. Facina [et al.] // Electric Power Systems Research. – 2022. – vol. 212. – 9 p.
152. Ермаков, К.И. Программно–аппаратный комплекс ОМП / К.И. Ермаков, М.И. Кирюшин. – Чебоксары: ИПК РЗА, 2021. – 52 с.
153. Корнеев, С. Шумы осциллографа: Как с ними бороться? / С. Корнеев // Электроника: Наука, технология, бизнес. – 2012. – № 3(117). – С. 112-117.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Особенности разработки моделей реальных ЛЭП с использованием осциллограмм аварийных событий с высокой частотой дискретизации

Несмотря на то, что уже разработано множество различных способов ВОМП, ведется поиск новых, более эффективных алгоритмов. Часто исследователи оценивают эффективность разрабатываемых алгоритмов посредством имитационного моделирования переходных процессов, поскольку исследовать самые различные сценарии событий весьма удобно на имитационной модели. Аналогичный подход применен и в этой работе. При этом для получения достоверных результатов очень важно, чтобы сигналы, получаемые на модели ЛЭП, в достаточной степени соответствовали реальным. Поэтому возникает обоснованный вопрос, насколько данные, полученные на модели ЛЭП, будут соответствовать реальным. Очевидно, что в первую очередь это зависит от того, насколько точно модель соответствует реальному объекту.

Рассмотрим далее этот вопрос, разделив его на несколько подвопросов:

1. Каким образом можно оценить адекватность и точность модели линии электропередачи?

2. Насколько сложной должна быть модель, чтобы обеспечить достаточную точность результатов для исследователей, чтобы проводить анализ эффективности работы алгоритмов ВОМП на основе моделирования. Другими словами, какие элементы реальной ЛЭП следует учитывать при создании модели, чтобы обеспечить достаточное совпадение реальных и модельных сигналов в общем случае?

3. Как различные методы обработки (фильтрации) сигналов влияют на совпадение сигналов?

Моделирование можно осуществить различными способами. Можно использовать готовое программное обеспечение для имитационного моделирования электромагнитных переходных процессов или создать математическую модель другим способом. Несмотря на разные подходы к моделированию, методы проверки моделей одинаковы. В этом Приложении изложен метод оценки адекватности и точности модели, основанный на вычислении коэффициента корреляции между реальным измеренным сигналом и сигналом, вычисленным на имитационной модели. При этом модель разрабатывалась в программном обеспечении PSCAD.

В Приложении рассматривается процесс разработки и валидации имитационной модели ВЛ 220 кВ Парская-Сасово в программном комплексе PSCAD с использованием сигналов реальных осциллограмм, записанных с высокой частотой дискретизации (1 МГц), которые регистрировались по двум концам ЛЭП. Осциллограммы были получены во время опытных исследований переходных процессов, отмеченных в [63, 140]. Параметры линии описаны далее.

1 Сбор и анализ исходных данных

Для построения достаточно точной модели ЛЭП были собраны следующие исходные данные:

1. Информация о параметрах ВЛ 220 кВ Парская-Сасово, таких как паспортная длина, тип проводов, поперечная проводимость, тип опор, местоположение пунктов транспозиции, а также параметры оборудования высокочастотной (ВЧ) связи;

2. Электрические схемы подстанций. Эти данные позволяют понять сколько линий подключено к шинам, поэтому становится возможным обеспечить правильные коэффициенты отражения по концам ЛЭП. Также эти данные предоставляют информацию о количестве и типе силового оборудования на подстанции. Следовательно, его можно учесть, включив в модель эквивалентную емкость, которая будет имитировать влияние силового оборудования подстанции [113];

3. Схема электрической сети, в которой находится рассматриваемая линия электропередачи. Эта информация сообщает, в первую очередь, длину смежных ЛЭП;

4. Подробное описание параметров смежной ВЛ 220 кВ Арзамасская-Сасово, как и для основной линии (Парская-Сасово).

После сбора исходных данных производился анализ осциллограмм и определялись действительные времена распространения волн по ЛЭП, включенным в модель.

Длина ЛЭП Парская-Сасово, указанная в документации, составляет 78,5 км. Однако время распространения волн по линии, определенное по сигналам осциллограмм, составляет 249 мкс, и, с учетом теоретически рассчитанного (по геометрии опор и характеристикам проводов ВЛ) значения скорости распространения волн по линии (приблизительно 298700 км / с), вычисленная действительная длина линии составляет около 74,4 км. Кроме того, были аналогичным образом пересчитаны длины других (смежных) ЛЭП. На рассматриваемой ЛЭП произошло замыкание фазы *B* на землю на расстоянии 28,8 км от подстанции (ПС) Сасово (исходя из анализа реальных сигналов). Также было приблизительно оценена величина переходного сопротивления в месте короткого замыкания, которое составило 15 Ом.

Известно, что ТТ в целом имеют более широкую полосу пропускания, чем ТН, и лучше подходят для оценки волновых сигналов (высокочастотных составляющих в сигнале). По этой причине большинство устройств ВОМП используют сигналы тока вместо сигналов напряжения. Поэтому далее рассматриваются только сигналы тока.

Сигналы тока реальных осциллограмм показаны на рисунке А.1. На рисунке А.1,а показаны сигналы трехфазного тока, измеренные на присоединении ЛЭП на ПС Парская (i_{1R}) на временном интервале 400 мкс, который содержит фронты первой волны и двух волн, отраженных от места повреждения и от другого конца линии. На рисунке А.1,б показаны аналогичные сигналы, измеренные на присоединении ЛЭП на ПС Сасово (i_{2R}). Для лучшей читаемости

сигналы имеют смещение на величину, показанную на рисунке А.1,а,б. Все сигналы также подвергались предварительной обработке путем вычитания значения первой выборки из сигнала ($x'(n) = x(n) - x(0)$, где x' - новый предварительно обработанный сигнал, n – номер выборки).

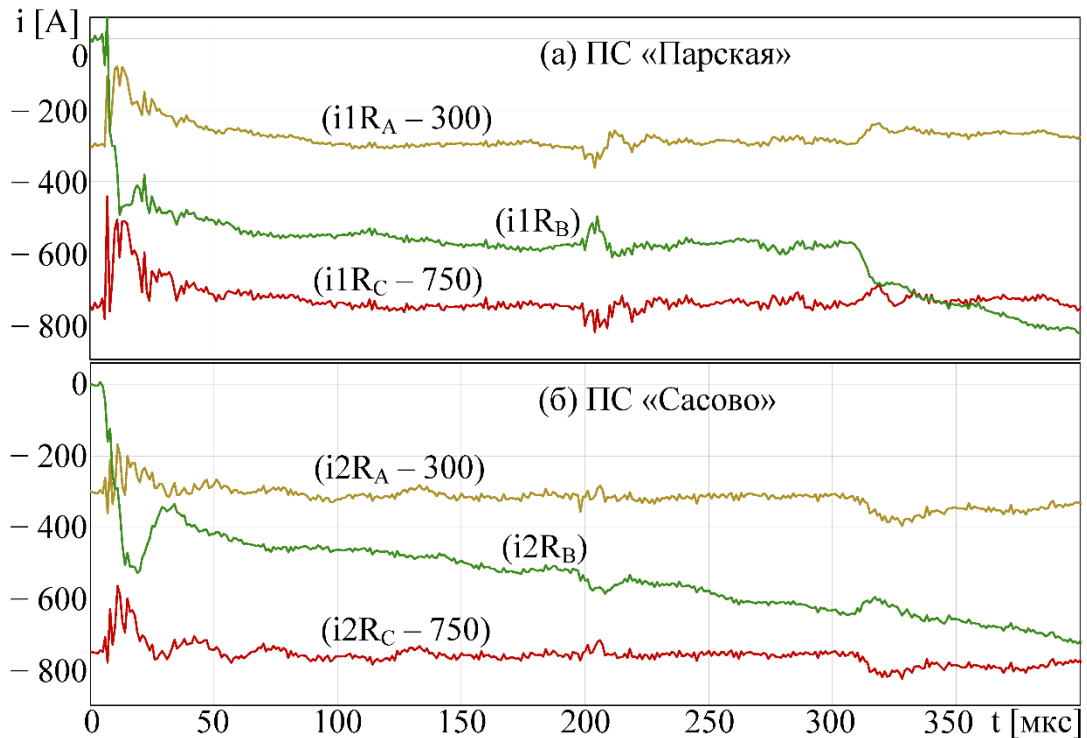


Рисунок А.1 –Реальные сигналы трехфазного тока, измеренные на присоединении ЛЭП на ПС Парская (а) и на присоединении ЛЭП на ПС Сасово (б)

На рисунке А.1 видно, что фазные сигналы искажены разными шумами и необходимо использовать сглаживающий фильтр. Однако отрицательный эффект сглаживающей фильтрации - это, как известно, уменьшение крутизны переднего фронта волны. Другой способ осуществить предварительную фильтрацию – применить разложение на модальные составляющие (волновые каналы) и оценивать выбранную модальную составляющую вместо фазной составляющей, как отмечено в п.3.4. В большинстве случаев используется первая междуфазная модальная составляющая (волновой канал «фаза - две другие фазы»), которая рассчитывается по выражению (А.1) (для фазы B):

$$i_{m1} = \frac{1}{3} \cdot (2 \cdot i_B - (i_A + i_C)) \quad (\text{А.1})$$

На рисунке А.2 показаны модальные сигналы ($i1Rm1$ и $i2Rm1$) в сравнении с сигналами фазы B ($i1RB$ и $i2RB$). Сигналы смещены по вертикали для демонстрационных целей и предварительно обработаны (вычитание начальной выборки) как указано выше для сигналов на рисунке А.1. Видно, что модальные сигналы менее искажены шумами, чем фазные. Поэтому далее рассматриваются только сигналы первой междуфазной модальной составляющей.

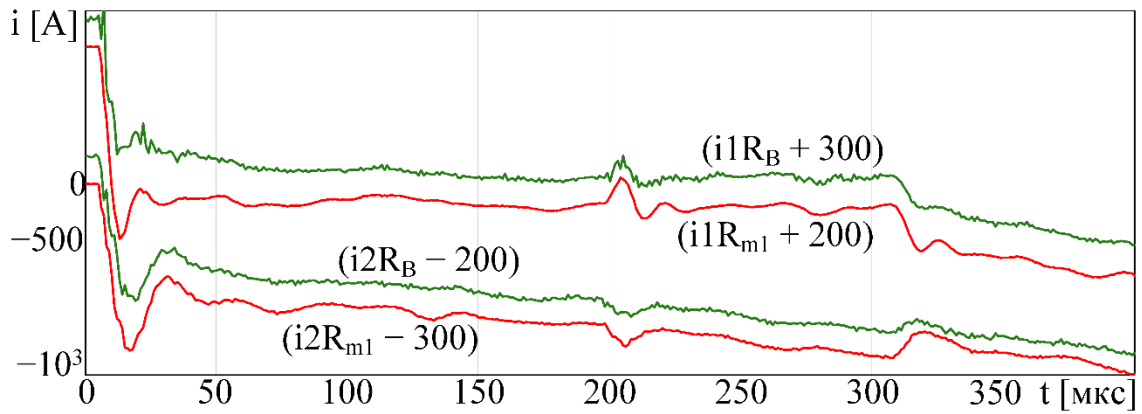


Рисунок А.2 – Сравнение модальных сигналов (первая междуфазная модальная составляющая) и сигналов фазы B

2 Имитационная модель в PSCAD

Вся представленная исходная информация позволила создать модель электрической сети, которая содержит не только рассматриваемую линию (ЛЭП Парская-Сасово), но также смежные линии и другие элементы. Модель представлена на рисунке 4.3, она включает:

1. Рассматриваемая ЛЭП (Парская-Сасово), содержащая различные участки линии с разными опорами, пункты транспозиции, а также смежные ЛЭП;
2. Оборудование ВЧ связи по ЛЭП (конденсаторы связи, ВЧ заградители и фильтры присоединения с разрядниками), которое на модели скрыто в блоках;

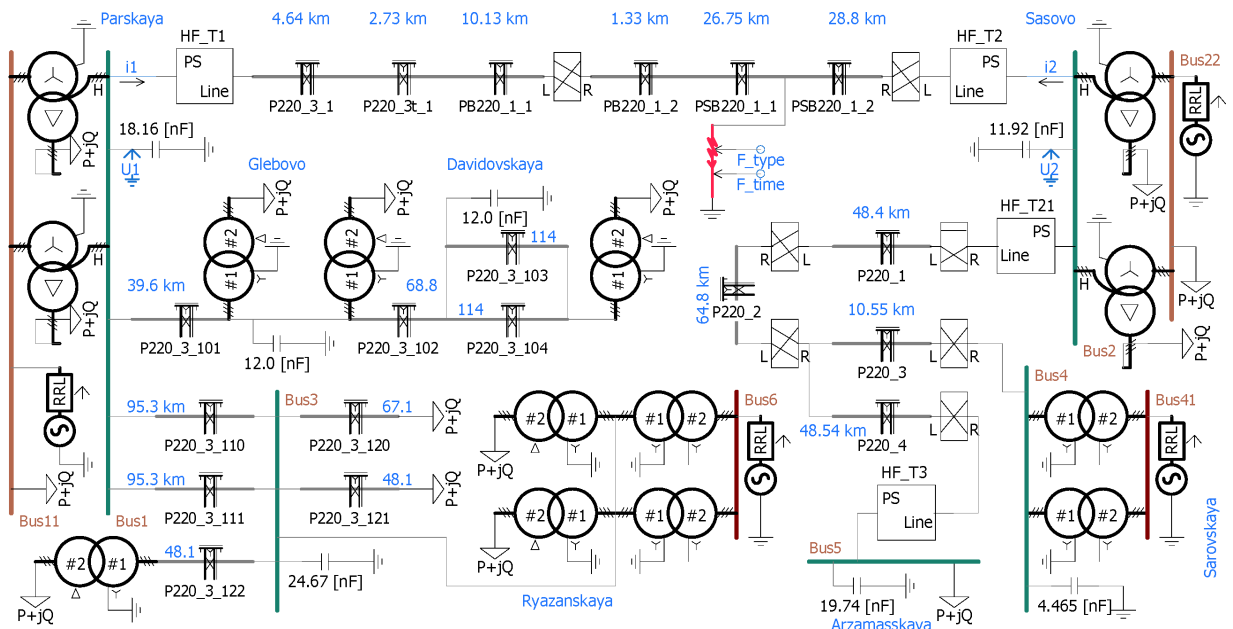


Рисунок А.3 – Модель электрической сети, включающей рассматриваемую ЛЭП, в PSCAD

3. Эквивалентные емкости, имитирующие влияние силового оборудования подстанции (силовые трансформаторы, измерительные трансформаторы, выключатели, разъединители, шины и т.п.) на коэффициент отражения волн от шин ПС (значения емкостей рассчитываются по методике, изложенной в [113]);

4. Силовые трансформаторы, источники напряжения и электрические нагрузки, необходимые для регулирования параметров установившихся режимов.

3 Оценка адекватности и точности модели

Как отмечено выше, модель оценивается посредством сравнения реальных сигналов с модельными сигналами. Это выполняется путем визуального анализа, а также математически путем расчета коэффициента корреляции (функции взаимной корреляции) в соответствии с приведенным ниже уравнением (А.2). При этом учитывалось, что из-за различий в искажениях фронтов волн в реальном и модельном сигналах максимальная корреляция может достигаться при значении m (выражение А.2), отличном от нуля. Поэтому значения корреляции вычислялись в некотором диапазоне значений m , и выбиралось максимальное значение корреляции.

$$r_{xy}(m) = \frac{\sum_{k=0}^{N-1} [(x(k) - \bar{x}) \cdot (y(k+m) - \bar{y})]}{\sqrt{\sum_{k=0}^{N-1} (x(k) - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\sum_{k=0}^{N-1} (y(k) - \bar{y})^2}} \quad (\text{А.2})$$

где r_{xy} – коэффициент корреляции для двух сигналов x и y ; m – величина сдвига одного сигнала относительно другого; N – количество отсчетов сигнала, используемых для оценки взаимной корреляции (N одинаково для x и y); \bar{x} и \bar{y} – средние значения сигналов x и y соответственно.

Сигналы, полученные на имитационной модели в PSCAD, сохранялись и обрабатывались в программном комплексе Mathcad. Модельные сигналы (i1M, i2M) в сравнении с реальными (i1R, i2R) показаны на рисунке А.4. Все сигналы смещены для демонстрационных целей. На рисунке А.4,а и А.4,б показаны одни и те же сигналы на разных временных интервалах 550 мкс и 2000 мкс соответственно. Первый временной интервал был рассчитан как удвоенное время распространения волны по линии Парская-Сасово, умноженное на 1,1 для запаса ($249 \times 2 \times 1,1 \approx 550$ мкс). Этого временного интервала достаточно для оценки сигнала большинством алгоритмов ВОМП (длина окна данных фильтров не учитывается для простоты). Однако для некоторых целей может потребоваться оценка более длительного временного интервала. Таким образом, дополнительно рассматриваем временной интервал, равный сумме удвоенных времен распространения волн по основной линии и по линиям, образующим путь к точке отражения на модели, которая является наиболее удаленной от концов основной линии (большой интервал нет смысла рассматривать, т.к. в этом случае модель должна включать другие, более удаленные линии). Это время равно приблизительно 2000 мкс.

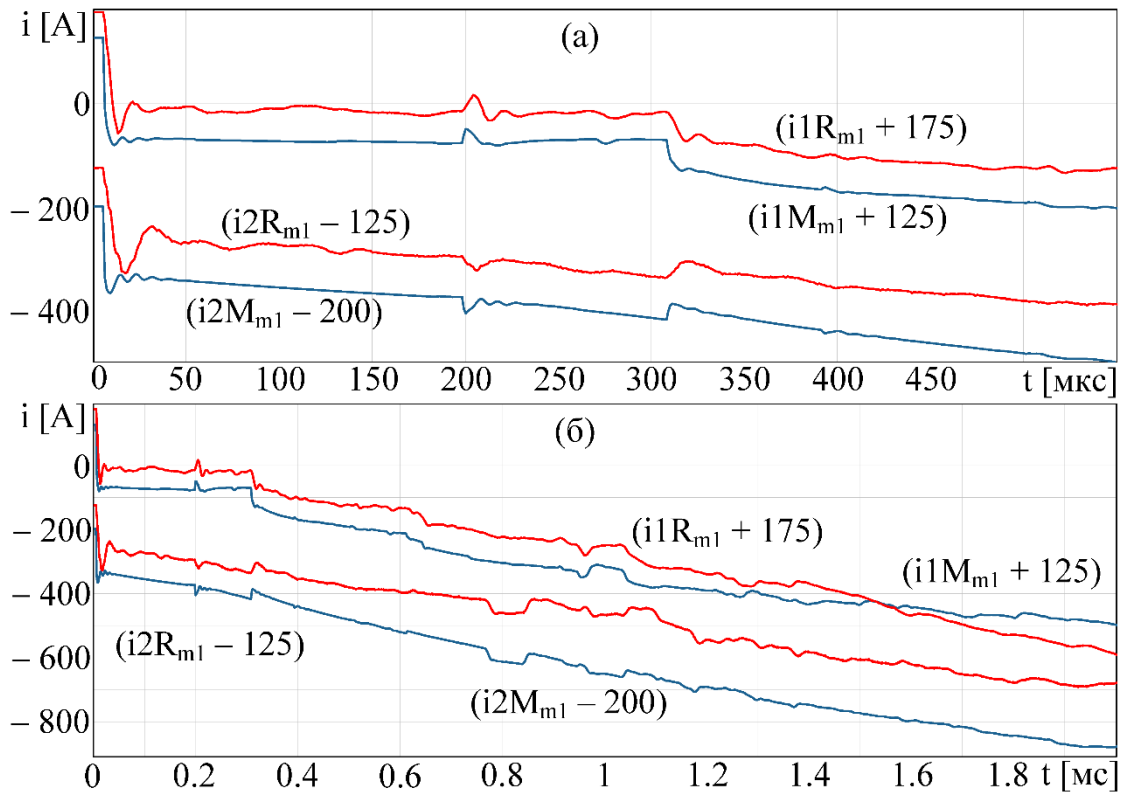


Рисунок А.4 – Реальный и модельный сигналы тока на временном интервале 550 мкс (а) и временном интервале 2000 мкс (б)

Из рисунка А.4,б видно, что на определенном начальном временном интервале модельные сигналы в определенной степени повторяют реальные сигналы, однако через некоторое время сигналы начинают расходиться. Несмотря на это, высокочастотные составляющие в сигнале (ступенчатые изменения) очень похожи как в модельных, так и в реальных сигналах. Объяснение этому состоит в том, что модель была разработана для соответствия реальному объекту с точки зрения параметров распространения волн, а не с точки зрения параметров установившегося режима. Поэтому составляющие промышленной частоты в реальном и модельном сигналах не совпадают. Также следует учитывать, что большинство методов ВОМП требуют выделения высокочастотных составляющих фронтов волн (фильтрация верхних частот или полосовая фильтрация) перед оценкой сигнала. Принимая во внимание вышеизложенное, более правильно сравнивать отфильтрованные сигналы, в которых удалены постоянная составляющая, составляющие промышленной частоты и другие гармонические составляющие.

Например, можно использовать фильтр, удаляющий постоянную составляющую на коротком окне (а также сильно подавляющий основную гармонику и другие гармонические составляющие), выходной сигнал которого определяется по выражению (3.31). Для сигналов, показанных в этом Приложении, использовался фильтр с окном данных 10 мкс. Отфильтрованные таким образом сигналы показаны на рисунке А.5. Сигналы нормированы по амплитуде и также как ранее смещены для лучшей различимости. Сигналы дополнительно были

обработаны помощью сглаживающего фильтра с окном данных 5 мкс. На рисунке А.5,а и А.5,б показаны сигналы на временных интервалах 550 мкс и 2000 мкс соответственно, как и до этого. На рисунке А.5 видно, что модельный и реальный сигналы достаточно хорошо совпадают на относительно большом временном интервале.

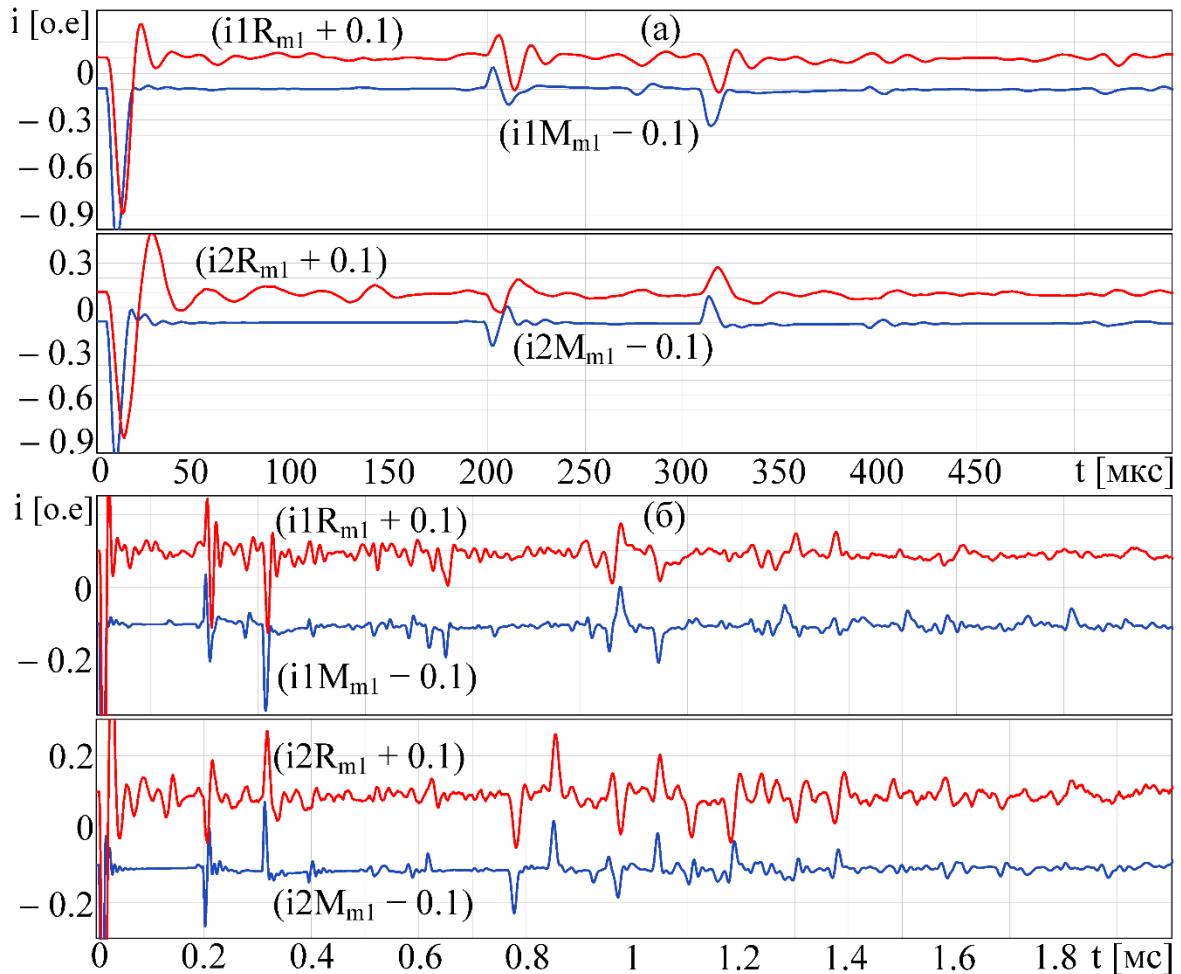


Рисунок А.5 – Отфильтрованные и нормированные реальные и модельные сигналы тока на двух интервалах времени: 550 мкс (а) и 2000 мкс (б)

Рассчитаем коэффициенты корреляции для сигналов, показанных на рисунке А.5, для разных временных интервалов. При вычислении корреляции на заданном интервале сигналы обрезались, так что выборки сигнала, не входящие в интервал оценки, не учитывались. Было решено оценивать корреляцию на трех основных временных интервалах: 0-550 мкс, 550-1275 мкс, 1275-2000 мкс. На временном интервале 0-550 мкс значения коэффициента корреляции равны 0,952 и 0,846 для сигналов $i1M$, $i1R$ (ПС Парская) и $i2M$, $i2R$ (ПС Сасово) соответственно. На интервале 550–1275 мкс значения составляют 0,789 и 0,811 для тех же сигналов, а на интервале 1275–2000 мкс значения корреляции равны соответственно 0,209 и 0,622. Для односторонних методов совпадение отраженных волн по амплитуде, форме и времени прихода не менее важно, чем первых волн. Поэтому для большей достоверности корреляцию следует рассчитывать и для интервала, не включающего первую волну. Например, установим временной

интервал 100-550 мкс. Для рассматриваемого временного интервала значения коэффициента корреляции равны 0,839 и 0,758 для сигналов $i1M$, $i1R$ и $i2M$, $i2R$ соответственно.

Из приведенных значений коэффициента корреляции видно, что на первом интервале (0-550 мкс) сигналы имеют достаточно сильную положительную связь, поэтому модель можно считать адекватной объекту и точной на рассматриваемом временном интервале. На втором временном интервале (550-1275 мкс) сигналы имеют более слабую взаимосвязь (точность на этом интервале меньше), но достаточную, чтобы считать модель адекватной и на этом временном интервале (аналогично на интервале 100-550 мкс). А на последнем временном интервале (1275-2000 мкс) сигналы практически не связаны (значение корреляции гораздо меньше порога значимости, принятого равным 0,7). Следует отметить, что на последнем интервале сигналы $i2M$ и $i2R$ имеют некоторую слабую положительную взаимосвязь, но этого значения (0,622) недостаточно, чтобы считать модель адекватной на этом временном интервале. Аналогичные выводы можно сделать на основе визуального анализа сигналов на рисунке А.5.

Таким образом, по значениям коэффициентов корреляции можно сделать вывод о том, что модель адекватна и достаточно точна только на первых двух интервалах. Также видно, что модель дает лучшие результаты на коротком начальном временном интервале, чем на последующем, что ожидаемо. Некоторое несоответствие сигналов на коротком начальном временном интервале (550 мкс) можно объяснить влиянием переходной характеристики трансформатора тока и переходных процессов во вторичных цепях, которые не учитываются в модели. Это вызывает искажения фронтов волн и явление «звона» в сигналах. В то же время рассогласование сигналов по прошествии некоторого времени объясняется наличием в сигнале волн, отраженных от точек неоднородности реальной сети, которые не включены в модель. А кроме того – несоответствием коэффициентов отражения неоднородностей (например, шин подстанций), включенных в модель, с коэффициентами отражения реальных неоднородностей, и также несоответствием длин некоторых ЛЭП на модели и реальных ЛЭП.

4 Оценка переходной характеристики измерительного тракта токовых цепей трансформатора тока с использованием модельных и реальных сигналов

В дополнение стоит сказать, что возможно приблизительно рассчитать импульсную характеристику трансформатора тока и вторичных цепей, используя реальные и модельные сигналы, как показано ниже. При этом делается допущение, что разница между модельным сигналом и реальным сигналом в начале переходного процесса (несколько десятков микросекунд) объясняется только тем, что в модели не учтены только ТТ и его вторичные цепи. Тогда можно рассматривать ТТ со вторичными цепями как некоторый фильтр, входным сигналом которого является модельный сигнал, а выходным – реальный сигнал. В этом случае импульсная характеристика такого фильтра (ТТ со вторичными цепями) оценивается известными

методами с использованием входного и выходного сигналов. Возможно использовать вычисленную таким образом импульсную характеристику, чтобы применить деконволюцию реального сигнала (свертка реального сигнала с обратной импульсной характеристикой). Однако в этом случае проще и эффективнее выполнить свертку рассчитанной импульсной характеристики с модельным сигналом.

Модельный сигнал, прошедший такую обработку, показан на рисунке А.6. На рисунке А.5,а,б и рисунке А.6,а,б показаны одни и те же сигналы, за исключением того, что модельные сигналы, имеют различную обработку. Видно, что сигналы на рисунке А.6 совпадают лучше, чем сигналы, показанные на рисунке А.5.

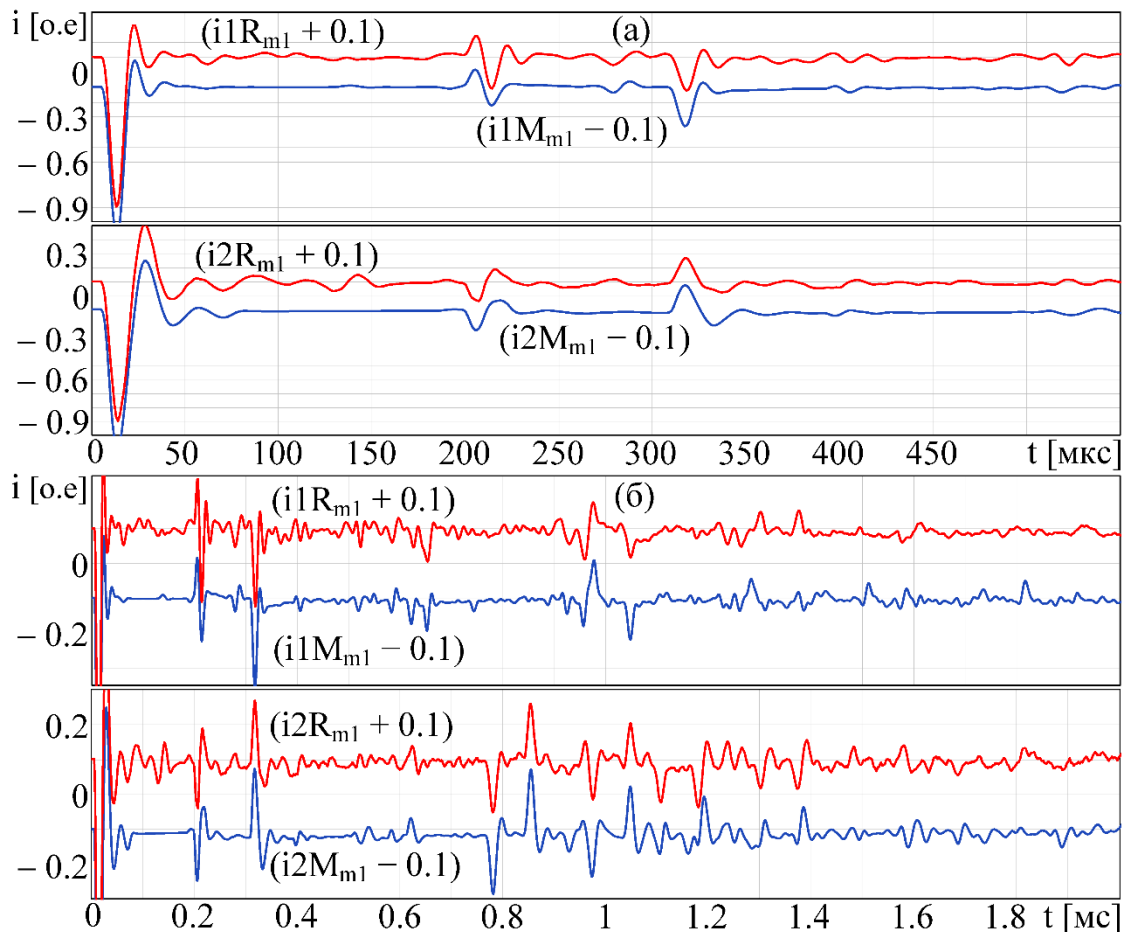


Рисунок А.6 – Сравнение реальных сигналов и модельных сигналов, свернутых с импульсной характеристикой ТТ, на двух интервалах времени: 550 мкс (а) и 2000 мкс (б)

Рассчитаем коэффициенты корреляции еще раз, но теперь для сигналов на рисунке А.6. На интервале времени 0-550 мкс значения корреляции равны 0,984 и 0,987 для сигналов $i1M$, $i1R$ (ПС Парская) и $i2M$, $i2R$ (ПС Сасово) соответственно. На временном интервале 550–1275 мкс значения корреляции составляют 0,797 и 0,804 для тех же сигналов. А для временного интервала 1275–2000 мкс значения корреляции равны 0,274 и 0,626 соответственно. Особо стоит отметить, что при такой обработке сигналов сигналы имеют практически идеальное совпадение в первые несколько десятков микросекунд. Это связано с тем, что импульсная характеристика фильтра (ТТ

с вторичными цепями) рассчитывалась, с использованием сигналов на начальном интервале. Поэтому для большей достоверности следует рассчитать еще и коэффициенты корреляции на интервале 100 – 550 мкс. Значения корреляции для этого интервала равны 0,878 и 0,866 для сигналов $i1M$, $i1R$ (ПС Парская) и $i2M$, $i2R$ (ПС Сасово) соответственно.

Значения корреляции подтверждают, что предложенный способ обработки сигналов увеличивает совпадение сигналов, но в основном только для начального временного интервала. Таким образом, имея реальные осциллограммы, нет строгой необходимости включать ТТ с вторичными цепями в модель, потому что это может быть учтено при обработке сигналов. Далее в демонстрационных целях на рисунках будут использоваться модельные сигналы, прошедшие именно такую обработку.

5 Влияние различных элементов, включенных в модель, на совпадение сигналов

Оценим, как различные элементы, включенные в модель, влияют на совпадение сигналов. Чтобы оценить влияние различных элементов на точность модели, сравним различные сигналы, полученные путем исключения элементов разных типов из модели. Эти сигналы показаны для сравнения на рисунке А.7.

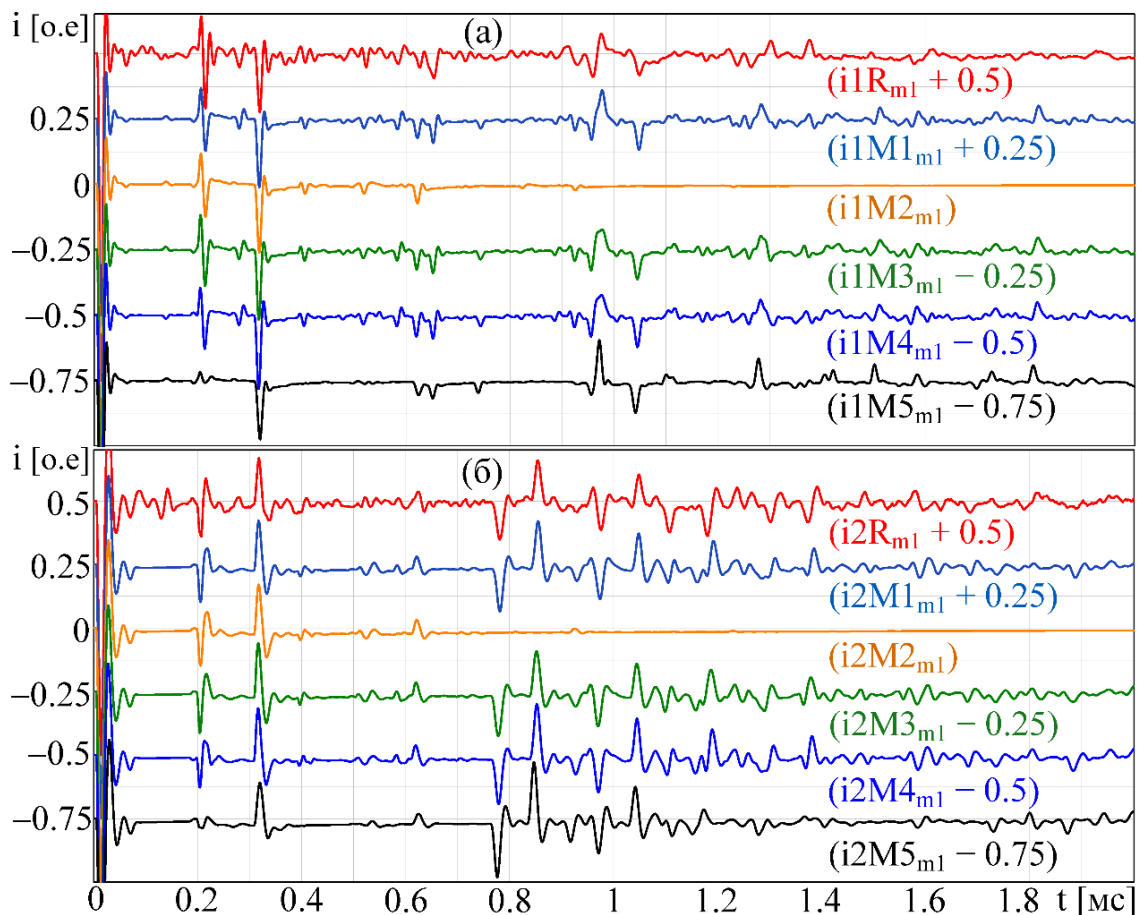


Рисунок А.7 – Сравнение реальных и модельных сигналов, полученных на разных моделях

На рисунке А.7 сверху вниз показаны реальный сигнал и пять модельных сигналов, полученных на разных моделях, которые отличаются тем, что они полученные при удалении выбранных элементов модели. Эти пять сигналов получены на следующих моделях (сверху вниз на рисунке А.7):

- 1) Полная модель (рисунок А.3);
- 2) Модель, в которой смежные линии не имеют отражений (волны, падающие в такую линию, не будут отражаться от ее конца также как в случае с линией бесконечной длины);
- 3) Модель, в которой исключено оборудование ВЧ связи по ЛЭП;
- 4) Модель без пунктов транспозиции;
- 5) Модель без эквивалентных емкостей.

Как видно из рисунка А.7, некоторые из волн значительно изменяются, когда эквивалентные емкости исключаются из модели (сигналы $i1M5$, $i2M5$ на рисунке А.7). В частности, коэффициент отражения на ПС Сасово в этом случае значительно меньше по модулю, так что волны, отраженные от этой точки, очень малы. Это связано с тем, что к шинам ПС Сасово подключены только две линии электропередачи, а их волновые сопротивления практически равны. Когда в модель добавляется значительная емкость, подключенная к этим шинам, коэффициент отражения больше зависит от значения этой емкости, чем от отношения волновых сопротивлений ЛЭП, подключенных к шинам ПС. В то же время видно, что в том же случае (модель 5) волны, отраженные от ПС Парская, изменились значительно меньше. Это связано с тем, что к шинам ПС Парская подключено более двух линий, и коэффициент отражения в основном зависит от соотношения волновых сопротивлений линий и их количества.

Теперь рассчитаем коэффициенты корреляции между реальными сигналами и модельными сигналами, полученными на разных моделях. Значения коэффициента корреляции в зависимости от модели и метода обработки сигналов представлены в таблице А.1. Таблица разделена на несколько частей, каждая часть содержит значения корреляции для разных интервалов времени, на которых сравниваются сигналы. Каждая ячейка таблицы содержит два значения: первое - это корреляция между реальным и модельным сигналами на ПС Парская, а второе значение - корреляция между сигналами на ПС Сасово.

В таблице А.1 представлены следующие методы обработки сигналов. В методе 1 сигналы сглаживались с использованием окна данных 5 мкс, затем выделялись высокочастотные составляющие с использованием фильтрации согласно выражению (3.31) с окном данных 10 мкс. Кроме того, модельные сигналы были свернуты с импульсной характеристикой ТТ, как изложено выше. Метод 2 аналогичен методу 1, за исключением того, что модельные сигналы не свертываются с импульсной характеристикой ТТ. В методе 3 к сигналам применялась только фильтрация по выражению (3.27) без предварительной сглаживающей фильтрации. Также стоит

напомнить, что рассматриваются только модальные составляющие сигналов тока (все сигналы предварительно обработаны согласно выражению (А.1)).

Строки в таблице отсортированы по значениям корреляции в порядке убывания сверху вниз. Сортировка производилась по совокупному значению, вычисленному как взвешенная сумма, при этом методу обработки 2 отдается предпочтение и больший вес. Таким образом, наглядно показано, какая модель более точна на выбранном временном интервале. Значения корреляции ниже порога значимости (0,7) выделены серым цветом.

Таблица А.1 – Коэффициенты корреляции реальных и модельных сигналов для разных моделей, способов обработки сигналов и для разных временных интервалов

| Тип модели | Метод обработки сигналов | | |
|--|--------------------------|---------------|---------------|
| | 1 | 2 | 3 |
| Интервал времени 0-550 μs | | | |
| 1 (полная) | 0,984 / 0,987 | 0,952 / 0,846 | 0,917 / 0,789 |
| 2 (без отражений от концов смежных ЛЭП) | 0,982 / 0,987 | 0,951 / 0,846 | 0,916 / 0,789 |
| 3 (без оборудования ВЧ связи по ЛЭП) | 0,981 / 0,981 | 0,948 / 0,823 | 0,902 / 0,753 |
| 4 (без пунктов транспозиции) | 0,976 / 0,981 | 0,95 / 0,822 | 0,904 / 0,75 |
| 5 (без эквивалентных емкостей) | 0,954 / 0,974 | 0,936 / 0,875 | 0,911 / 0,822 |
| 6 (без ВЧ связи, без экв. емкостей) | 0,955 / 0,965 | 0,926 / 0,859 | 0,889 / 0,811 |
| Интервал времени 100-550 μs | | | |
| 1 (полная) | 0,878 / 0,866 | 0,839 / 0,758 | 0,818 / 0,692 |
| 3 (без оборудования ВЧ связи по ЛЭП) | 0,895 / 0,86 | 0,837 / 0,727 | 0,8 / 0,658 |
| 2 (без отражений от концов смежных ЛЭП) | 0,865 / 0,871 | 0,826 / 0,758 | 0,806 / 0,692 |
| 4 (без пунктов транспозиции) | 0,88 / 0,851 | 0,842 / 0,699 | 0,786 / 0,598 |
| 5 (без эквивалентных емкостей) | 0,666 / 0,744 | 0,635 / 0,677 | 0,615 / 0,637 |
| 6 (без ВЧ связи, без экв. емкостей) | 0,609 / 0,688 | 0,585 / 0,636 | 0,565 / 0,609 |
| Интервал времени 550-1275 μs | | | |
| 1 (полная) | 0,797 / 0,804 | 0,789 / 0,811 | 0,77 / 0,796 |
| 4 (без пунктов транспозиции) | 0,782 / 0,815 | 0,774 / 0,803 | 0,749 / 0,783 |
| 3 (без оборудования ВЧ связи по ЛЭП) | 0,794 / 0,773 | 0,785 / 0,78 | 0,763 / 0,762 |
| 5 (без эквивалентных емкостей) | 0,649 / 0,664 | 0,64 / 0,671 | 0,622 / 0,656 |
| 6 (без ВЧ связи, без экв. емкостей) | 0,63 / 0,674 | 0,622 / 0,666 | 0,605 / 0,647 |
| 2 (без отражений от концов смежных ЛЭП) | 0,277 / 0,082 | 0,269 / 0,071 | 0,267 / 0,072 |

Анализ таблицы приводит к следующим выводам:

1) В модель следует включать не только саму моделируемую линию, но и другие элементы;

- 2) На совпадение сигналов существенно влияет используемый метод обработки сигналов;
- 3) Различные элементы, включенные в модель, по-разному влияют на результат моделирования. При этом одним из наиболее важных элементов является емкость, которая замещает силовое оборудование подстанции, так как при определенных условиях существенно влияет на коэффициент отражения и совпадение волновых сигналов.

Также стоит отметить, что, используя предложенный подход к оценке модели, можно достичь требуемого уровня точности модели за счет оптимизации параметров модели по критерию максимизации корреляции.

Полученные результаты показывают, что имитационные модели в PSCAD, при правильном подходе к их разработке, позволяют получать достоверные сигналы, которые можно с полным основанием использовать для проведения анализа переходных процессов, а также для имитационного моделирования способов АПВ и ОМП КВЛ.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б**Сопоставление реальных сигналов нескольких КЗ на КВЛ 220кВ Тамань-Кафа и сигналов, полученных на имитационной модели КВЛ****1. Сопоставление реальных и модельных сигналов без учета импульсной характеристики токовых измерительных цепей**

На рисунках Б.1–Б.10 изображено сопоставление реальных и модельных сигналов последовательно для случаев КЗ перечисленных в таблице 2.2 п.2.4.3. Параметры КЗ также отображены на рисунках. Красной линией отображен реальный сигнал (например, $i_{1R(\phi.C)}$), синей – модельный (например, $i_{1M(\phi.C)}$). Каждому случаю КЗ соответствует два рисунка, на которых изображены одни и те же сигналы, но в разных временных масштабах. Левая часть рисунков под буквой «а» отображает сигналы тока со стороны подстанции Тамань (i_1), а правая часть рисунок под буквой «б» отображает сигнал тока со стороны подстанции Кафа (i_2). На верхних графиках рисунков отображены сигналы не прошедшие никакой обработки за исключением вычитания из всех выборок сигнала значения сигнала непосредственно перед возникновением волны (i_{1R} , i_{1M} , i_{2R} и i_{2M}). На нижних графиках рисунков показаны те же сигналы, но прошедшие дифференциально-сглаживающую фильтрацию, рассмотренную в п.3.4, с окном данных фильтра 8 мкс, а также нормированные по амплитуде (Δi_{1R} , Δi_{1M} , Δi_{2R} и Δi_{2M}). Дополнительно на рисунках размещены значения коэффициента корреляции сигналов, изображённых на соответствующих графиках. Стоит отметить, что сигналы с разных концов ЛЭП совмещены по времени прихода первой волны, поэтому они не отображают временной сдвиг появления первой волны на разных концах ЛЭП.

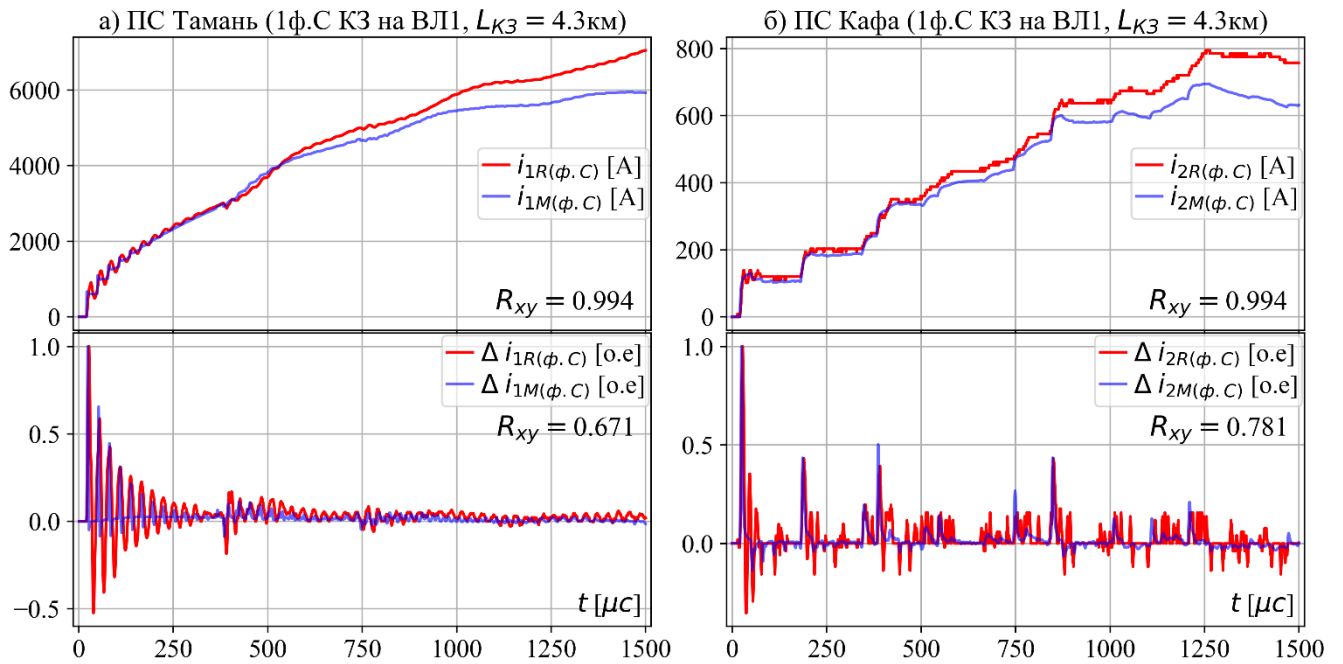


Рисунок Б.1 – Сопоставление реальных и модельных сигналов для случая КЗ №1 на большом интервале времени

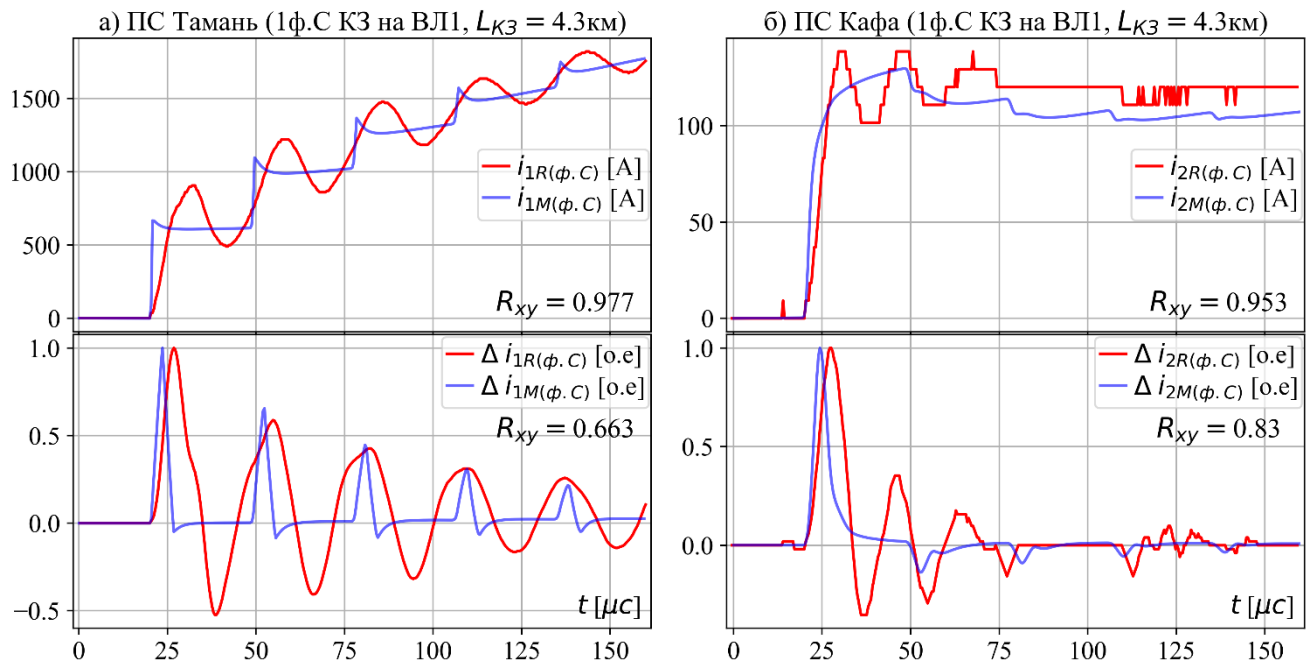


Рисунок Б.2 – Сопоставление реальных и модельных сигналов для случая КЗ №1 на коротком интервале времени

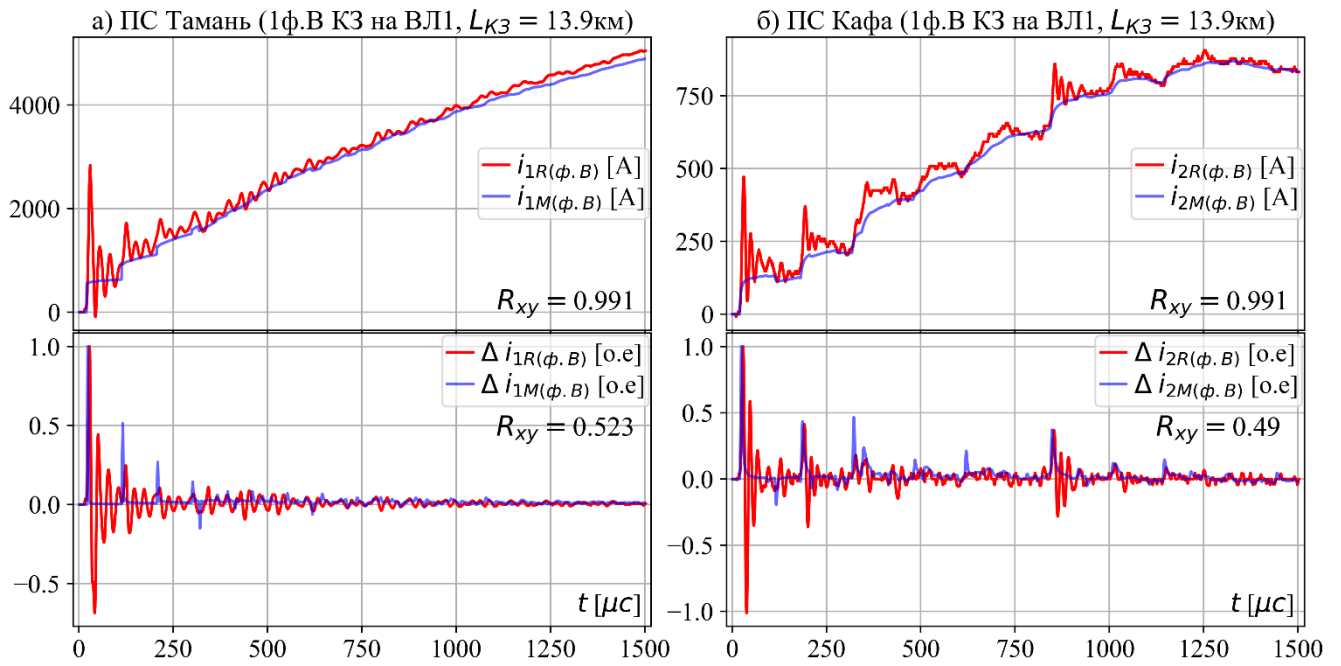


Рисунок Б.3 – Сопоставление реальных и модельных сигналов для случая КЗ №2 на большом интервале времени

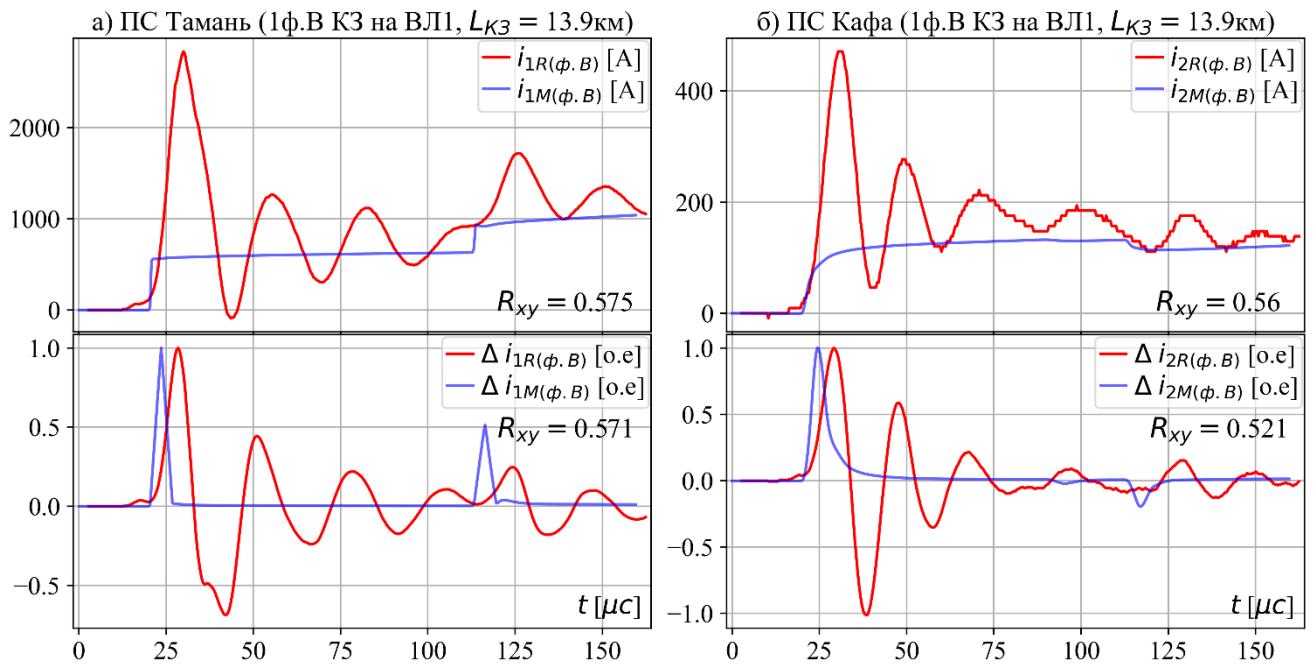


Рисунок Б.4 – Сопоставление реальных и модельных сигналов для случая КЗ №2 на коротком интервале времени

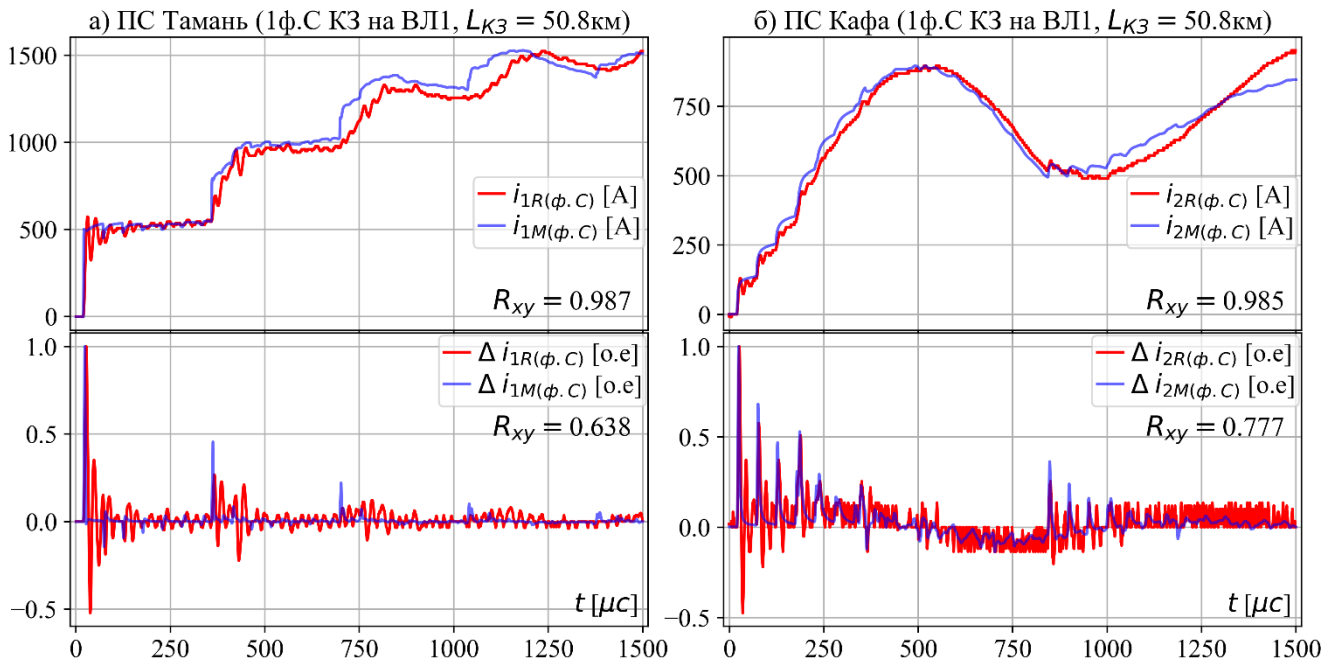


Рисунок Б.5 – Сопоставление реальных и модельных сигналов для случая КЗ №3 на большом интервале времени

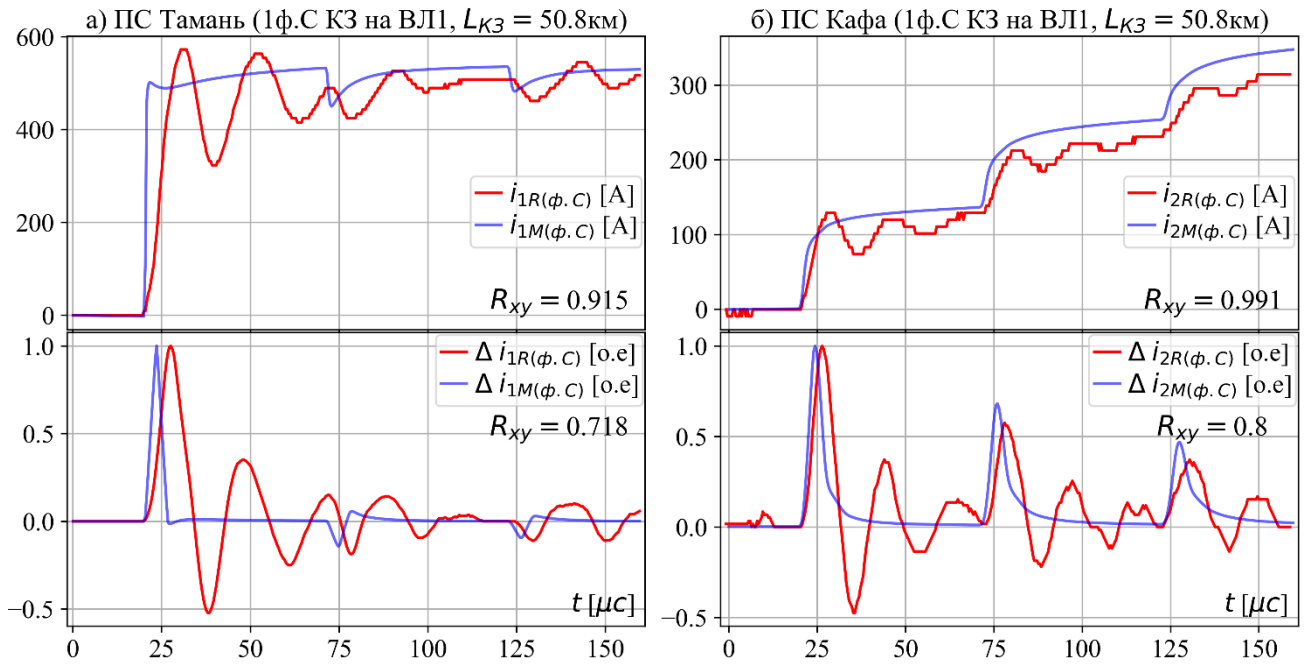


Рисунок Б.6 – Сопоставление реальных и модельных сигналов для случая КЗ №3 на коротком интервале времени

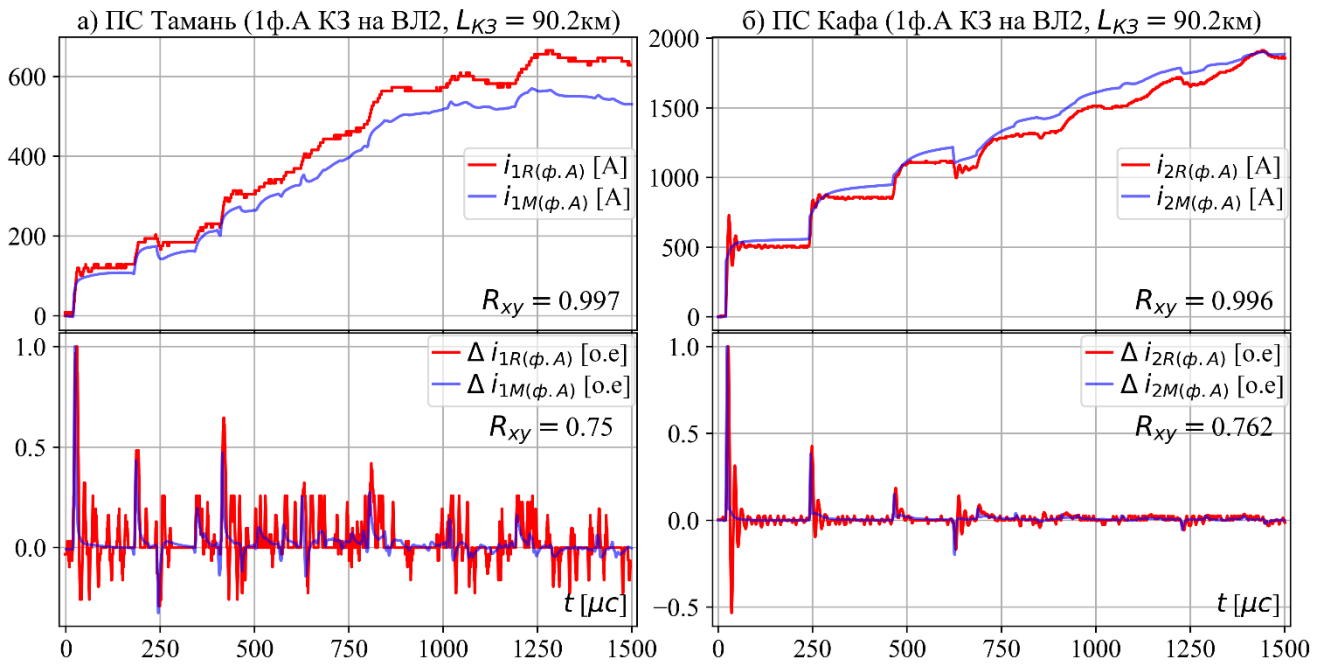


Рисунок Б.7 – Сопоставление реальных и модельных сигналов для случая КЗ №4 на большом интервале времени

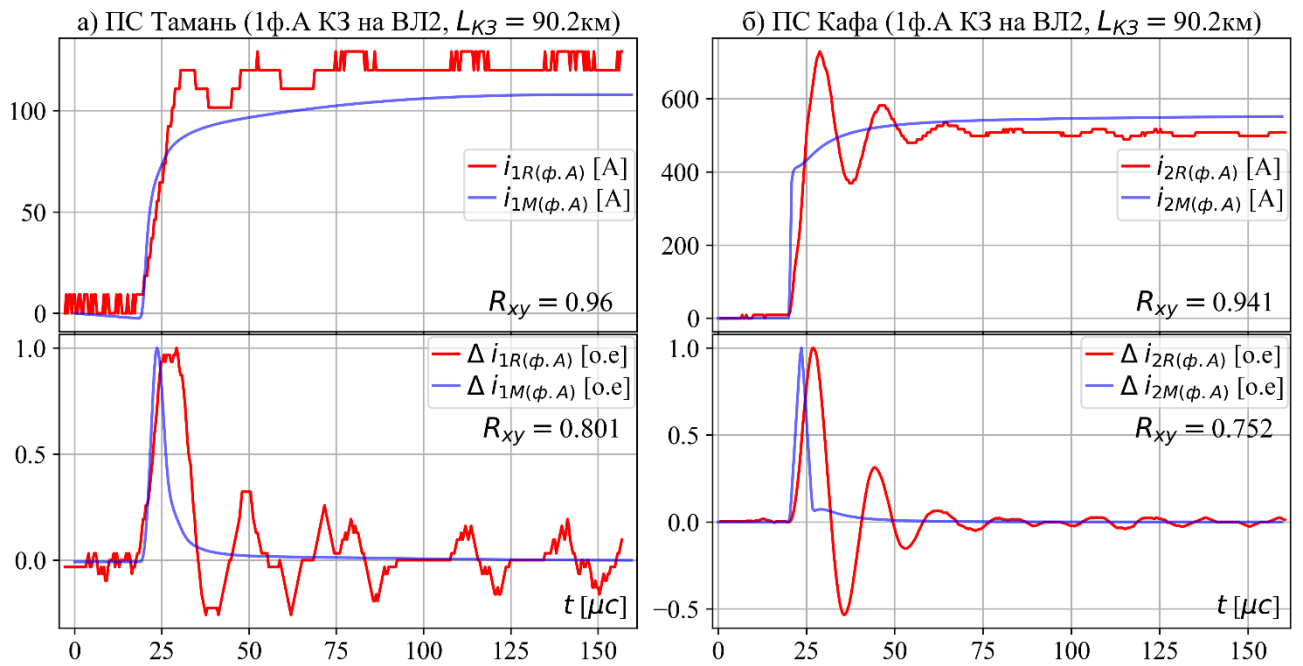


Рисунок Б.8 – Сопоставление реальных и модельных сигналов для случая КЗ №4 на коротком интервале времени

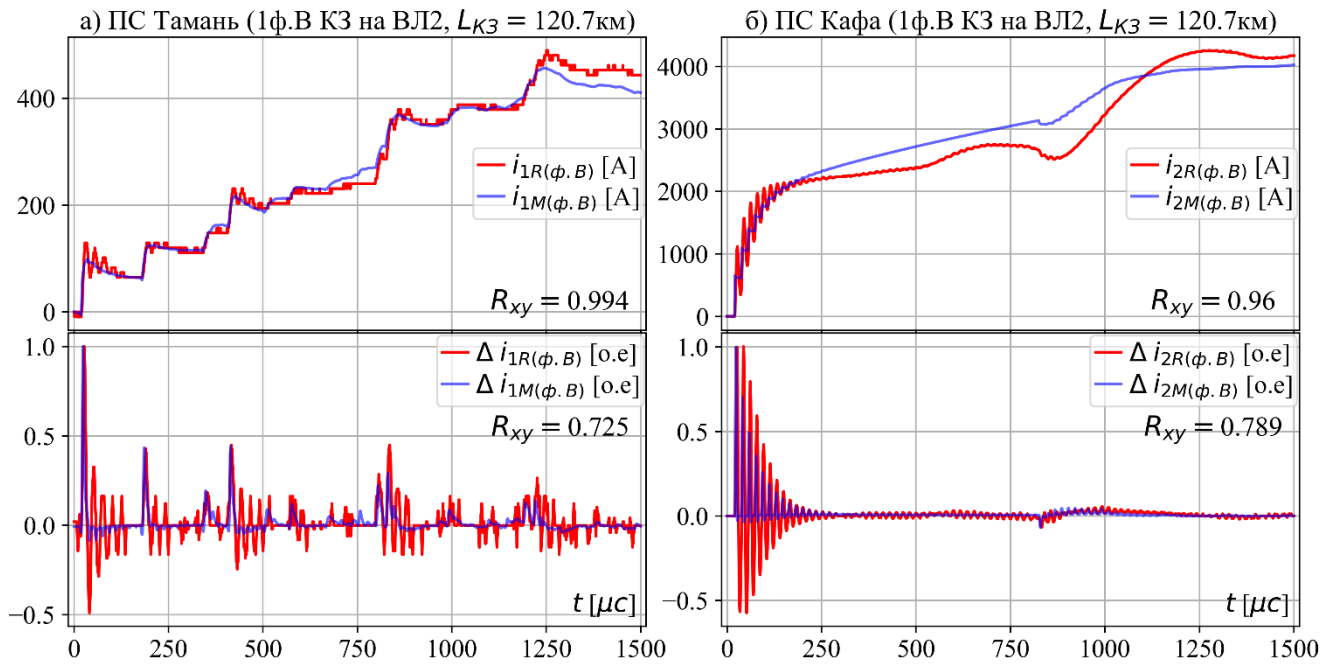


Рисунок Б.9 – Сопоставление реальных и модельных сигналов для случая КЗ №5 на большом интервале времени

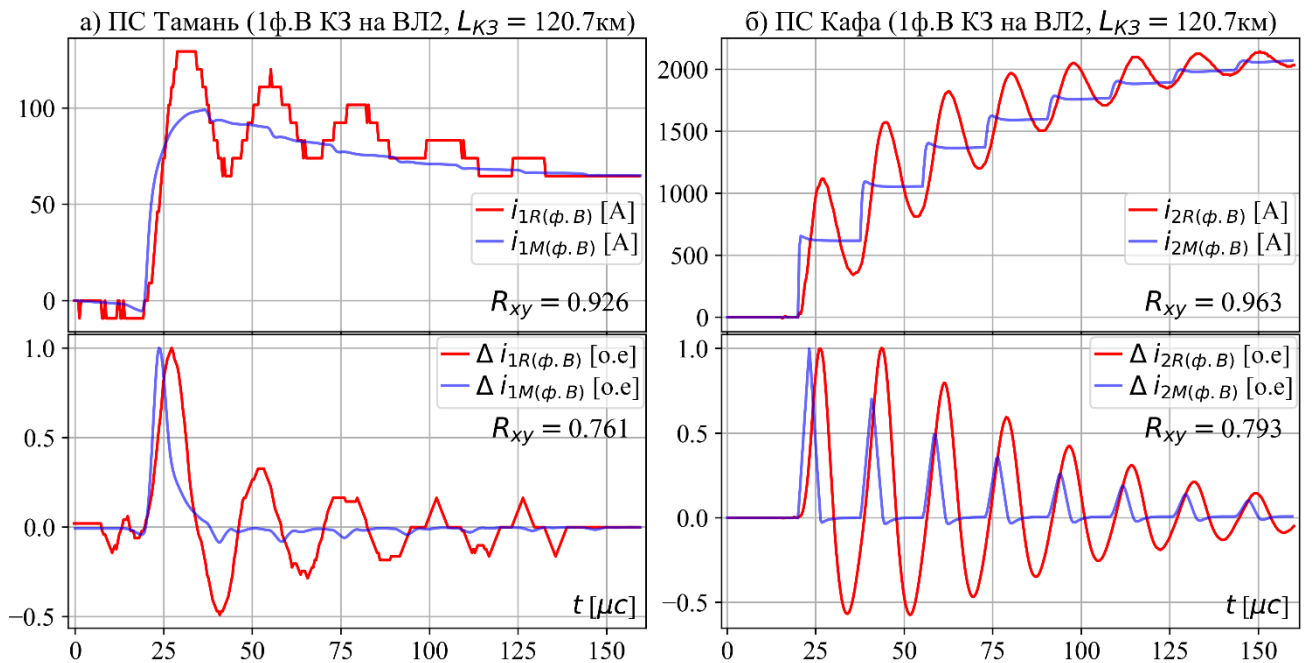


Рисунок Б.10 – Сопоставление реальных и модельных сигналов для случая КЗ №5 на коротком интервале времени

2. Сопоставление реальных и модельных сигналов с учетом импульсной характеристики токовых измерительных цепей

На рисунках Б.11 – Б.20 изображено сопоставление реальных сигналов и модельных сигналов, свернутых с соответствующими импульсными характеристиками. Порядок рисунков, цветовая маркировка и обозначения полностью соответствует рисункам Б.1 – Б.10, представленным выше.

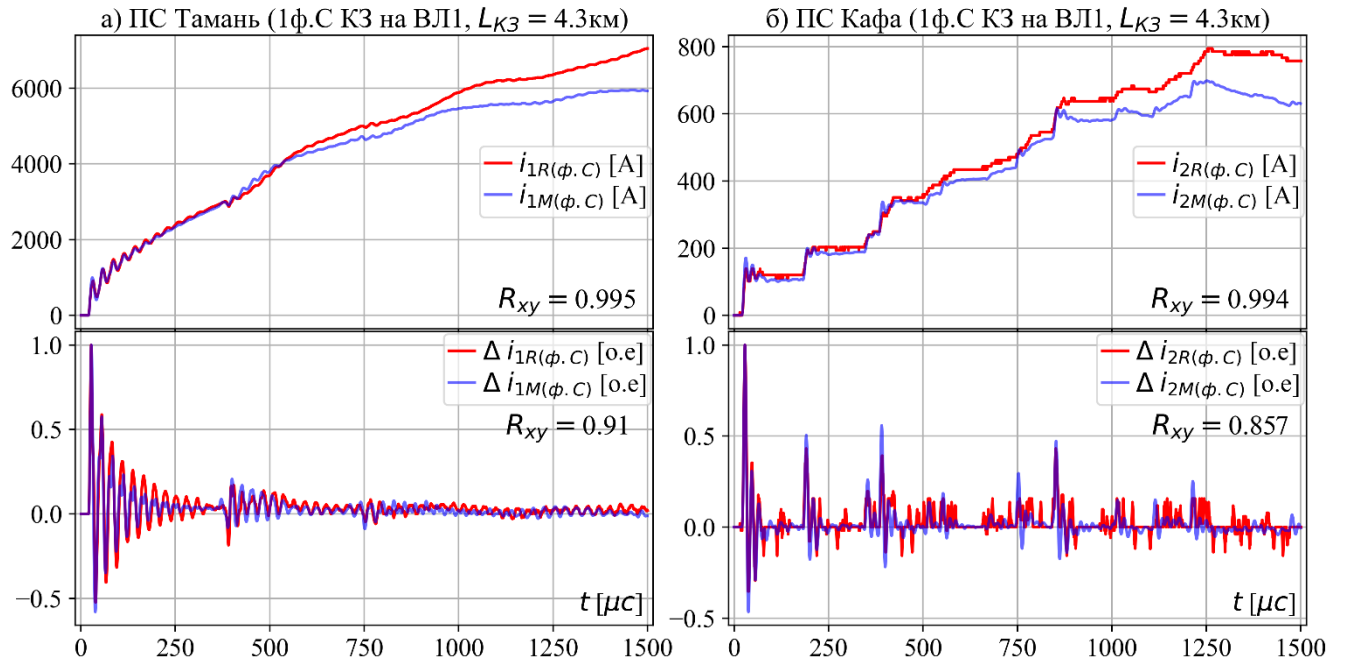


Рисунок Б.11 – Сопоставление реальных и модельных сигналов с учетом импульсной

характеристики измерительного звена для случая КЗ №1 на большом интервале времени

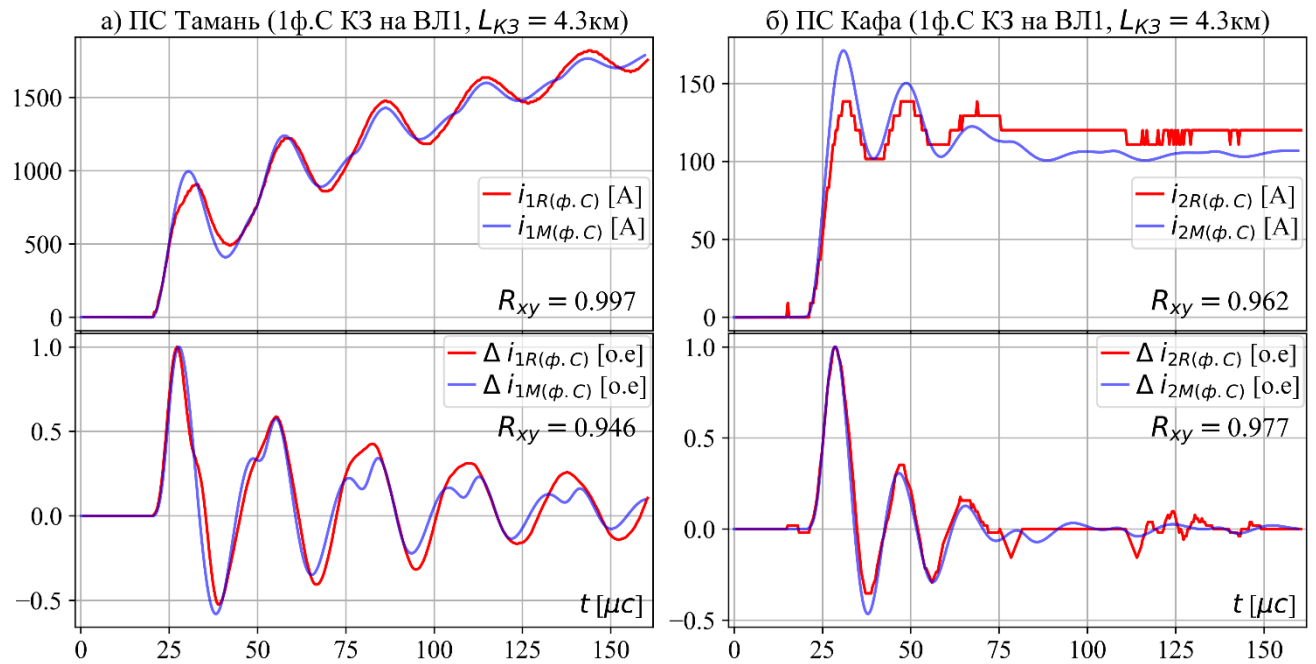


Рисунок Б.12 – Сопоставление реальных и модельных сигналов с учетом импульсной

характеристики измерительного звена для случая КЗ №1 на коротком интервале времени

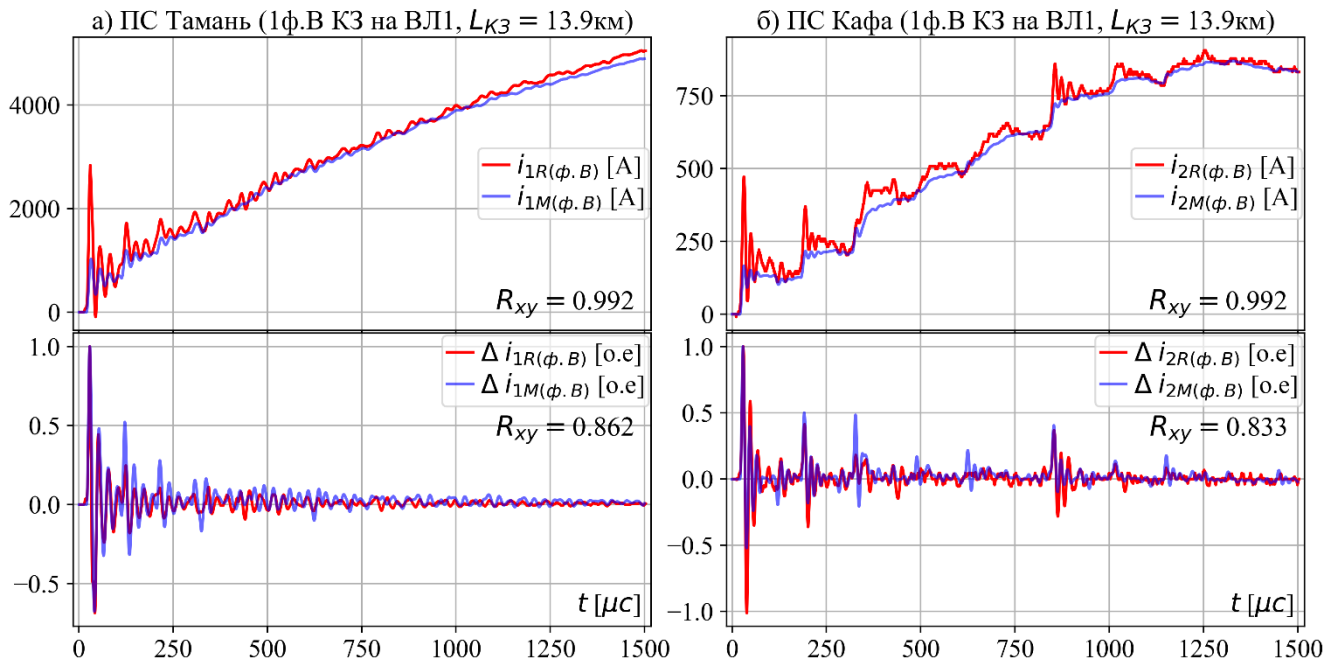


Рисунок Б.13 – Сопоставление реальных и модельных сигналов с учетом импульсной характеристики измерительного звена для случая КЗ №2 на большом интервале времени

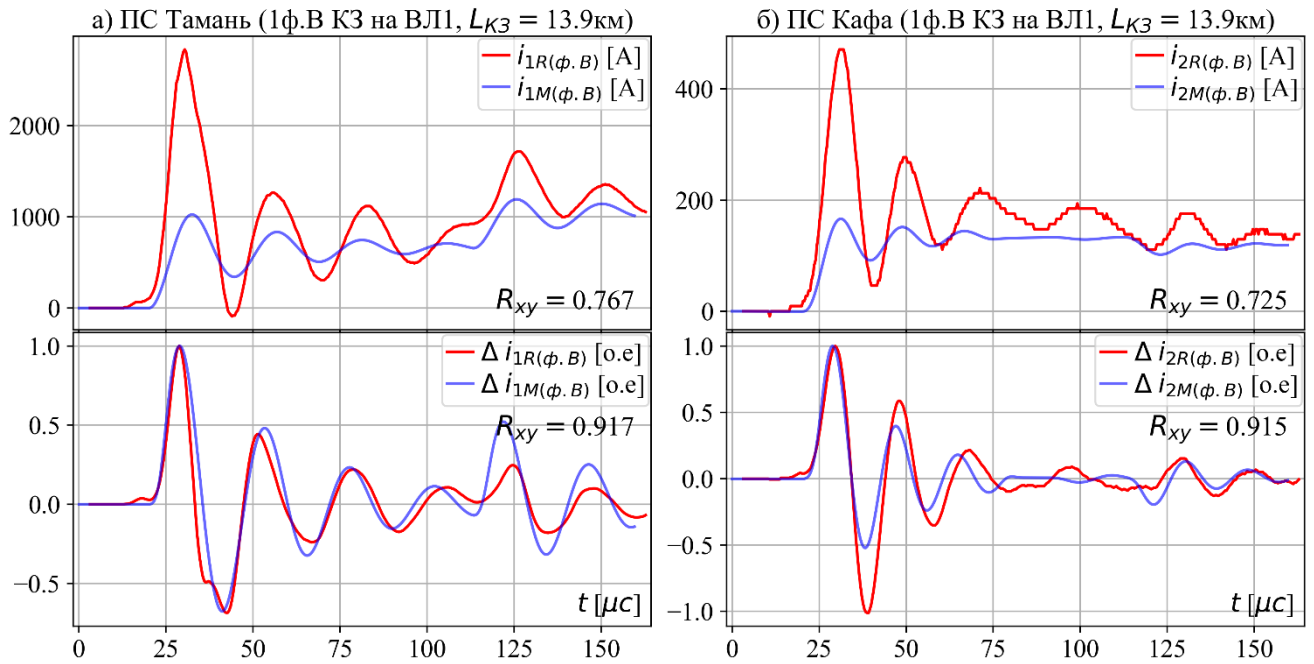


Рисунок Б.14 – Сопоставление реальных и модельных сигналов с учетом импульсной характеристики измерительного звена для случая КЗ №2 на коротком интервале времени

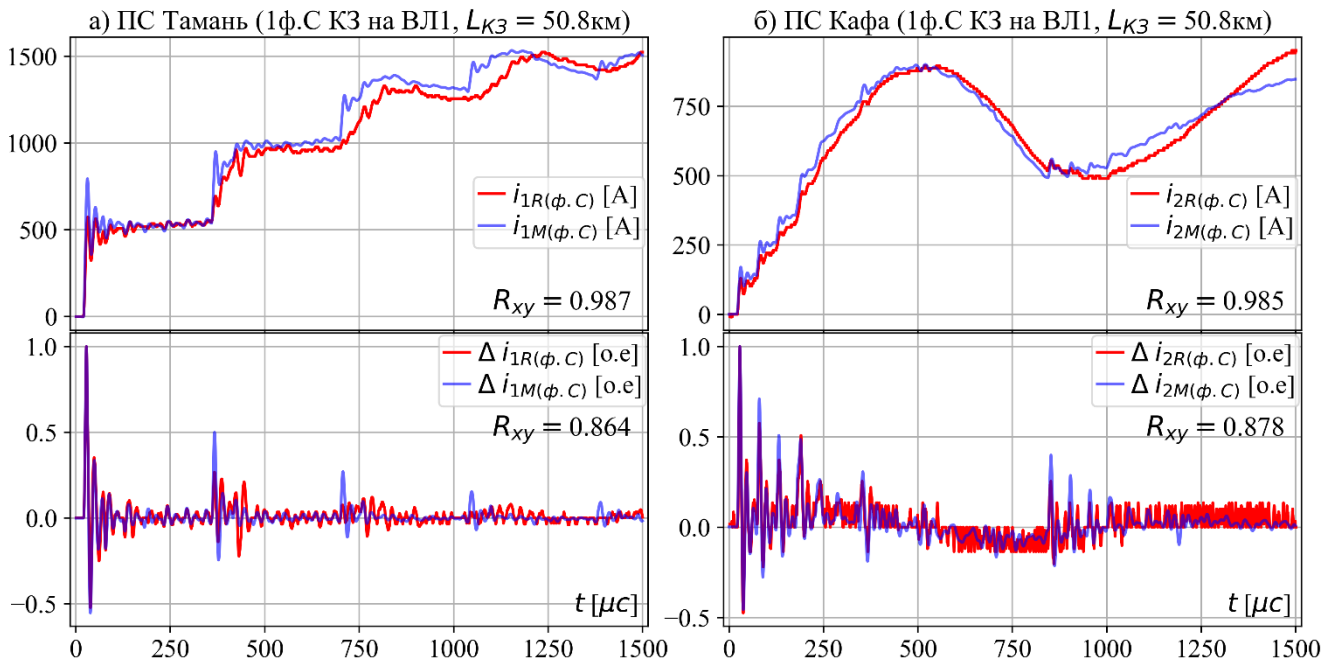


Рисунок Б.15 – Сопоставление реальных и модельных сигналов с учетом импульсной характеристики измерительного звена для случая КЗ №3 на большом интервале времени

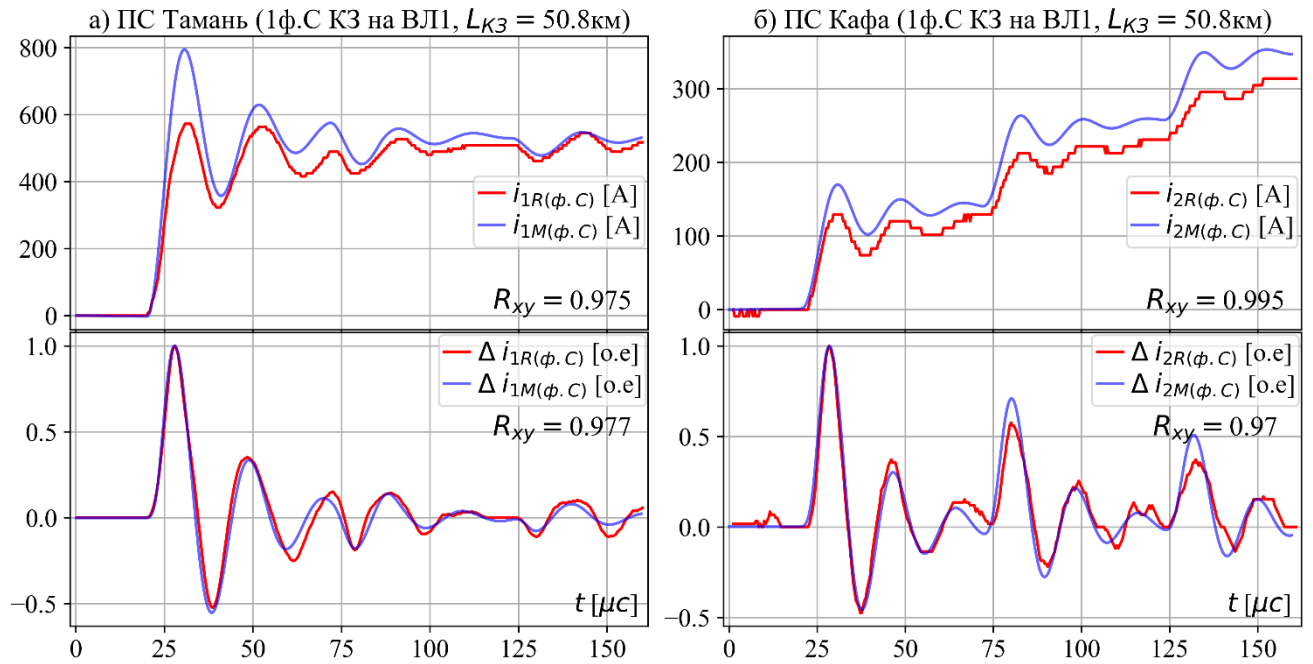


Рисунок Б.16 – Сопоставление реальных и модельных сигналов с учетом импульсной характеристики измерительного звена для случая КЗ №3 на коротком интервале времени

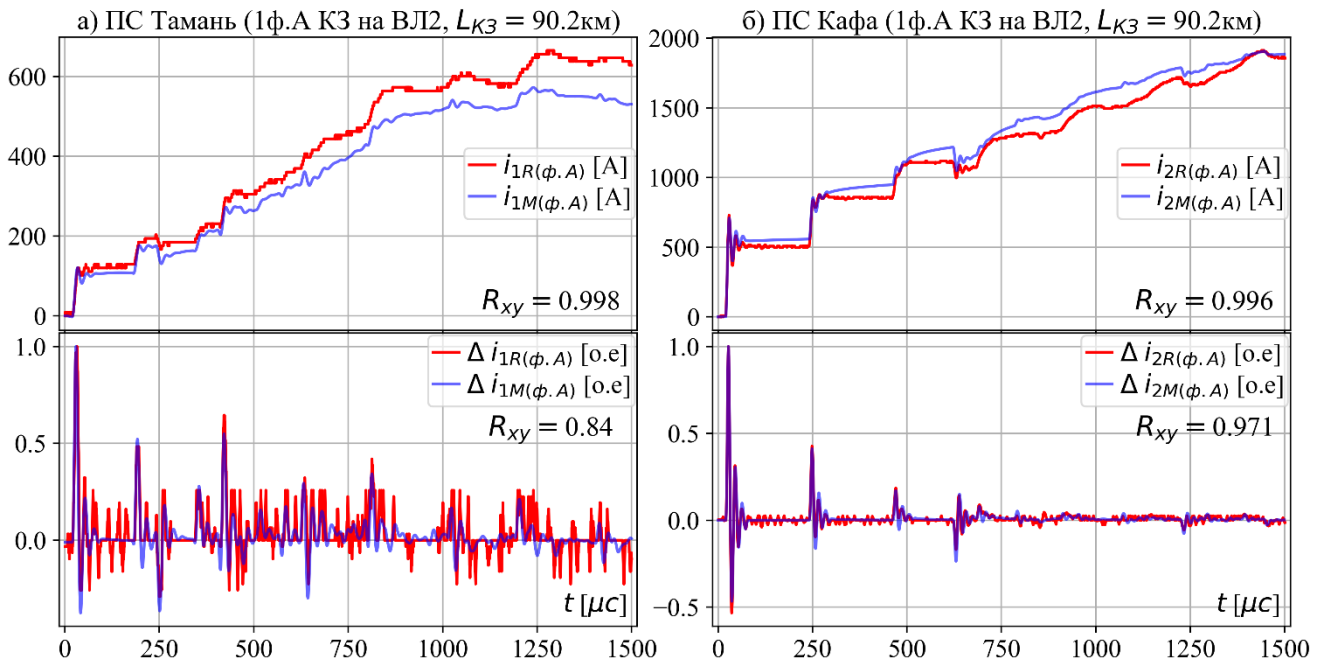


Рисунок Б.17 – Сопоставление реальных и модельных сигналов с учетом импульсной характеристики измерительного звена для случая КЗ №4 на большом интервале времени

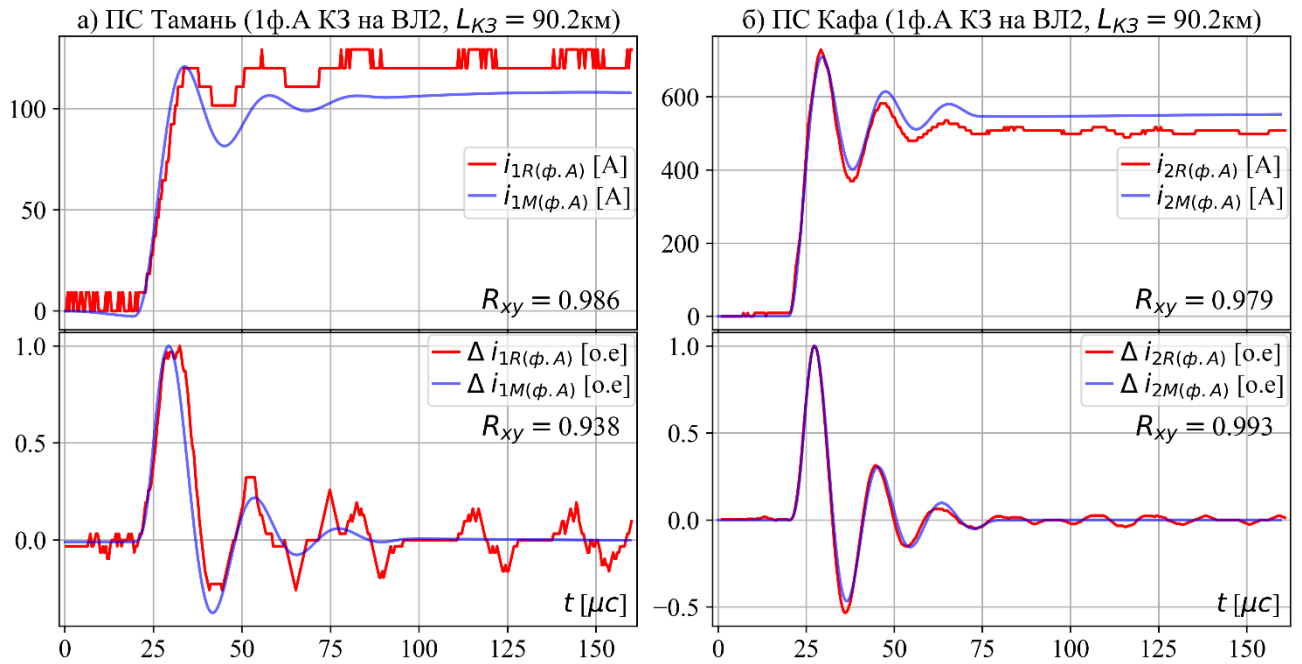


Рисунок Б.18 – Сопоставление реальных и модельных сигналов с учетом импульсной характеристики измерительного звена для случая КЗ №4 на коротком интервале времени

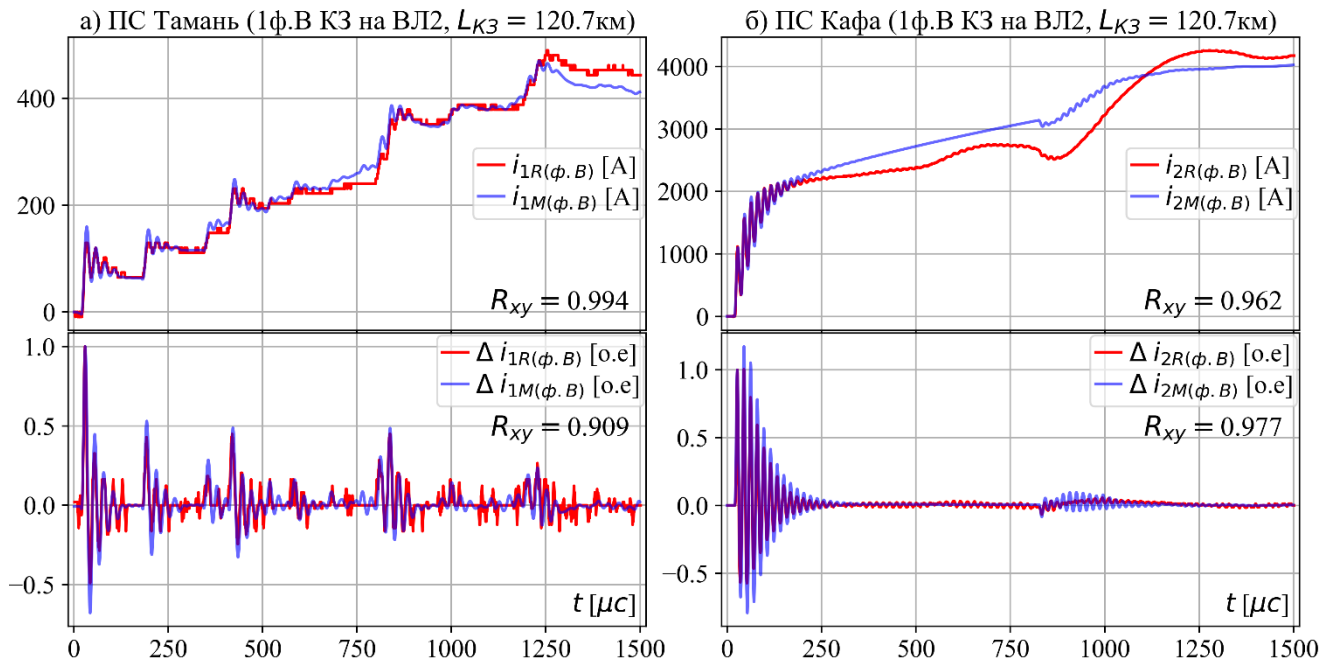


Рисунок Б.19 – Сопоставление реальных и модельных сигналов с учетом импульсной характеристики измерительного звена для случая КЗ №5 на большом интервале времени

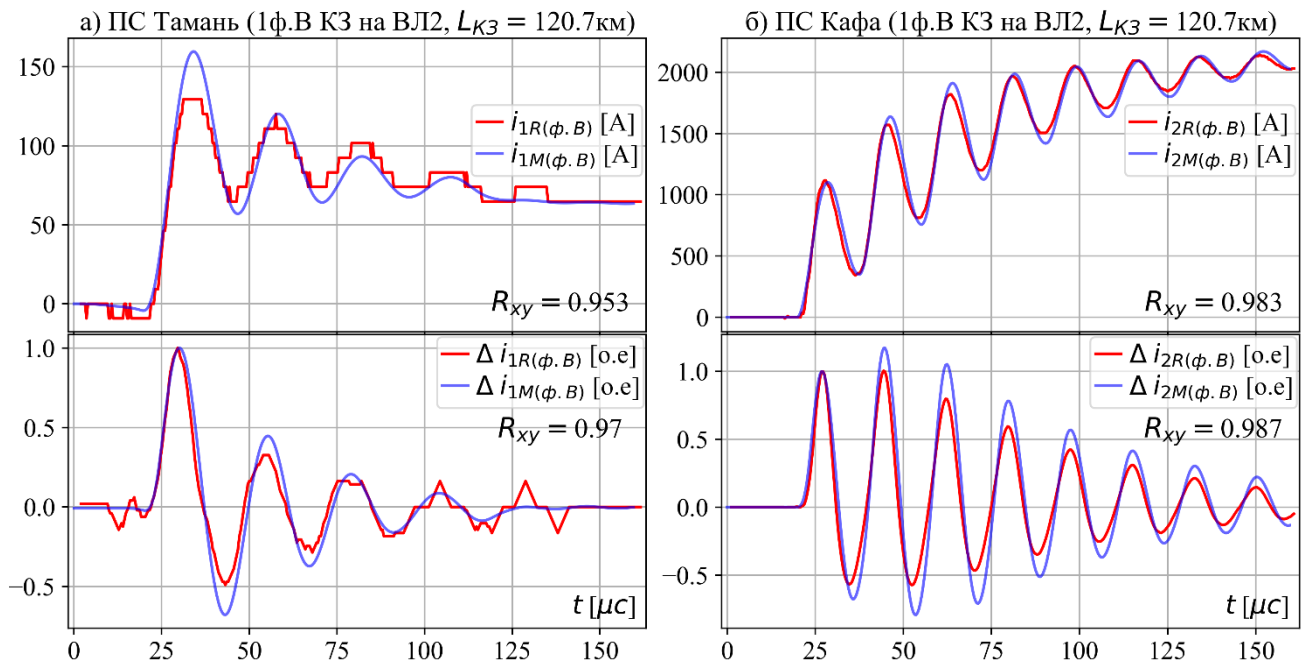


Рисунок Б.20 – Сопоставление реальных и модельных сигналов с учетом импульсной характеристики измерительного звена для случая КЗ №5 на коротком интервале времени

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Функции и алгоритмы программного обеспечения программно-аппаратного комплекса опытного устройства АПВ и ОМП КВЛ

1. Общие положения

Описание функций и алгоритмов программного обеспечения (ПО) опытного устройства АПВ КВЛ составлены с учетом разработанной функциональной и аппаратной структуры устройства (представлены в главе 4) и технического задания на разработку программно-аппаратного комплекса опытного устройства АПВ КВЛ.

Для дальнейшего изложения функций и алгоритмов ПО эта структура рассматривается в виде системы вычислительных узлов и соединяющих их каналов связи. Таким образом далее будут представлены функции и алгоритмы ПО, определяющие работу вычислительных узлов, и требования к передаваемым по каналам связи сигналам и командам.

С учетом разработанной структуры устройства выделяются следующие вычислительные узлы (глава 4):

- 1) Вычислительный узел обработки ВЧ сигналов (УВЧ) синхронно с реальным временем (СВ), далее УВЧСВ;
- 2) Вычислительный узел обработки ВЧ сигналов асинхронно с реальным временем (АВ), далее УВЧАВ;
- 3) Вычислительный узел связи (УС) между УВЧСВ и УВЧАВ, далее УС;
- 4) Вычислительный узел обработки общих сигналов (УОС) и принятия решений (ПР), далее УОСиПР;
- 5) Вычислительный узел обработки сигналов промышленной частоты (ПЧ), далее УОПЧ;
- 6) Вычислительный узел интерфейса человек-машина (ИЧМ), далее УИЧМ.

При дальнейшем изложении функций и алгоритмов под функцией понимается функция узла обработки, а не функция в программном коде. При реализации той или иной функции узла обработки могут быть использованы разные парадигмы программирования наиболее эффективные для решения задачи, выполняемой конкретной функцией узла обработки.

1.1 Общее описание вычислительного процесса устройства

Ниже на рисунках В.1.1 – В.1.5 представлена диаграмма (по частям), отображающая последовательность действий вычислительных узлов устройства АПВ и ОМП КВЛ при возникновении КЗ, в соответствии с указанными выше функциями и аппаратной структурой. На рисунках В.1.1 – В.1.5 цветные стрелки отображают передачу различных сигналов и параметров между специализированными функциями, выполняющими свою заданную роль (например, между функцией «Выделение модальных компонент» и функцией «Фильтрация сигналов»). В

правой части рисунков в блоках с пунктирными границами подписаны вычислительные узлы, выполняющие функции, расположенные на этом уровне (на одной линии по горизонтали) диаграммы. Более подробное изложение отдельных функций и алгоритмов опытного устройства АПВ и ОМП КВЛ приведено далее.

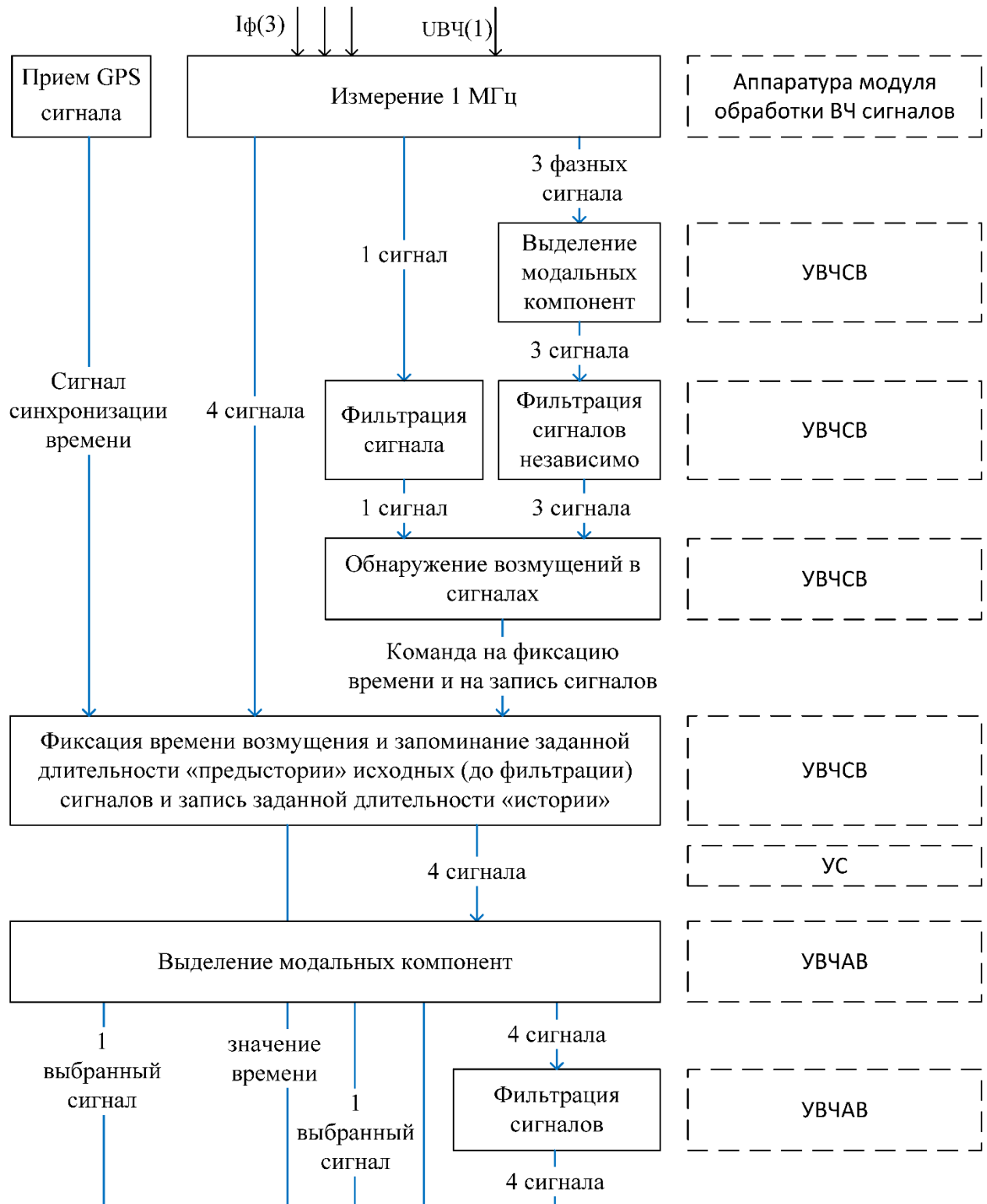


Рисунок В.1.1 – Диаграмма последовательности вычислений при возникновении КЗ (часть 1/5)

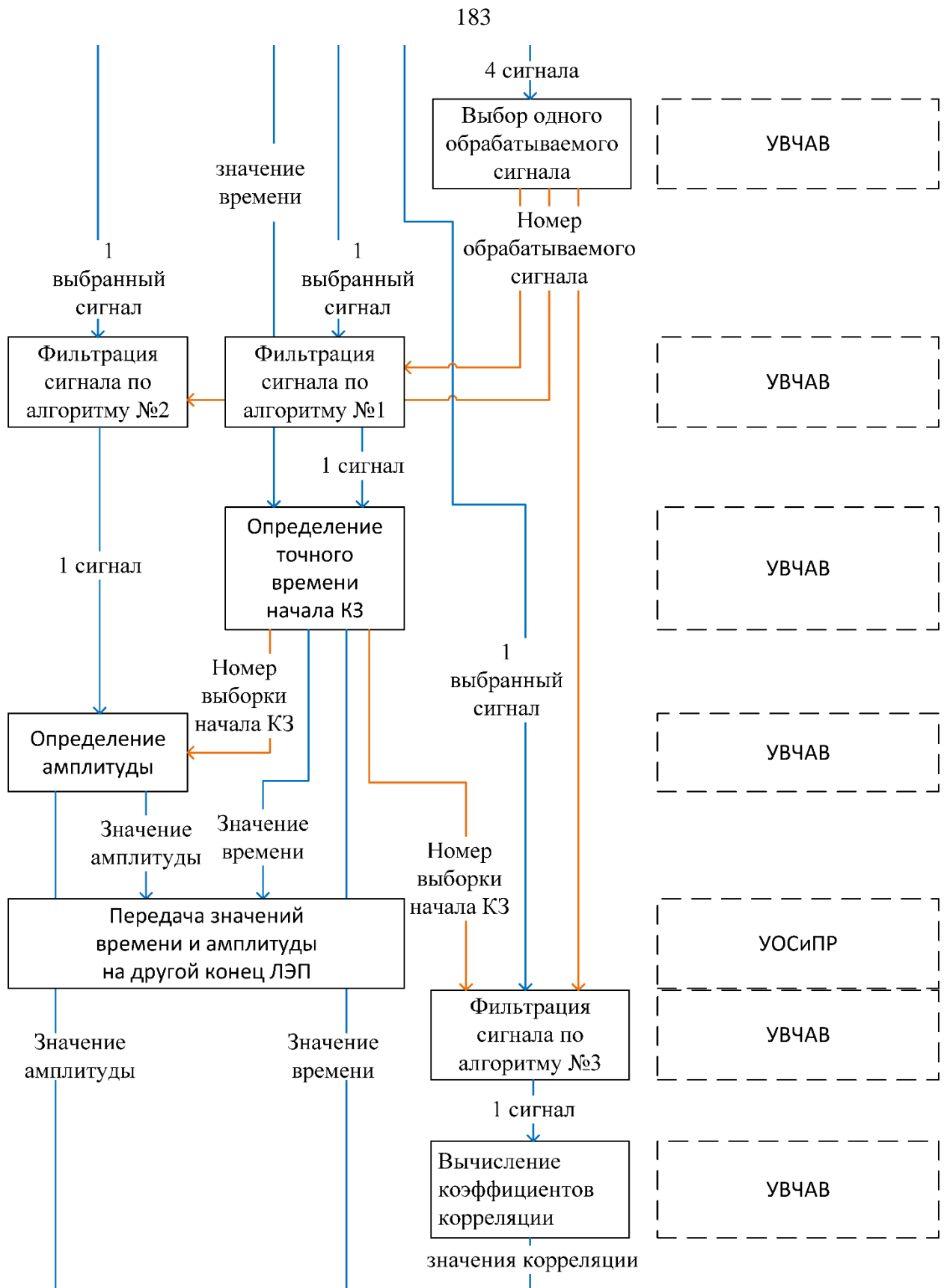


Рисунок В.1.2 – Диаграмма последовательности вычислений при возникновении КЗ (часть 2/5)

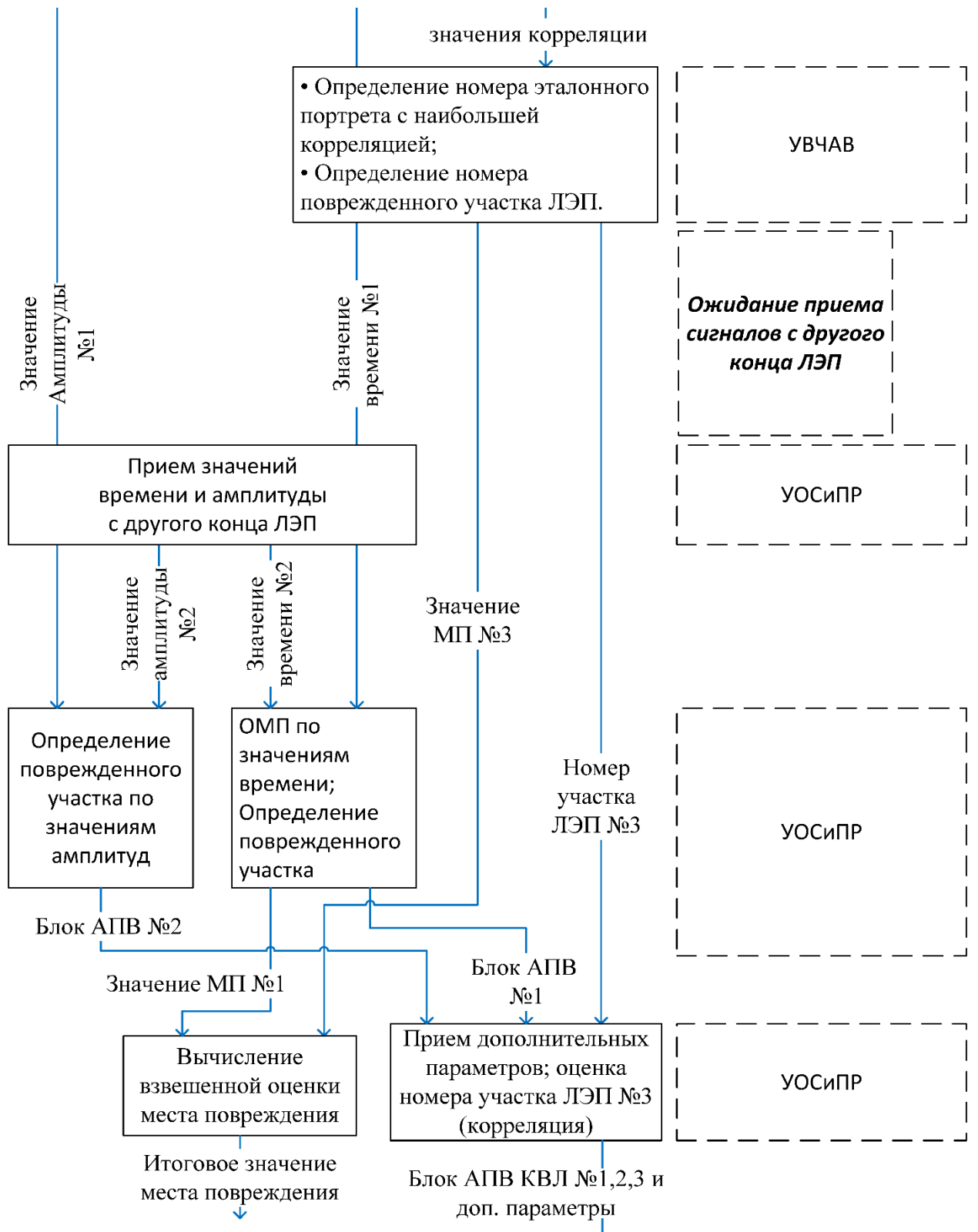


Рисунок В.1.3 – Диаграмма последовательности вычислений при возникновении КЗ (часть 3/5)

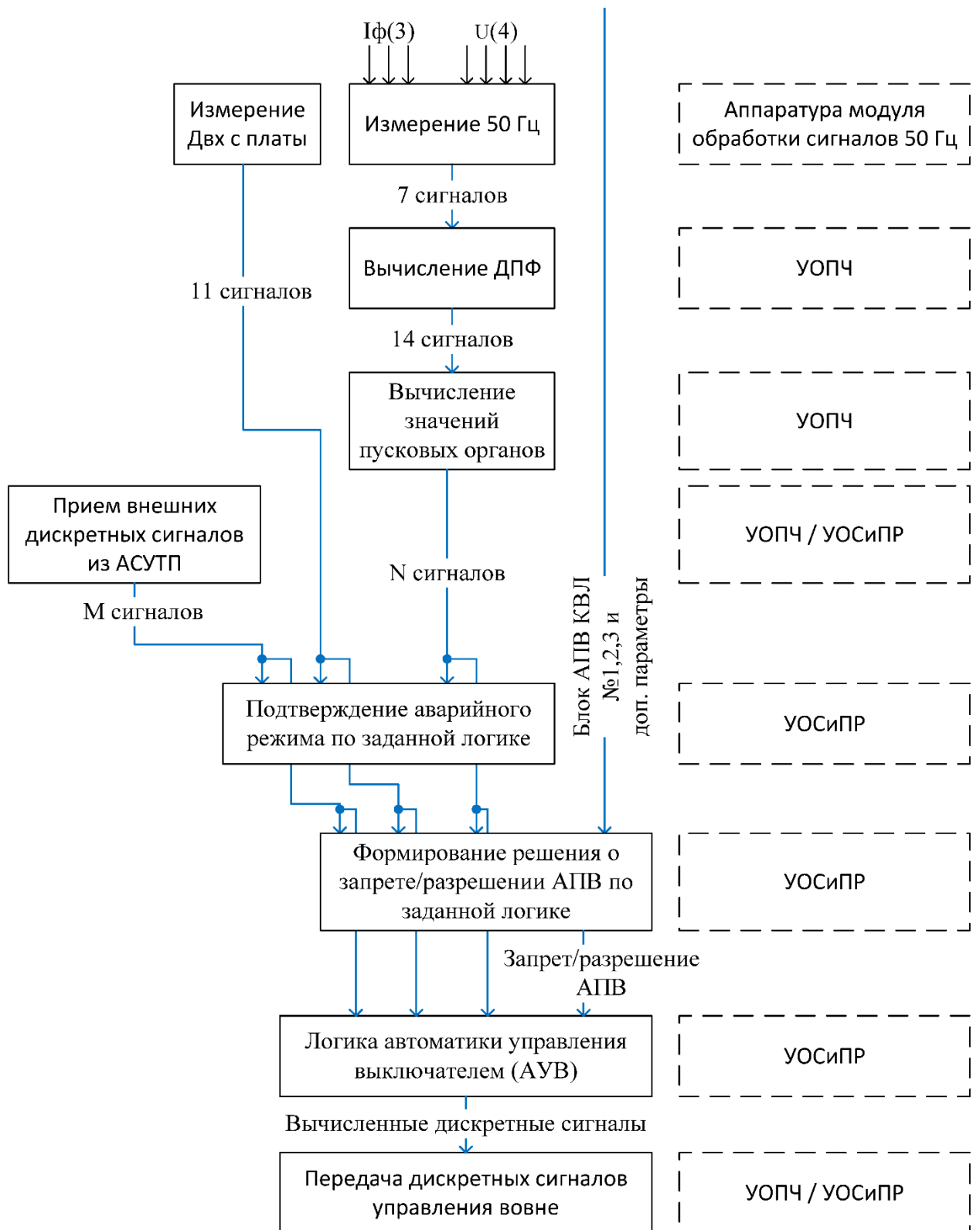


Рисунок В.1.4 – Диаграмма последовательности вычислений при возникновении КЗ (часть 4/5)



Рисунок В.1.5 – Диаграмма последовательности вычислений при возникновении КЗ (часть 5/5)

2. Функции и алгоритмы работы УВЧСВ

Основные задачи и функции, выполняемые узлом обработки:

- 1) Прием сигнала синхронизации времени и синхронизация по этому сигналу внутренних часов, использующихся для фиксации времени прибытия фронта волны;
- 2) Прием команд от УВЧАВ, изменение режима работы в соответствии с командой;
- 3) Обработка измеряемых сигналов, принимаемых от АЦП по заданным алгоритмам:
 - Выделение модальных компонент;
 - Фильтрация сигналов;
 - Обнаружение возмущения в сигналах и фиксация времени;

- Запись заданной длительности предыстории сигналов (значения сигналов до момента обнаружения возмущения), запись заданной длительности истории сигналов (значения сигналов с момента обнаружения возмущения).

- 4) Передача параметров и команд на следующий вычислительный узел (УВЧАВ);
- 5) Передача записанных сигналов на следующий вычислительный узел (УВЧАВ);
- 6) Прием сигналов самодиагностики системы с вышестоящих вычислительных узлов (УС, УВЧАВ), их обработка при вычислении собственных сигналов самодиагностики и передача на вышестоящие вычислительные узлы (УС, УВЧАВ).

3. Функции и алгоритмы работы УС

Основные задачи и функции, выполняемые узлом обработки:

- 1) Прием сигналов, параметров и команд от УВЧСВ и передача их на УВЧАВ;
- 2) Прием параметров и команд от УВЧАВ и передача команд на УВЧСВ;
- 3) Прием сигналов самодиагностики системы от УВЧСВ и передача на УВЧАВ, прием сигналов самодиагностики системы с соседних вычислительных узлов (УВЧСВ, УВЧАВ), их обработка при вычислении собственных сигналов самодиагностики и передача на соседние вычислительные узлы (УВЧСВ, УВЧАВ).

4. Функции и алгоритмы работы УВЧАВ

В этом пункте при изложении алгоритмов работы функций под сигналом понимается совокупность значений (одномерный массив) выборок физической величины, например, сигнала тока, если иное не оговорено особо.

Основные задачи и функции, выполняемые узлом обработки:

- 1) Прием сигналов, параметров и команд с вычислительных узлов, выполняющих предшествующую обработку (УВЧСВ), временное хранение исходных сигналов;
- 2) Обработка сигналов и параметров, полученных с предшествующих этапов обработки, по заданным алгоритмам:
 - Выделение модальных компонент;
 - Предварительная обработка сигналов по заданному алгоритму с целью выбора обрабатываемой фазы;
 - Обработка выбранного сигнала по заданным алгоритмам с целью вычисления оценочных параметров, характеризующих место повреждения и поврежденный участок.
- 3) Передача результатов вычислений на следующий вычислительный узел (УОСипР);
- 4) Передача исходных сигналов и заданных параметров на следующий вычислительный узел (УОСипР);

- 5) Прием сигналов самодиагностики системы с нижестоящих вычислительных узлов (УС, УВЧСВ) и передача на УОСиПР, прием сигналов самодиагностики системы с соседних вычислительных узлов (УС, УОСиПР), их обработка при вычислении собственных сигналов самодиагностики и передача на соседние вычислительные узлы (УС, УОСиПР);
- 6) Прием команд от УОСиПР и передача команд на УВЧСВ.
- 7) Прием настроек от УОСиПР, изменение собственных настроек, передача настроек на УВЧСВ;
- 8) Ведение журнала событий и фиксация в нем принимаемых и вычисляемых сигналов и параметров с указанием времени их приема (логирование).

4.1 Функция извлечения сигналов и выделения модальных компонент

Основной задачей этой функции является формирование массивов значений сигналов по заданному правилу, извлечение сигналов заданной длительности и выполнение модального преобразования.

Общий порядок (этапы) выполнения этой функции показан на рисунке В.4.1. Описание действий на отдельных этапах показано на рисунках В.4.2 – В.4.3.

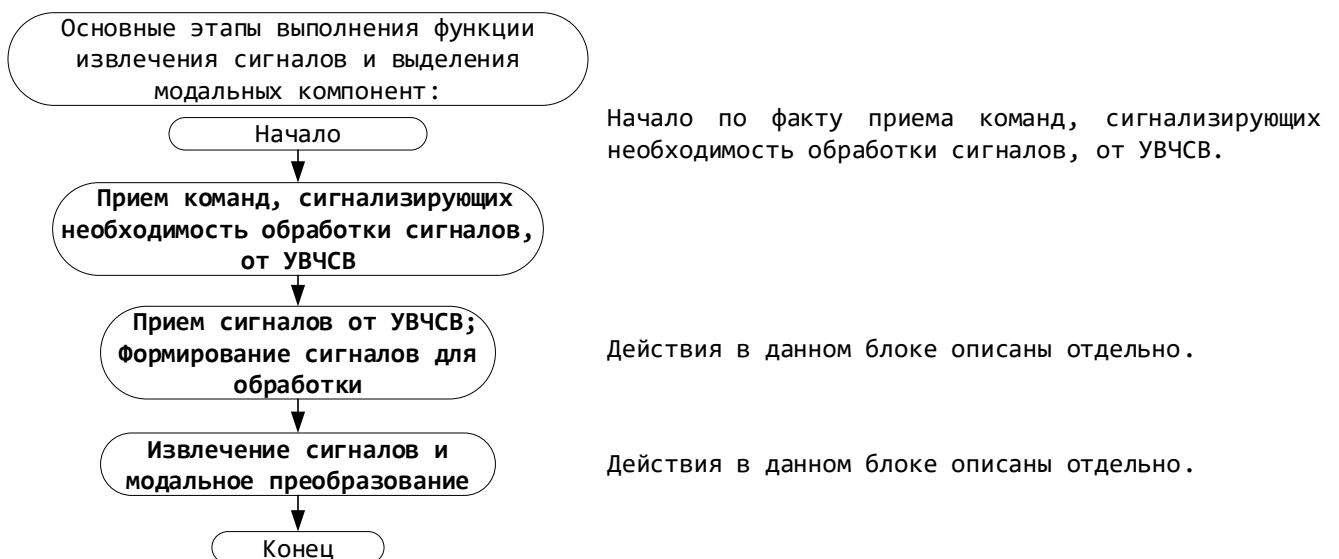


Рисунок В.4.1 – Основные этапы выполнения функции извлечения сигналов и выделения модальных компонент

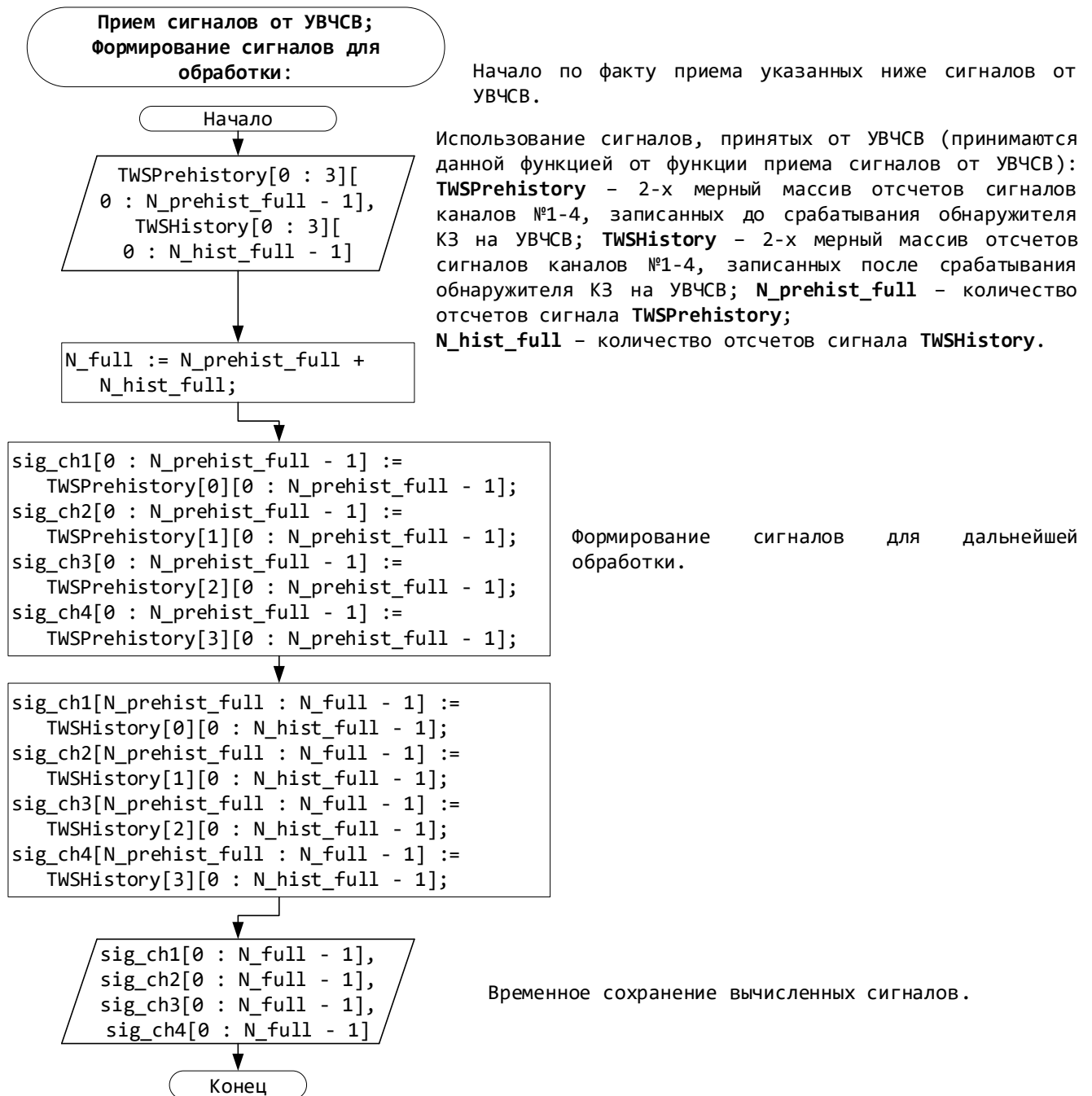


Рисунок В.4.2 – Действия при приеме сигналов от УВЧСВ

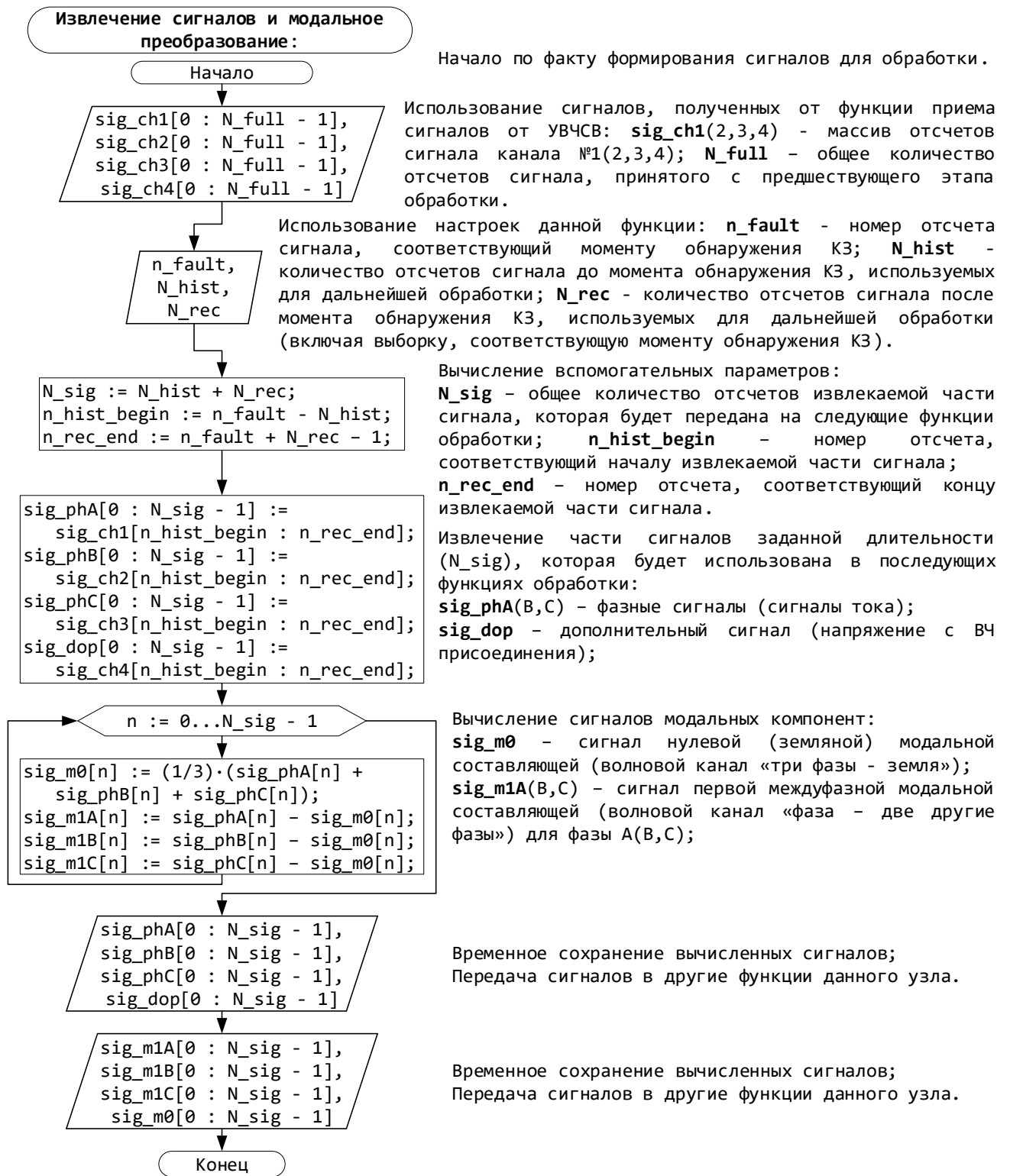


Рисунок В.4.3 – Алгоритм извлечения сигналов и модального преобразования

4.2 Функция предварительной обработки сигналов по заданному алгоритму с целью выбора одного обрабатываемого сигнала

Основными задачами этой функции являются: фильтрация каждого сигнала независимо (3 модальных сигнала фильтруются по одному алгоритму, дополнительный сигнал – по другому

алгоритму), определение номера одного из 3-ех фазных сигналов по заданному алгоритму для дальнейшей обработки.

Общий порядок (этапы) выполнения этой функции показан на рисунке В.4.4. Описание действий на отдельных этапах показано на рисунках В.4.5 – В.4.6. Описание специальных функций, используемых в алгоритмах, показаны на рисунках В.4.7 – В.4.9.

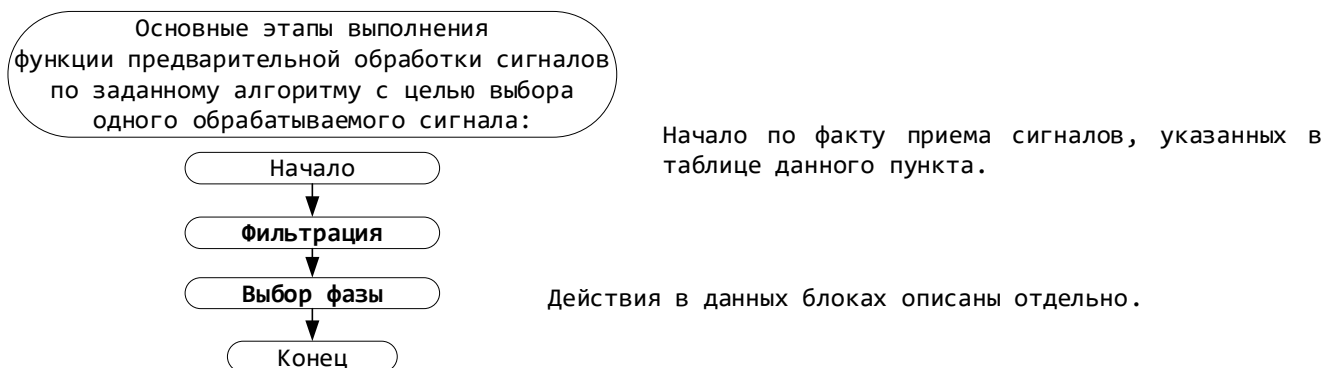


Рисунок В.4.4 – Основные этапы выполнения функции предварительной обработки сигналов по заданному алгоритму с целью выбора одного обрабатываемого сигнала

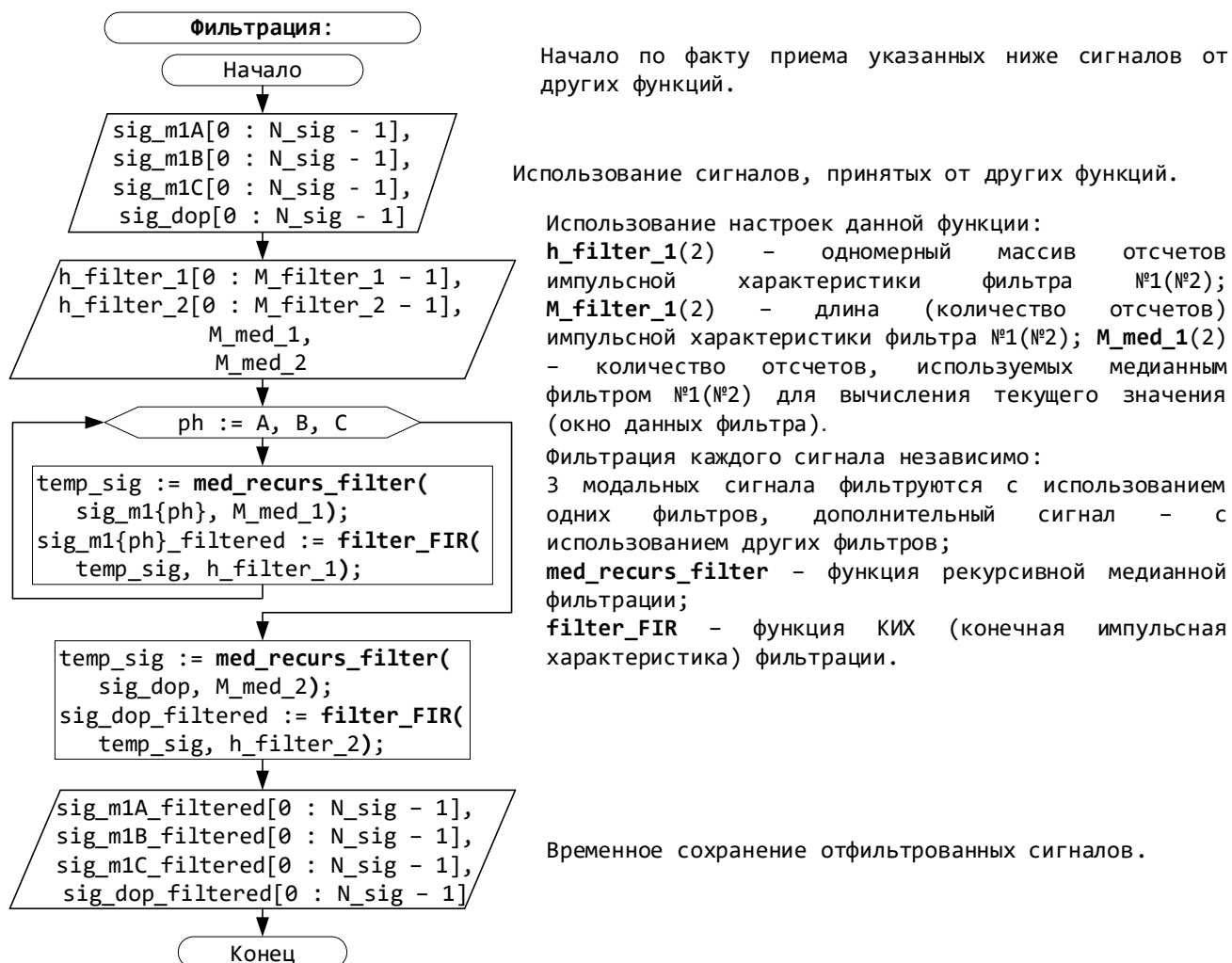
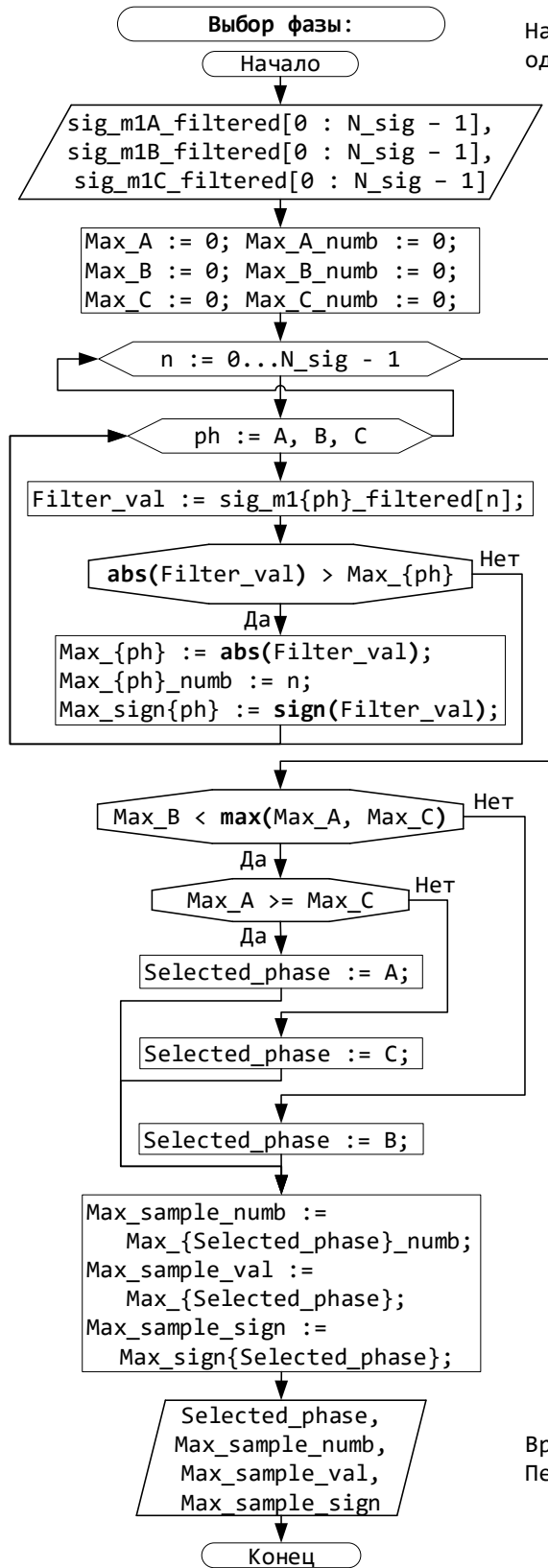


Рисунок В.4.5 – Алгоритм фильтрации сигналов



Начало по факту завершения этапа фильтрации или одновременно с фильтрацией.

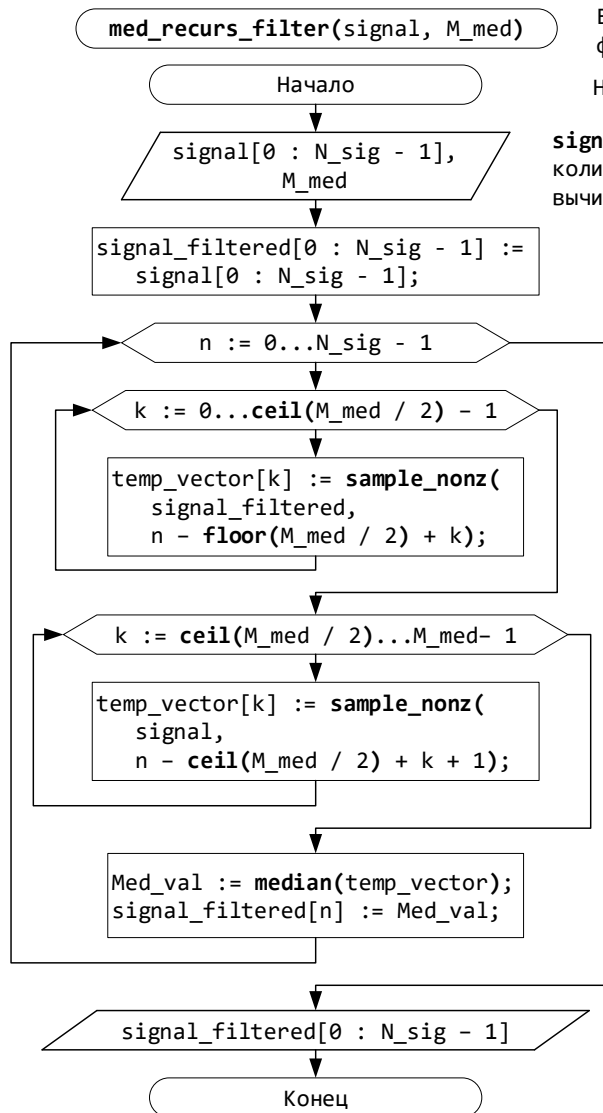
Использование сигналов, вычисленных на предыдущем этапе данной функции.

Вычисление максимального по модулю значения, номера отсчета с максимальным значением и знака данного отсчета в каждом из трех отфильтрованных фазных сигналах;
abs – функция взятия модуля величины;
sign – функция взятия знака величины.

Выбор сигнала (фазы) с наибольшим значением максимума. Выбор параметров, соответствующих выбранному сигналу;
max – функция взятия максимального значения из двух величин.

Временное сохранение вычисленных параметров;
 Передача значений параметров в другие функции.

Рисунок В.4.6 – Алгоритм выбора обрабатываемой фазы



Вариант реализации рекурсивной медианной фильтрации

Начало по факту вызова функции.

signal – одномерный массив отсчетов сигнала; **M_med** – количество отсчетов, используемых фильтром для вычисления текущего значения (окно данных фильтра).

Реализация бегущего окна путем составления одномерного массива значений (вектора), длина которого соответствует длине окна фильтра:

в центре окна – текущий отсчет, левая часть окна заполняется значениями с выхода фильтра на предыдущей итерации, правая часть – значениями самого фильтруемого сигнала, если **M_med** четное, то текущее значение сигнала (отсчет **n**) не попадает в вектор, иначе – попадает;

sample_nonz – функция выборки значения отсчета сигнала из массива (реализация данной функции описана отдельно);

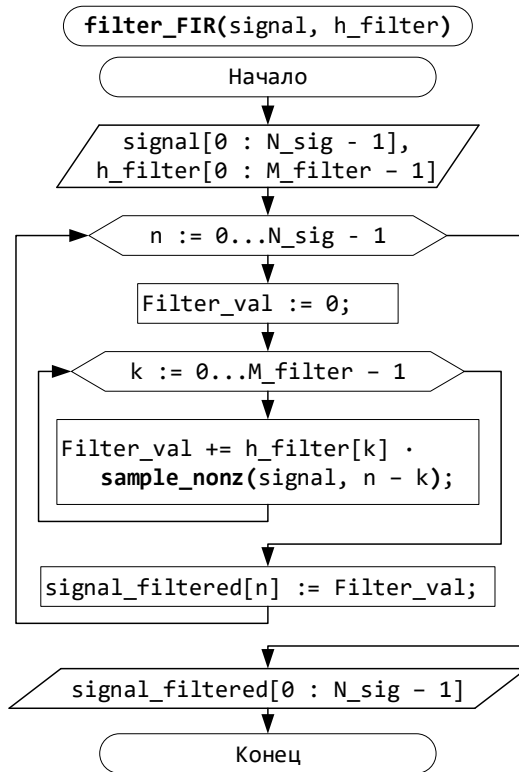
floor – функция округления до ближайшего целого, меньшего или равного аргументу;

ceil – функция округления до ближайшего целого, большего или равного аргументу.

Далее в составленном одномерном массиве находится медиана и это значение присваивается **n**-ому значению отфильтрованного сигнала.

Возвращение отфильтрованного сигнала.

Рисунок В.4.7 – Алгоритм специальной функции рекурсивной медианной фильтрации



Вариант реализации КИХ фильтрации

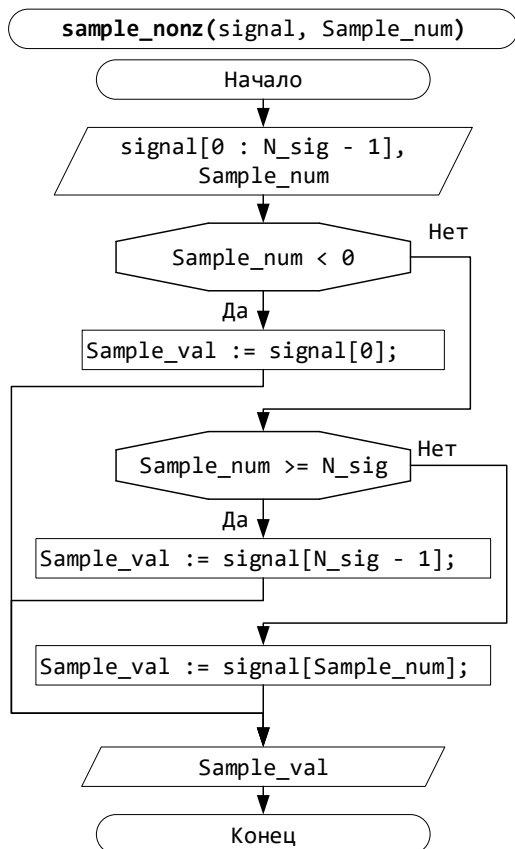
Начало по факту вызова функции.

signal – одномерный массив отсчетов сигнала;
h_filter – одномерный массив отсчетов импульсной характеристики фильтра.

Итерационный расчет значения свертки сигнала с импульсной характеристикой фильтра на окне данных фильтра.

Возвращение отфильтрованного сигнала.

Рисунок В.4.8 – Алгоритм специальной функции КИХ фильтрации



Вариант реализации функции выборки значения отсчета сигнала из массива

Начало по факту вызова функции

signal – одномерный массив отсчетов сигнала;
Sample_num – номер отсчета.

Вычисление значения отсчета:
 если номер запрашиваемого отсчета (**Sample_num**) выходит за диапазон $[0 : N_sig-1]$, то возвращается значение крайнего отсчета, иначе – значение сигнала при запрашиваемом номере отсчета.

Возвращение вычисленного значения отсчета.

Рисунок В.4.9 – Алгоритм специальной функции выборки значения сигнала из массива

4.3 Функция обработки сигналов по алгоритму №1 (время) с целью определения точного времени начала КЗ

Основной задачей этой функции является определение точного значения времени начала КЗ по заданному алгоритму.

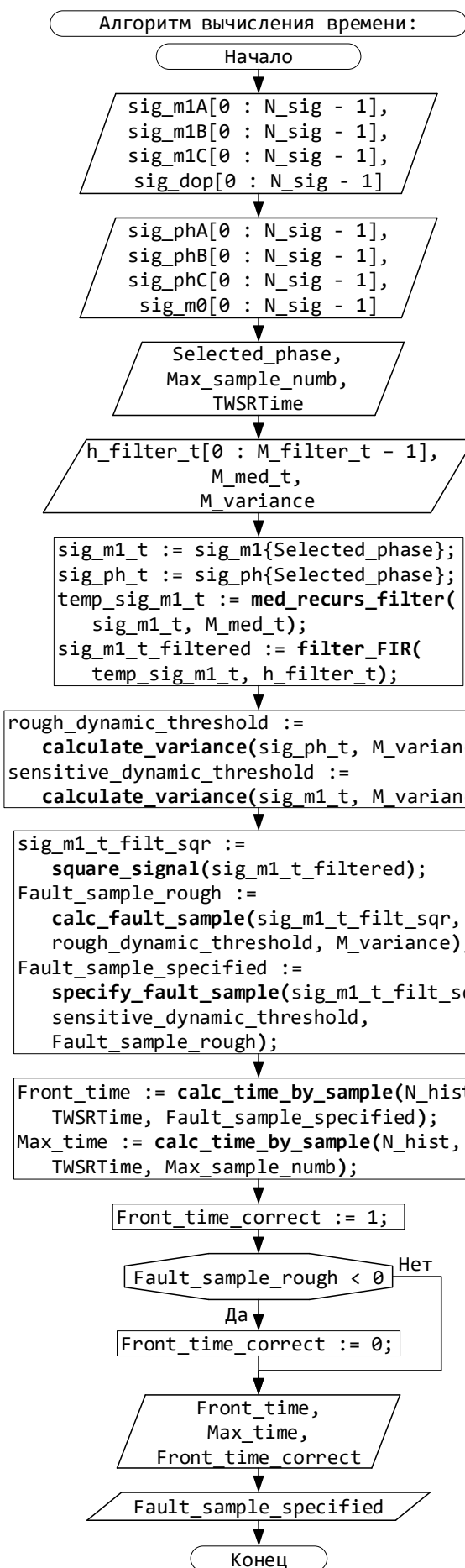
Общий порядок (этапы) выполнения функции:

- Фильтрация выбранного сигнала по заданному алгоритму (алгоритм показан на рисунке 4.10);

- Определение номера выборки сигнала, соответствующей началу КЗ, по заданному алгоритму (алгоритм показан на рисунках В.4.13- В.4.14);

- Вычисление точного значения времени начала КЗ по заданному алгоритму (алгоритм показан на рисунке В.4.15).

Алгоритм обработки сигналов в соответствии с этапами выполнения функции показан на рисунке В.4.10. Описание специальных функций, используемых в алгоритме, показаны на рисунках В.4.11 – В.4.15.



Начало по факту приема указанных ниже сигналов и параметров от других функций.

Использование сигналов, принятых от других функций.

Использование сигналов, принятых от других функций.

Использование параметров, принятых от других функций.

Использование настроек данной функции:

h_filter_t – одномерный массив отсчетов импульсной характеристики фильтра; **M_filter_t** – длина импульсной характеристики фильтра; **M_med_t** – окно данных медианного фильтра; **M_variance** – окно данных, на котором вычисляется выборочная дисперсия для текущего отсчета.

Использование сигналов выбранной ранее фазы, модальный сигнал (**sig_m1_t**) фильтруется для дальнейшего анализа.

Вычисление сигналов значений выборочной дисперсии (функция **calculate_variance**, описана отдельно), используемых в качестве динамических порогов обнаружителя: фазный сигнал (**sig_ph_t**) используется для вычисления грубого динамического порога, т.к. содержит больше шумов; модальный сигнал (**sig_m1_t**) используется для вычисления чувствительного динамического порога.

Вычисление квадратов значений сигнала (функция **square_signal**, описана отдельно) для сравнения с динамическим порогом;

Вычисление (функция **calc_fault_sample**, описана отдельно) и последующее уточнение (функция **specify_fault_sample**, описана отдельно) номера отсчета, соответствующего началу фронта КЗ.

Вычисление двух значений времени: вычисление значения времени (функция **calc_time_by_sample**, описана отдельно), соответствующего началу фронта КЗ; вычисление значения времени, соответствующего номеру отсчета сигнала, с максимальным значением.

Вычисление параметра, характеризующего успех/промах в оценке времени фронта.

Временное сохранение вычисленных параметров; Передача значений параметров в другие функции.

Рисунок В.4.10 – Алгоритм определения точного времени начала КЗ

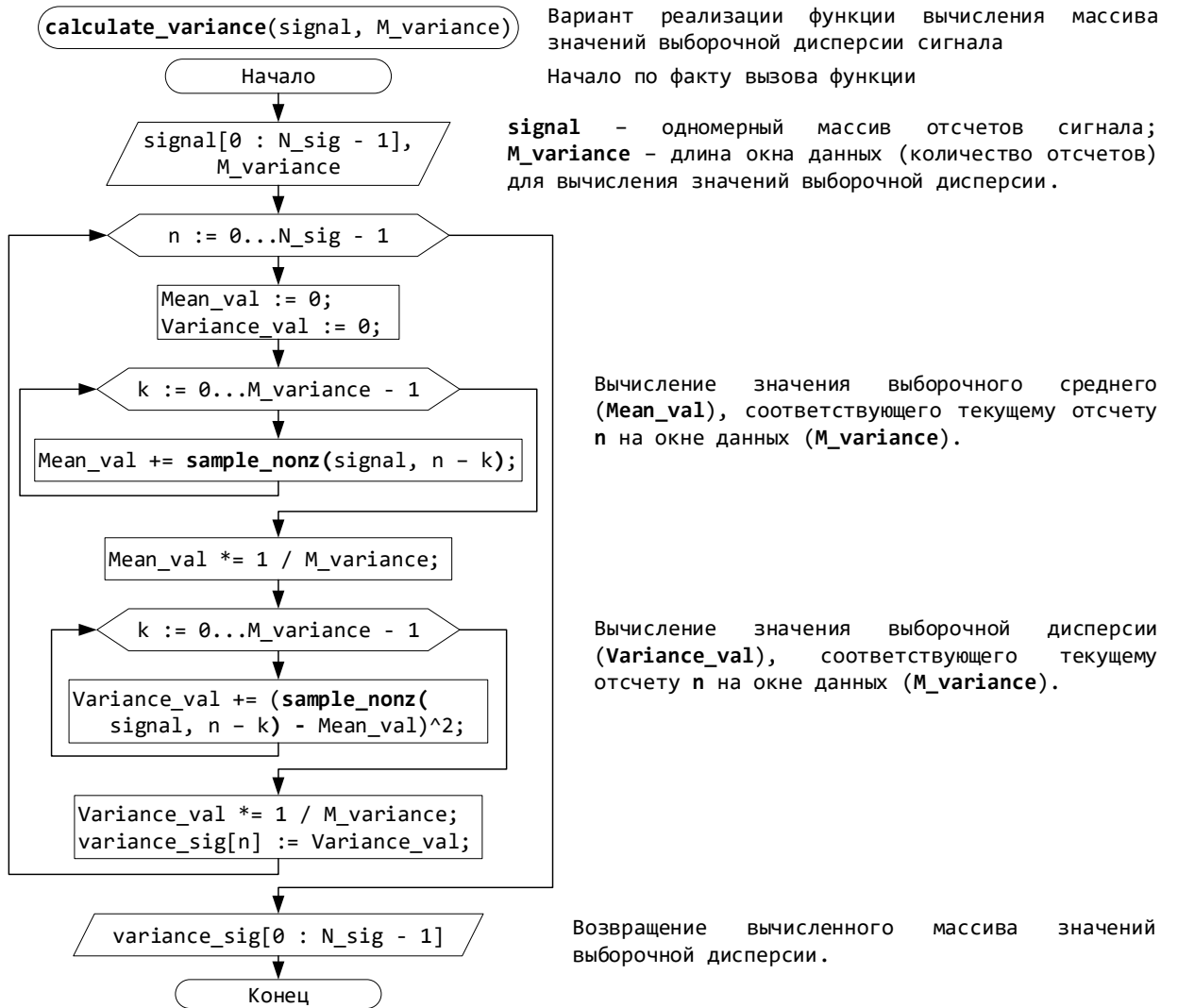


Рисунок В.4.11 – Алгоритм специальной функции вычисления массива значений выборочной дисперсии сигнала

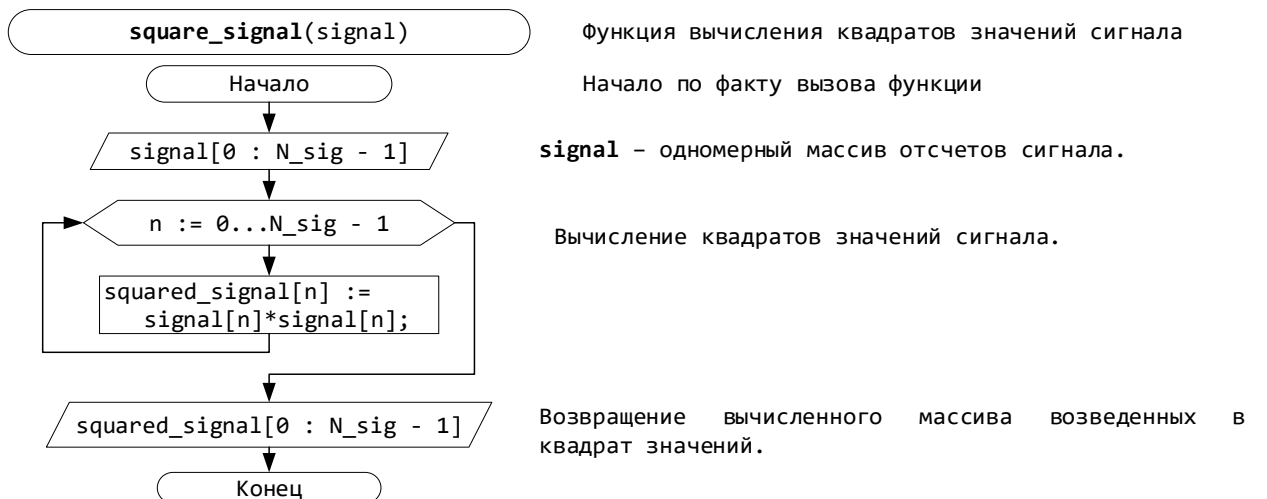
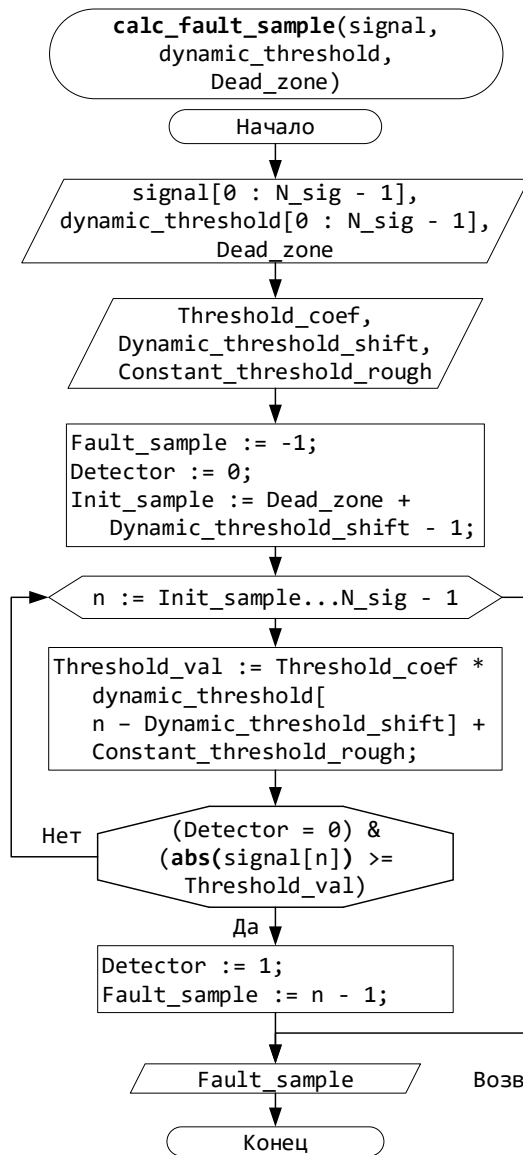


Рисунок В.4.12 – Алгоритм специальной функции вычисления квадратов значений сигнала



Функция вычисления номера отсчета, соответствующего началу фронта КЗ

Начало по факту вызова функции

signal – одномерный массив отсчетов сигнала; **dynamic_threshold** – одномерный массив значений сигнала динамического порога; **Dead_zone** – ширина «мертвой зоны» – номер отсчета, с которого допустимо начинать сравнение сигнала с порогом.

Использование настроек данной функции:

Threshold_coef – коэффициент, на который будут умножаться значения динамического порога;

Dynamic_threshold_shift – количество отсчетов, на которое будет сдвинут сигнал динамического порога при сравнении; **Constant_threshold_rough** – значение постоянного порога.

Вычисление значения комбинированного порога и сравнение модуля значения отсчета сигнала с комбинированным порогом. При превышении модуля сигнала порогового значения фиксируется предыдущий номер отсчета.

Возвращение вычисленного номера отсчета начала фронта КЗ.

Рисунок В.4.13 – Алгоритм специальной функции вычисления номера выборки, соответствующей началу фронта КЗ

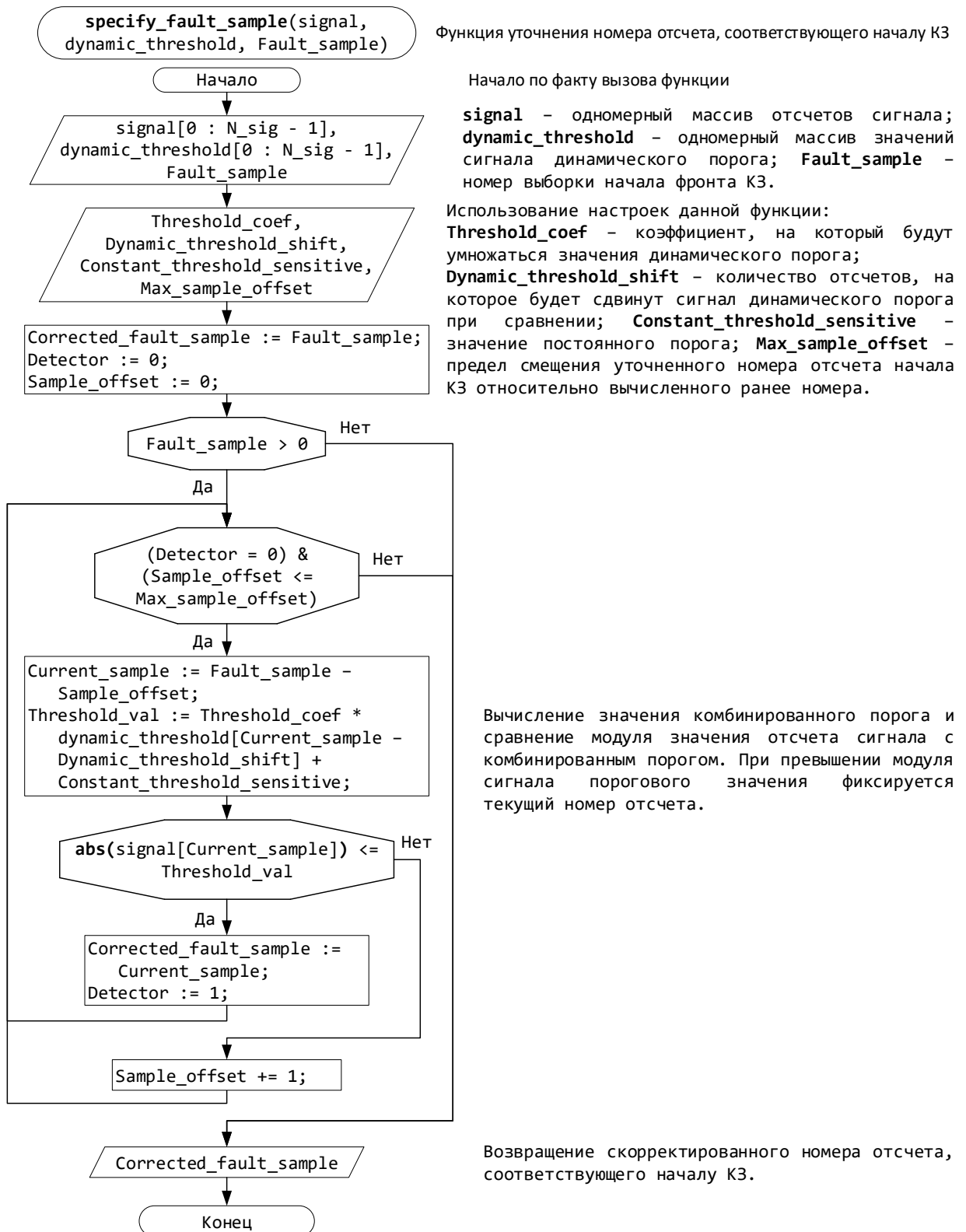
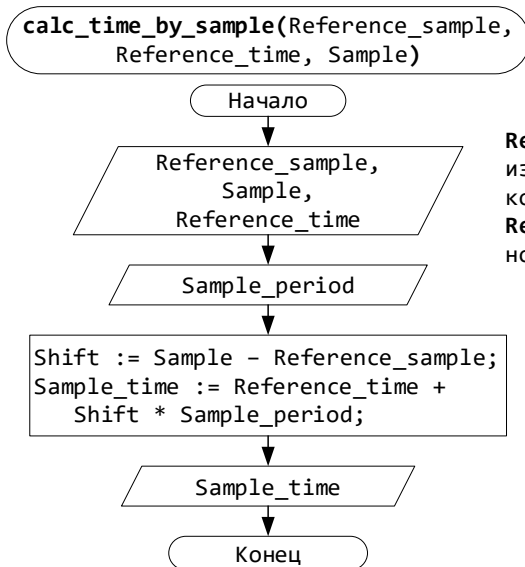


Рисунок В.4.14 – Алгоритм специальной функции уточнения номера выборки, соответствующей началу фронта КЗ



Функция вычисления значения времени, соответствующего заданному номеру отсчета

Начало по факту вызова функции

Reference_sample – номер отсчета, для которого задается известное значение времени; **Sample** – номер отсчета, для которого будет вычисляться новое значение времени; **Reference_time** – известное значение времени в [мкс] для номера отсчета (**Reference_sample**).

Использование настроек данной функции:

Sample_period – период дискретизации в [мкс].

Вычисление значения времени для отсчета (**Sample**).

Возвращение вычисленного значения времени.

Рисунок В.4.15 – Алгоритм специальной функции вычисления значения времени, соответствующего заданному номеру выборки

4.4 Функция обработки сигналов по алгоритму №2 (амплитуда) с целью определения амплитуды фронта волны КЗ

Основной задачей этой функции является определение амплитуды фронта волны, по заданному алгоритму.

Общий порядок (этапы) выполнения функции:

- Фильтрация выбранного сигнала по заданному алгоритму;
- Определение амплитуды фронта волны, по заданному алгоритму.

Алгоритм обработки сигналов в соответствии с этапами выполнения функции показан на рисунке В.4.16.

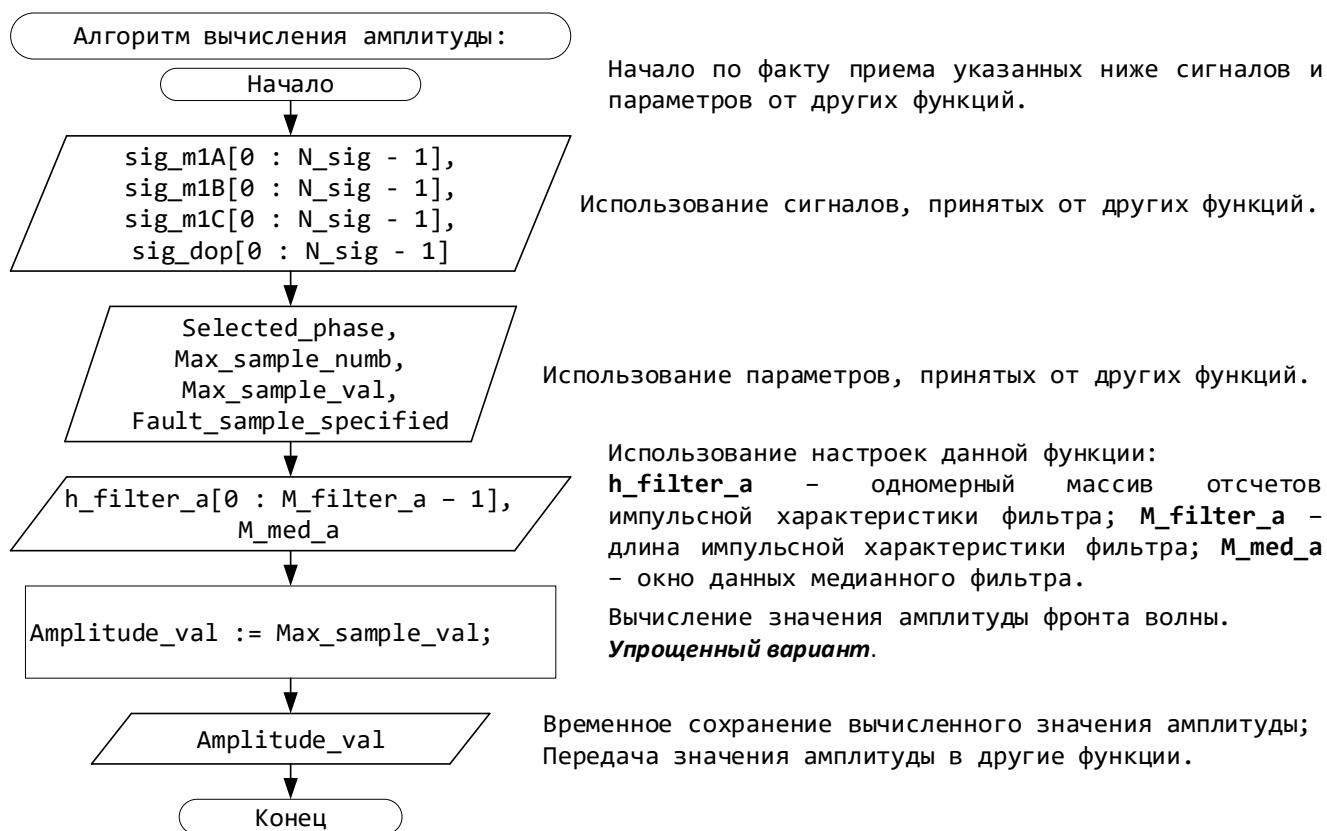
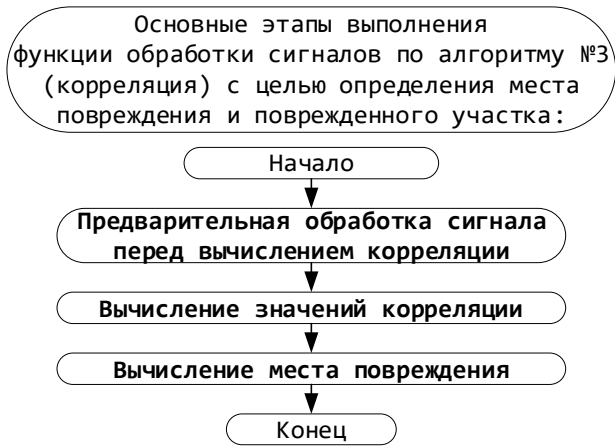


Рисунок В.4.16 – Алгоритм вычисления амплитуды фронта КЗ

4.5 Функция обработки сигналов по алгоритму №3 (корреляция) с целью определения места повреждения и поврежденного участка

Основными задачами этой функции являются: вычисление коэффициентов корреляции отфильтрованного сигнала с набором эталонных портретов, определение номера эталонного портрета с наибольшей корреляцией и вычисление значения места повреждения по заданному алгоритму, определение номера поврежденного участка ЛЭП.

Общий порядок (этапы) выполнения функции показан на рисунке В.4.17. Описание действий на отдельных этапах показано на рисунках В.4.18 – В.4.22. Описание специальных функций, используемых в алгоритмах, показаны на рисунках В.4.23 – В.4.24.



Начало по факту приема сигналов и параметров, указанных в таблице данного пункта.

Действия в данных блоках описаны отдельно.

Рисунок В.4.17 – Основные этапы выполнения функции обработки сигналов по алгоритму №3 (корреляция) с целью определения места повреждения и поврежденного участка

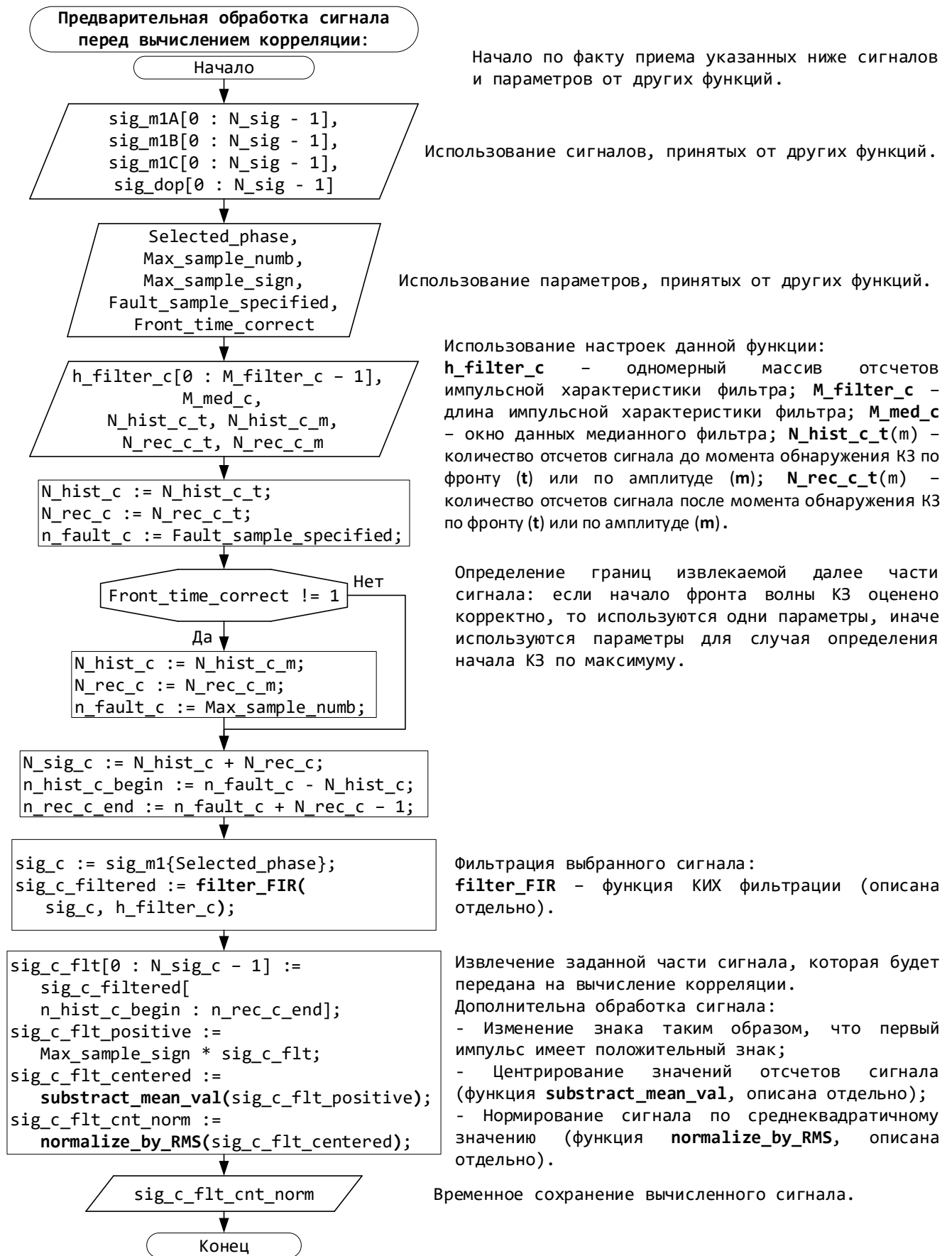
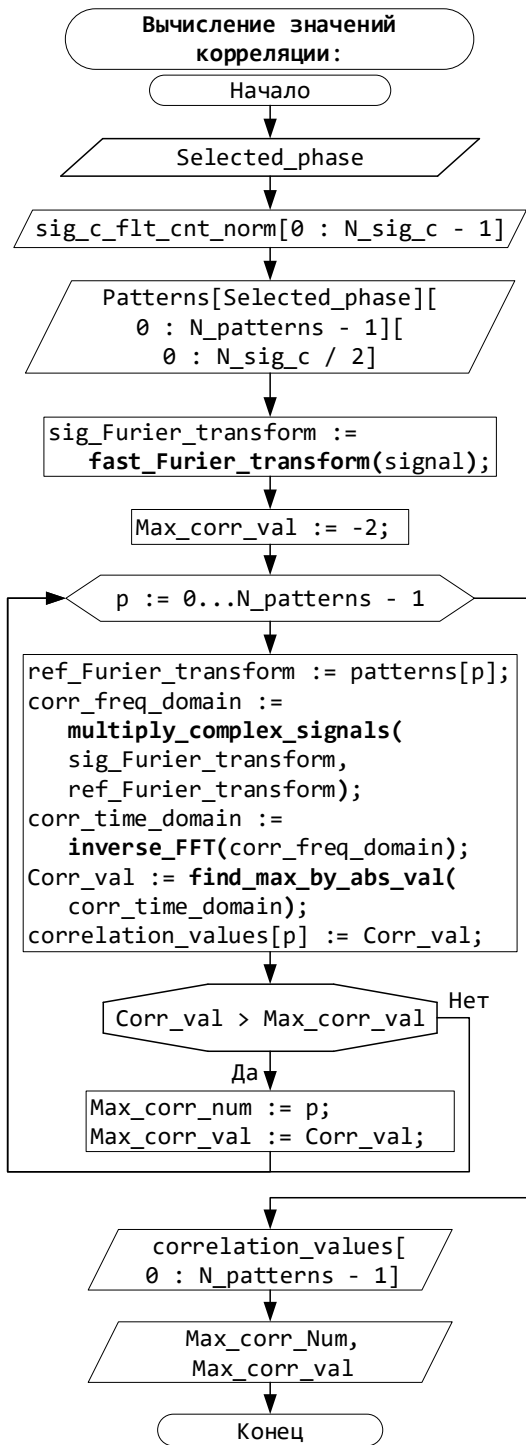


Рисунок В.4.18 – Алгоритм предварительной обработки сигнала



Начало по факту завершения этапа предварительной обработки.

Использование параметров, принятых от других функций.

Использование сигнала, вычисленного на предыдущем этапе обработки.

Использование настроек данной функции: **patterns** – трехмерный массив комплексных значений ДПФ сигналов-портретов (для случаев каждой поврежденной фазы свой двумерный массив – набор портретов); **N_patterns** – количество эталонных портретов.

Вычисление комплексного Фурье-образа сигнала; **fast_Furier_transform** – функция быстрого преобразования Фурье.

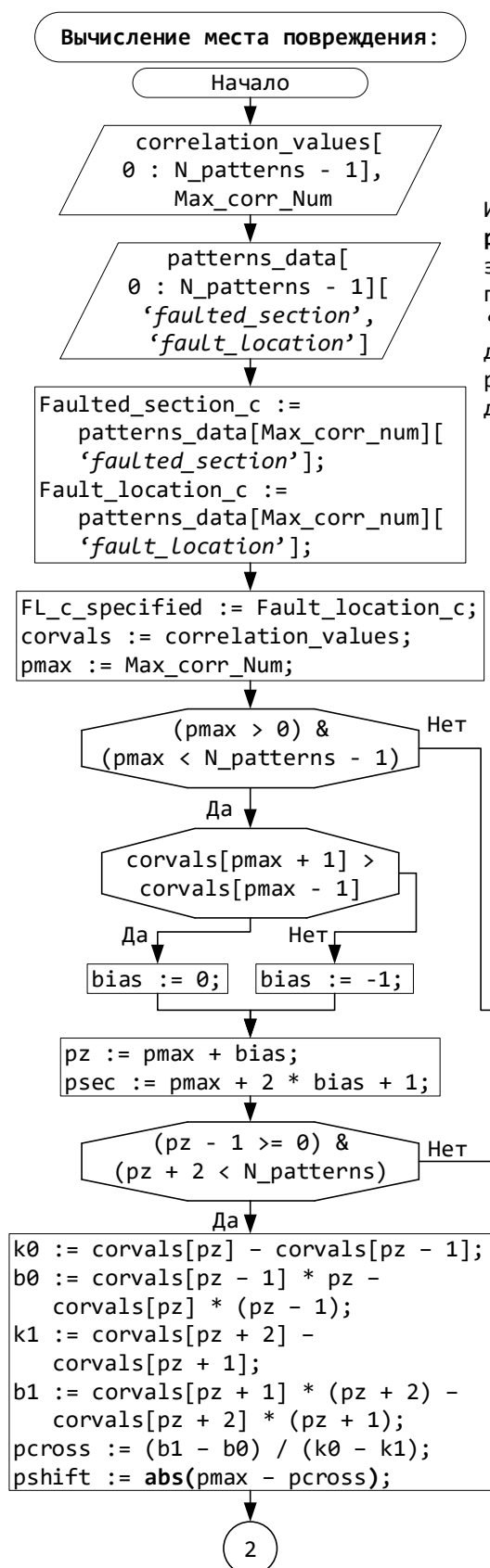
Вычисление значений корреляции сигнала со всеми эталонными портретами; **multiply_complex_signals** – функция перемножения комплексных значений двух одномерных массивов; **inverse_FFT** – функция обратного БПФ; **find_max_by_abs_val** – функция вычисления максимального по модулю значения в массиве.

Вычисление номера портрета с максимальной корреляцией и значения максимальной корреляции.

Временное сохранение вычисленных значений корреляции.

Временное сохранение вычисленных параметров; Передача значений параметров в другие функции.

Рисунок В.4.19 – Алгоритм вычисления значений корреляции



Начало по факту завершения этапа вычисления значений корреляции.

Использование параметров, вычисленных на предыдущем этапе обработки.

Использование настроек данной функции:

patterns_data - структура данных (например массив, элементы которого являются словарем), хранящая параметры, соответствующие эталонным портретам: **'faulted_section'** - номер участка КВЛ, соответствующего данному эталонному портрету; **'fault_location'** - расстояние до места повреждения, соответствующего данному эталонному портрету.

Вычисление номера поврежденного участка и значения расстояния до места повреждения, соответствующих номеру портрета с наибольшей корреляцией.

Вычисление уточненного расстояния до места повреждения на основе линейной интерполяции.

Рисунок В.4.20 – Алгоритм вычисления места повреждения и поврежденного участка (часть 1)

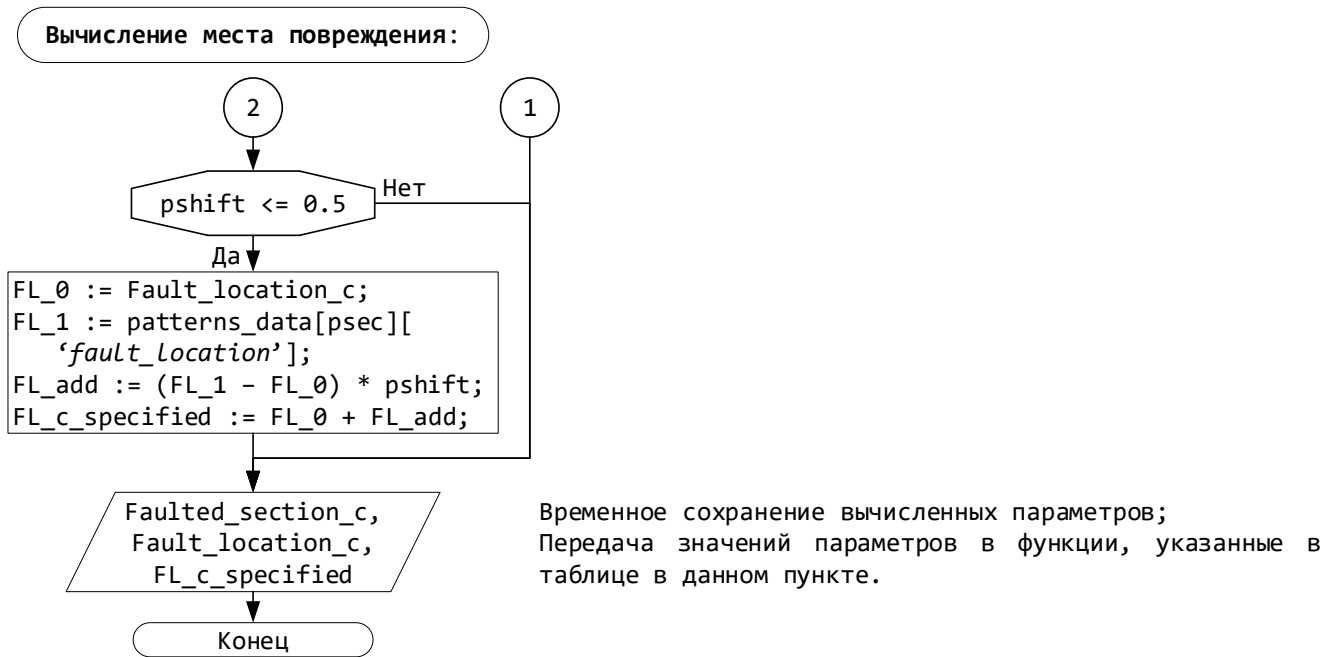


Рисунок В.4.21 – Алгоритм вычисления места повреждения и поврежденного участка (часть 2)

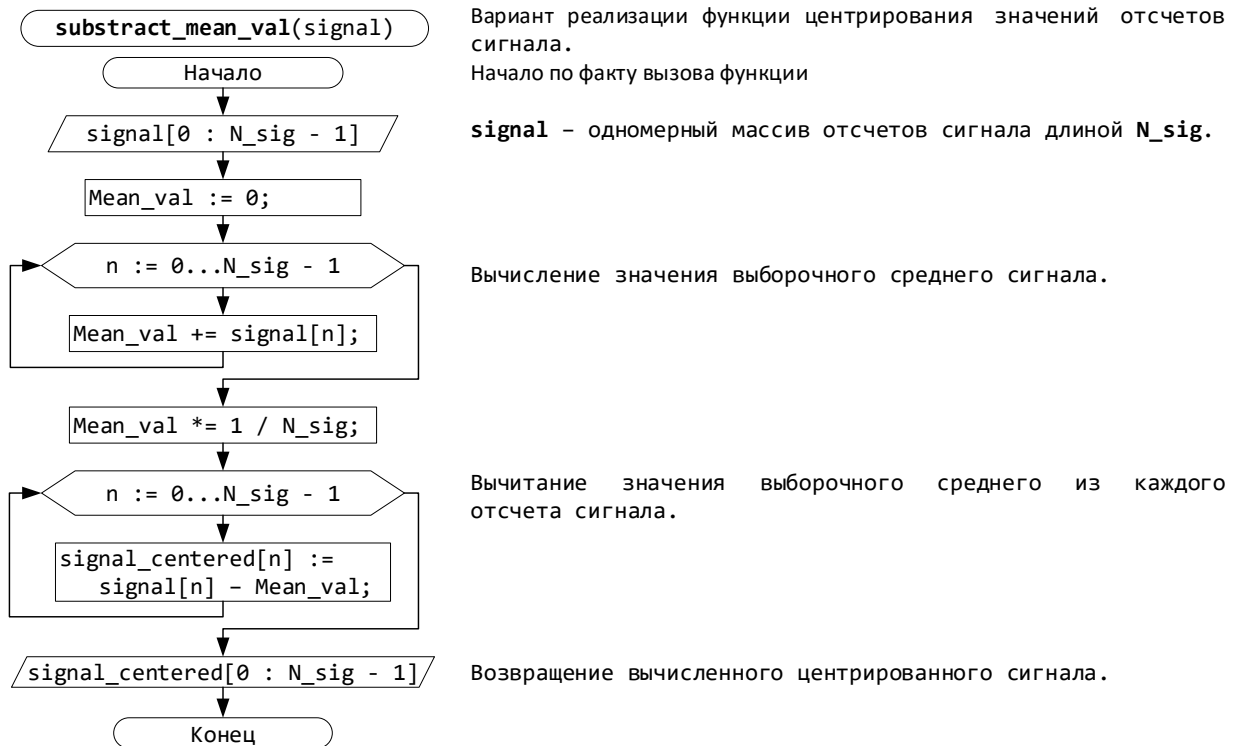


Рисунок В.4.22 – Алгоритм специальной функции центрирования сигнала

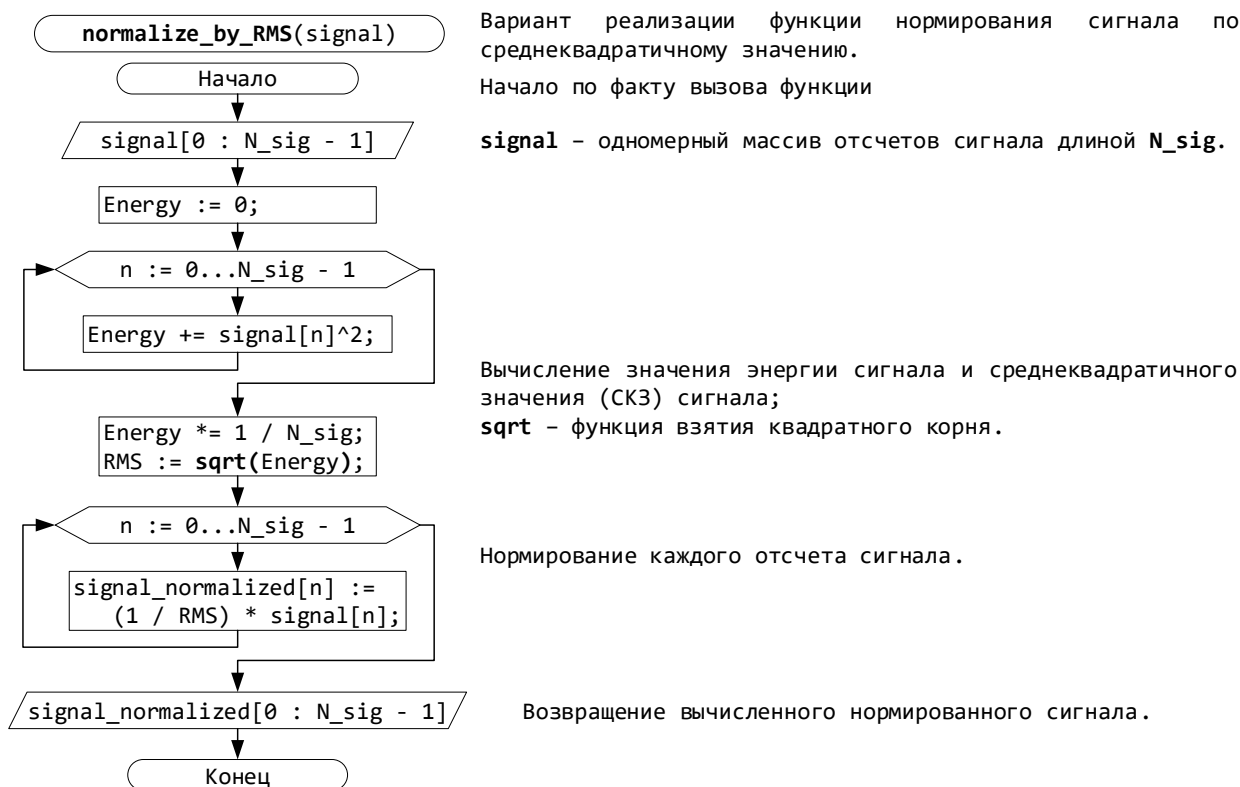


Рисунок В.4.23 – Алгоритм специальной функции нормирования сигнала по среднеквадратичному значению

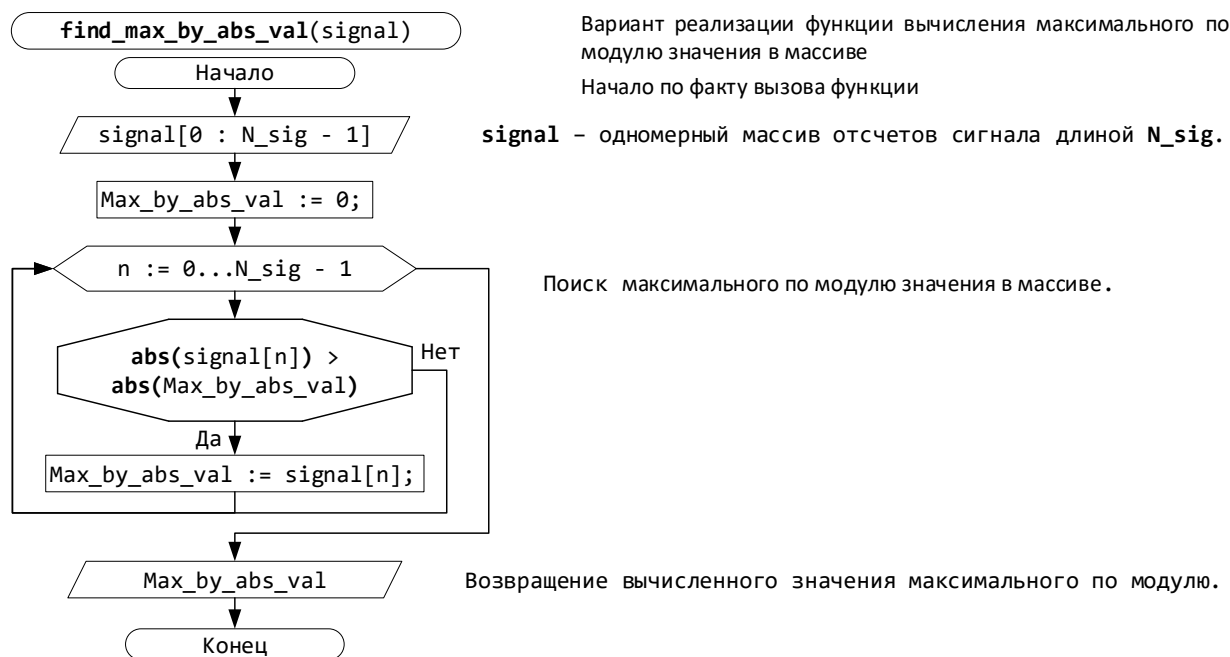


Рисунок В.4.24 – Алгоритм специальной функции определения максимального по модулю значения в массиве

5. Функции и алгоритмы работы УОСиПР

Основополагающей функцией УОСиПР является функция логики принятия решений (логическая схема). В ходе своей работы (приема и обработки логических сигналов) логическая

схема формирует заданные логические сигналы, которые либо передаются на УОПЧ (в формате GOOSE), либо поступают в отдельные функции. При приеме заданных логических сигналов отдельные функции выполняют заданные действия.

Основные задачи и функции, выполняемые УОСиПР:

- 1) Прием сигналов, параметров и команд с вычислительного узла, выполняющего предшествующую обработку ВЧ сигналов (УВЧАВ), временное хранение исходных сигналов;
- 2) Прием параметров и команд с удаленного устройства АПВ КВЛ;
- 3) Передача параметров и команд на вычислительный узел, выполняющий предшествующую обработку ВЧ сигналов (УВЧАВ);
- 4) Передача параметров и команд на удаленное устройство АПВ КВЛ;
- 5) Обработка результатов вычислений, полученных с предшествующих этапов обработки, по заданным алгоритмам с целью вычисления итоговых оценочных параметров, характеризующих место повреждения и поврежденный участок;
- 6) Формирование решения о запрете/разрешении АПВ по заданной логике;
- 7) Сохранение исходных сигналов и заданных вычисленных параметров в энергонезависимую память в заданном формате;
- 8) Формирование и передача команд смены режима работы на нижестоящие вычислительные узлы (УС, УВЧСВ, УВЧАВ);
- 9) Прием сигналов самодиагностики системы с нижестоящих вычислительных узлов (УС, УВЧСВ, УВЧАВ), их обработка при вычислении собственных сигналов самодиагностики и передача на нижестоящий вычислительный узел (УВЧАВ);
- 10) Прием команд оператора от ИЧМ;
- 11) Передача параметров и команд на ИЧМ;
- 12) Изменение собственных настроек (уставок) по команде оператора, передача настроек на нижестоящие вычислительные узлы;
- 13) Прием логических сигналов от УОПЧ;
- 14) Передача логических сигналов на УОПЧ;
- 15) Ведение журнала событий и фиксация в нем принимаемых и заданных вычисляемых сигналов и параметров с указанием времени их приема (логирование).

5.1 Функция расчета места повреждения по двустороннему замеру времени

Основной задачей этой функции является расчет расстояния до места повреждения, используя двусторонний замер времени прихода волн по концам ЛЭП, и формирование сигнала запрета/разрешения АВП КВЛ.

Общий порядок (этапы) выполнения функции показан на рисунке В.5.1. Описание действий на отдельных этапах показано на рисунках В.5.2 – В.5.3.

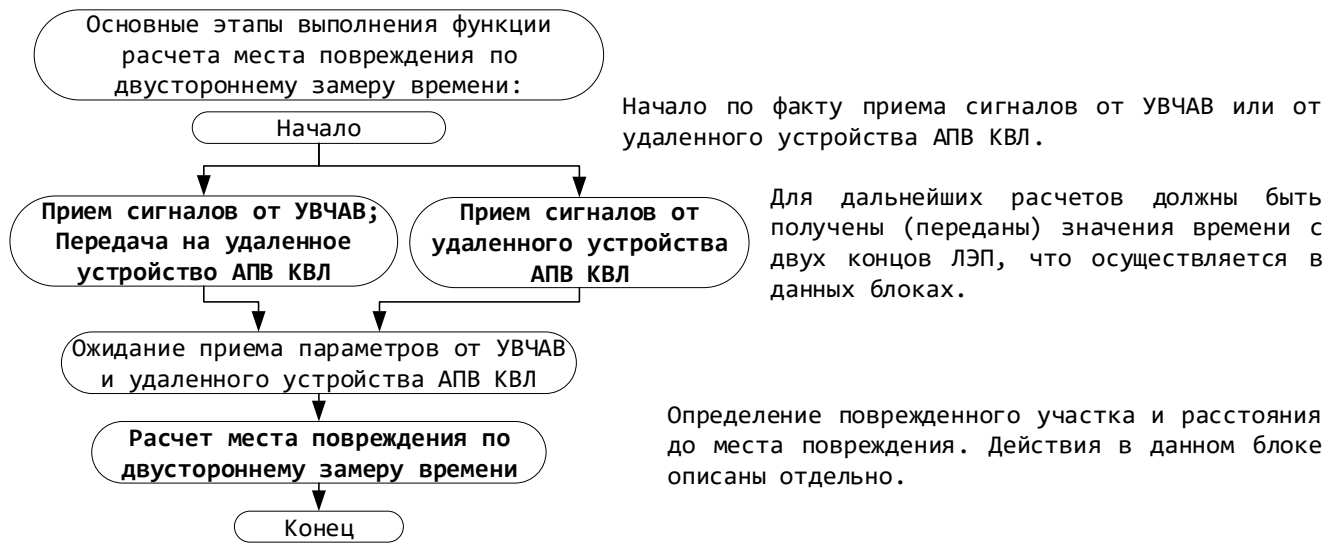
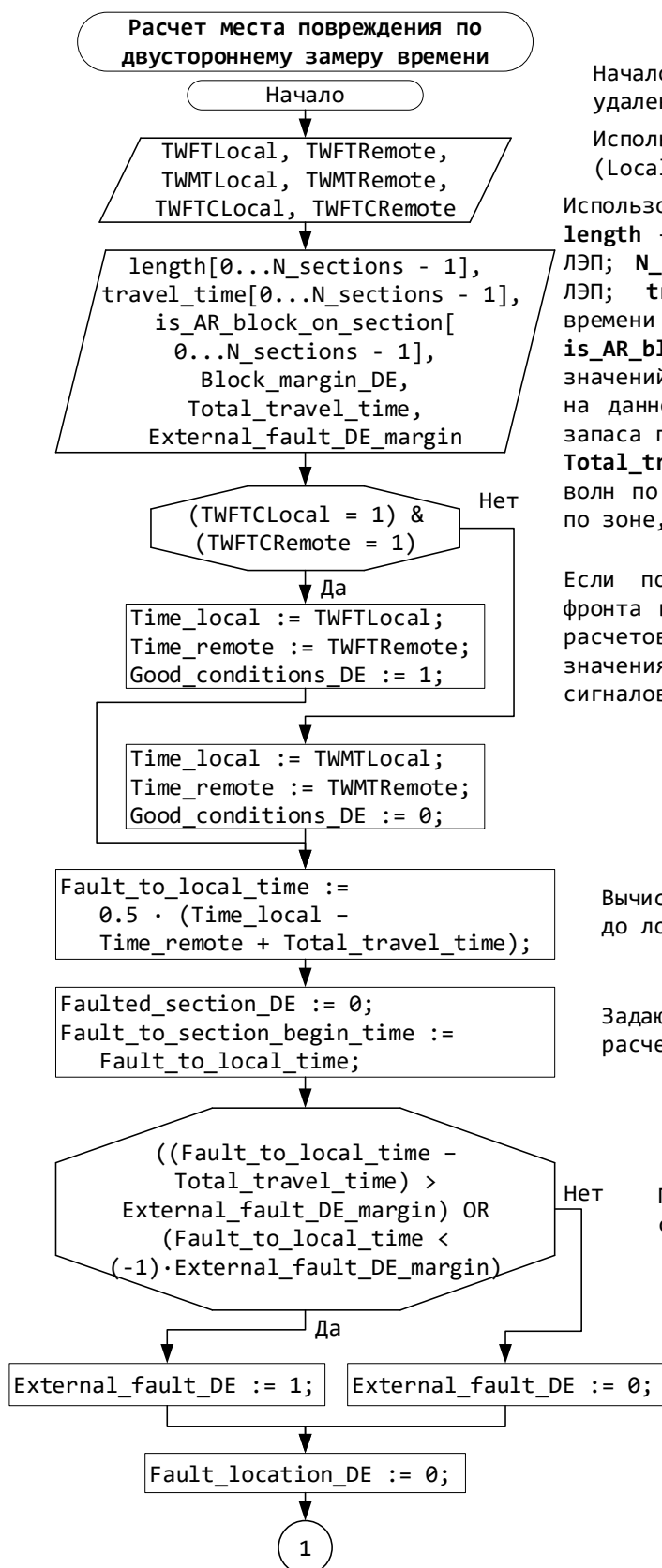


Рисунок В.5.1 – Основные этапы выполнения функции расчета места повреждения по двустороннему замеру времени



Начало по факту приема сигналов от УВЧАВ и удаленного устройства АПВ КВЛ.

Использование параметров, принятых ранее от УВЧАВ (Local) и удаленного устройства АПВ КВЛ (Remote).

Использование настроек данной функции:

length – одномерный массив значений длины участков ЛЭП; **N_sections** – количество разнородных участков ЛЭП; **travel_time** – одномерный массив значений времени распространения волн по участкам ЛЭП; **is_AR_block_on_section** – одномерный массив значений, соответствующих необходимости запрета АПВ на данном участке ЛЭП; **Block_margin_DE** – значение запаса по зоне блокирования АПВ; **Total_travel_time** – полное время распространения волн по всей ЛЭП; **External_fault_DE_margin** – запас по зоне, соответствующей повреждению на ЛЭП.

Если подтверждается успешное определение времени фронта волн с обоих концов ЛЭП, то для дальнейших расчетов берутся эти значения, иначе – берутся значения времени, соответствующие максимуму сигналов.

Вычисляется чистое время распространения от КЗ до локального устройства.

Задаются начальные значения для последующих расчетов.

Проверка попадания места повреждения в зону, соответствующую повреждению на ЛЭП.

Рисунок В.5.2 – Алгоритм расчета места повреждения по двустороннему замеру времени

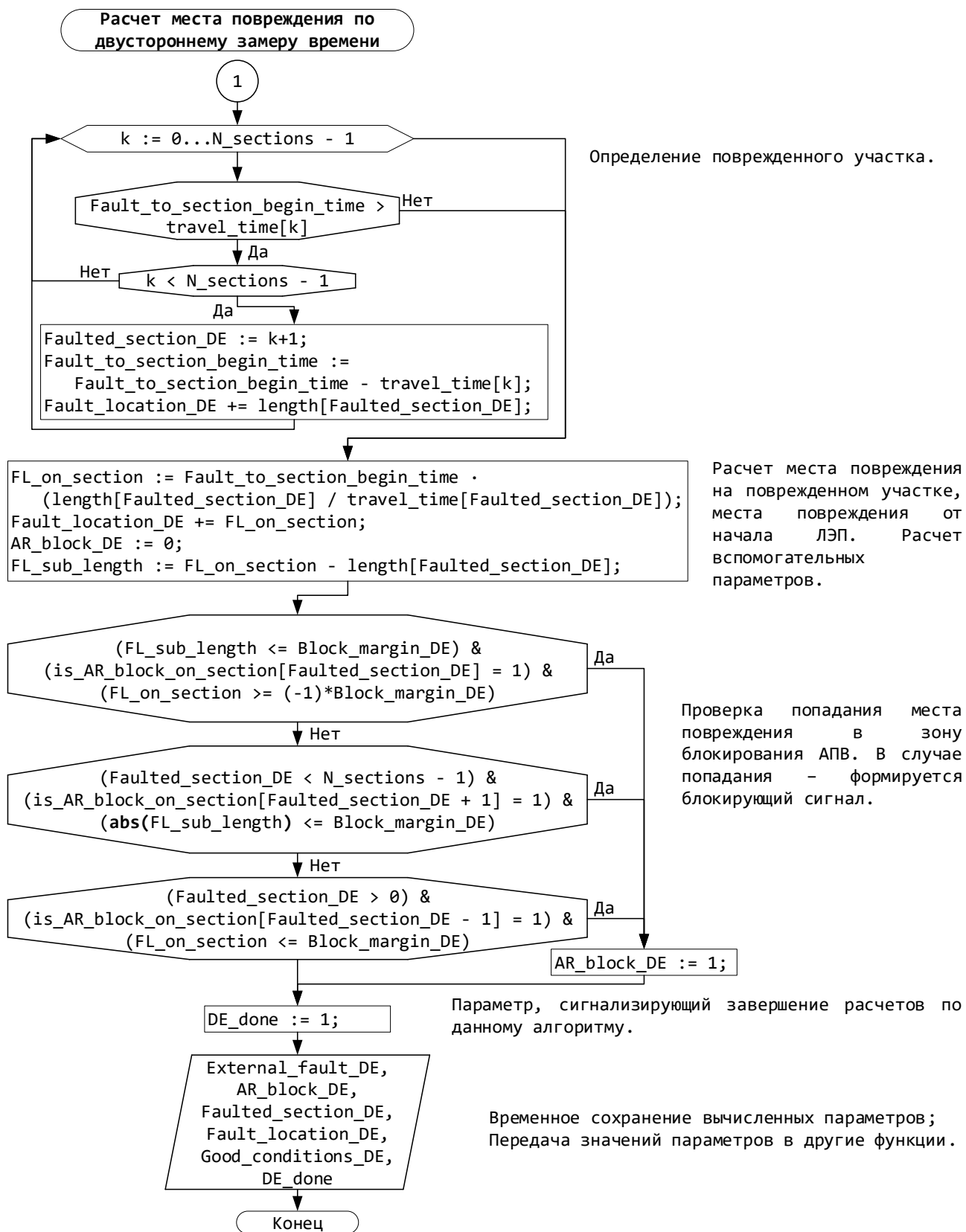


Рисунок В.5.3 – Алгоритм расчета места повреждения по двустороннему замеру времени (продолжение)

5.2 Функция расчета поврежденного участка по двустороннему замеру амплитуды

Основной задачей этой функции является определение поврежденного участка, используя двусторонний замер амплитуды волн по концам ЛЭП, и формирование сигнала запрета/разрешения АВП КВЛ.

Общий порядок (этапы) выполнения функции показан на рисунке В.5.4. Описание действий на отдельных этапах показано на рисунке В.5.5.

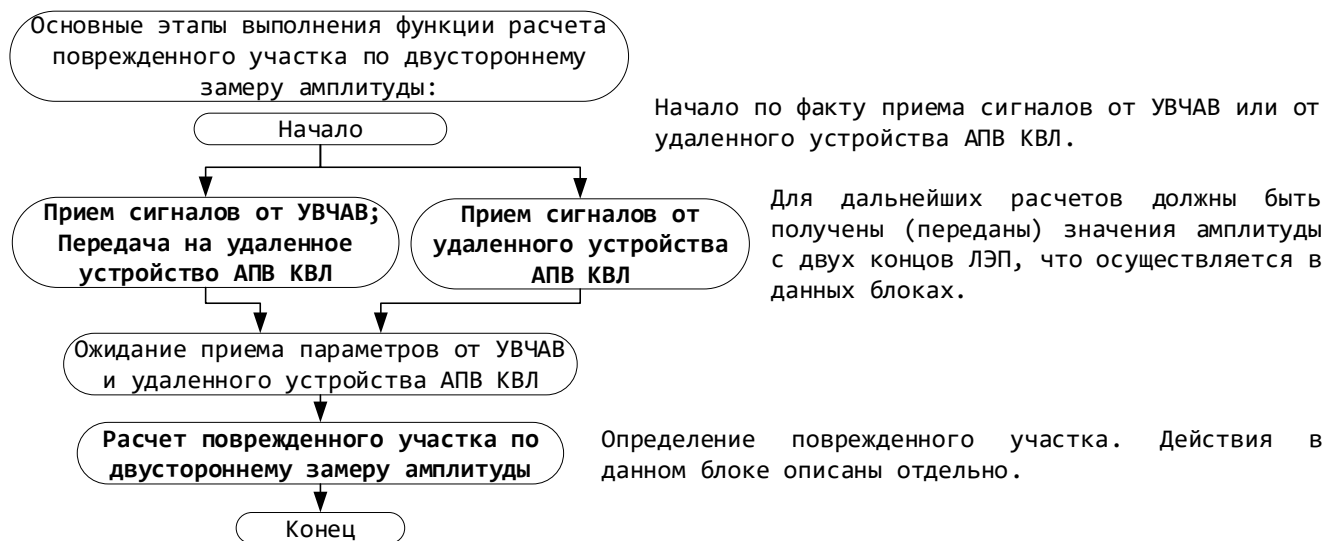


Рисунок В.5.4 – Основные этапы выполнения функции расчета поврежденного участка по двустороннему замеру амплитуды

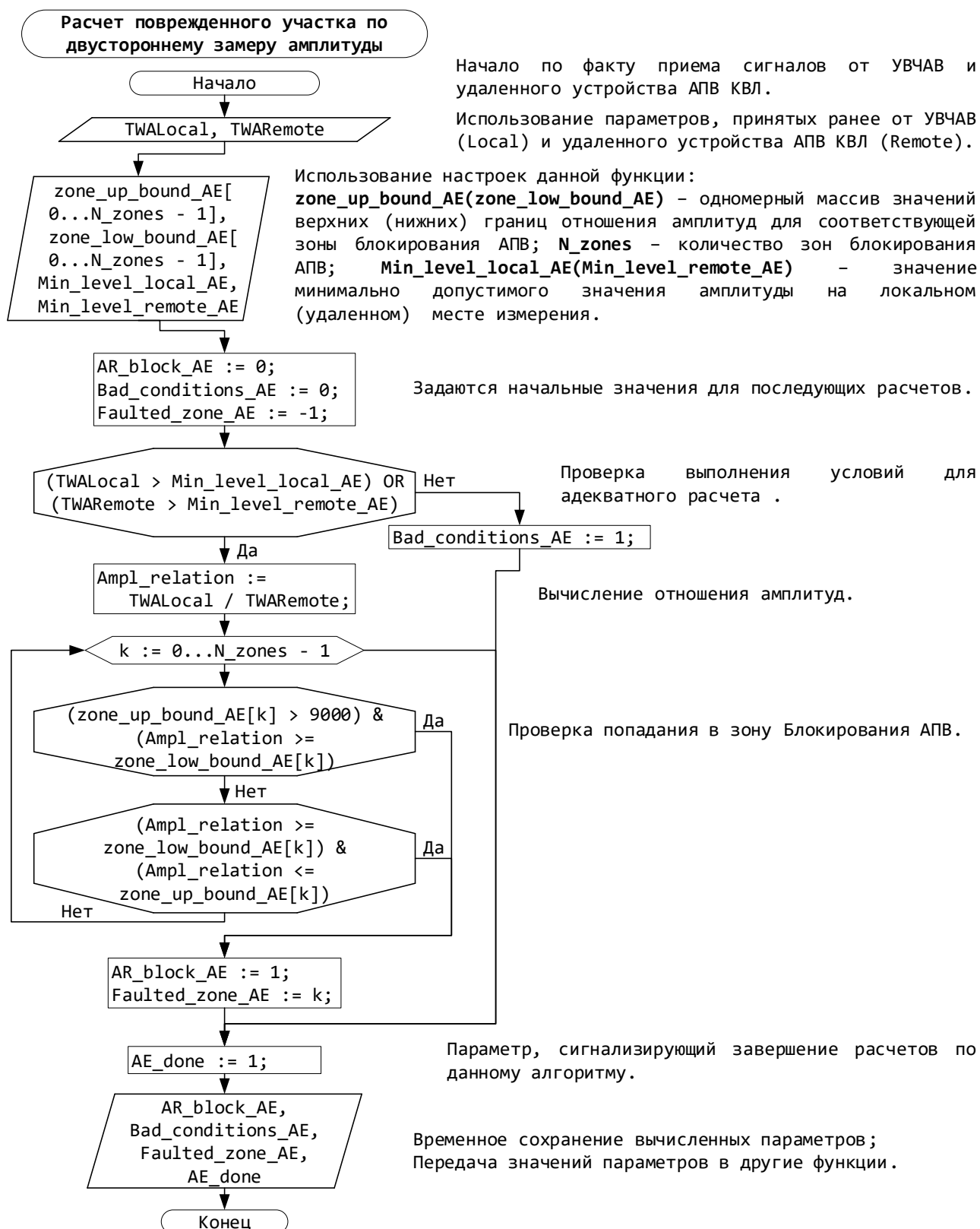


Рисунок В.5.5 – Алгоритм расчета поврежденного участка по двустороннему замеру амплитуды

5.3 Функция оценки значений корреляции

Основной задачей этой функции является расчет поврежденного участка и расстояния до места повреждения, используя значение корреляции, и формирование сигнала

запрета/разрешения АВП КВЛ. Алгоритм оценки значений корреляции показан на рисунке В.5.6.

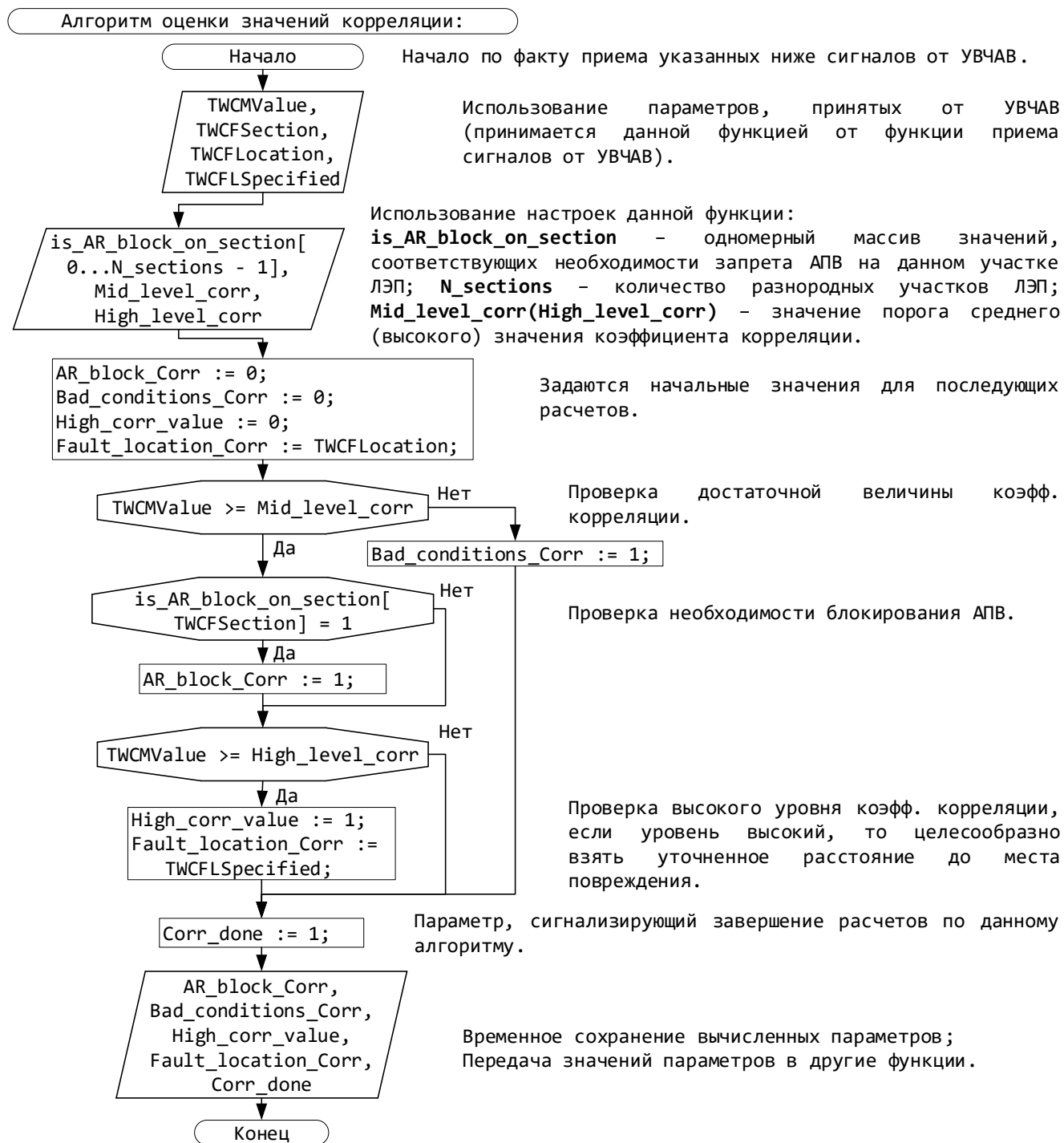


Рисунок В.5.6 – Алгоритм оценки значений корреляции

5.4 Функция итоговой оценки места повреждения

Основной задачей этой функции является расчет итоговой оценки расстояния до места повреждения.

Общий порядок (этапы) выполнения функции показан на рисунке В.5.7. Описание действий на отдельных этапах показано на рисунках В.5.8 – В.5.14.

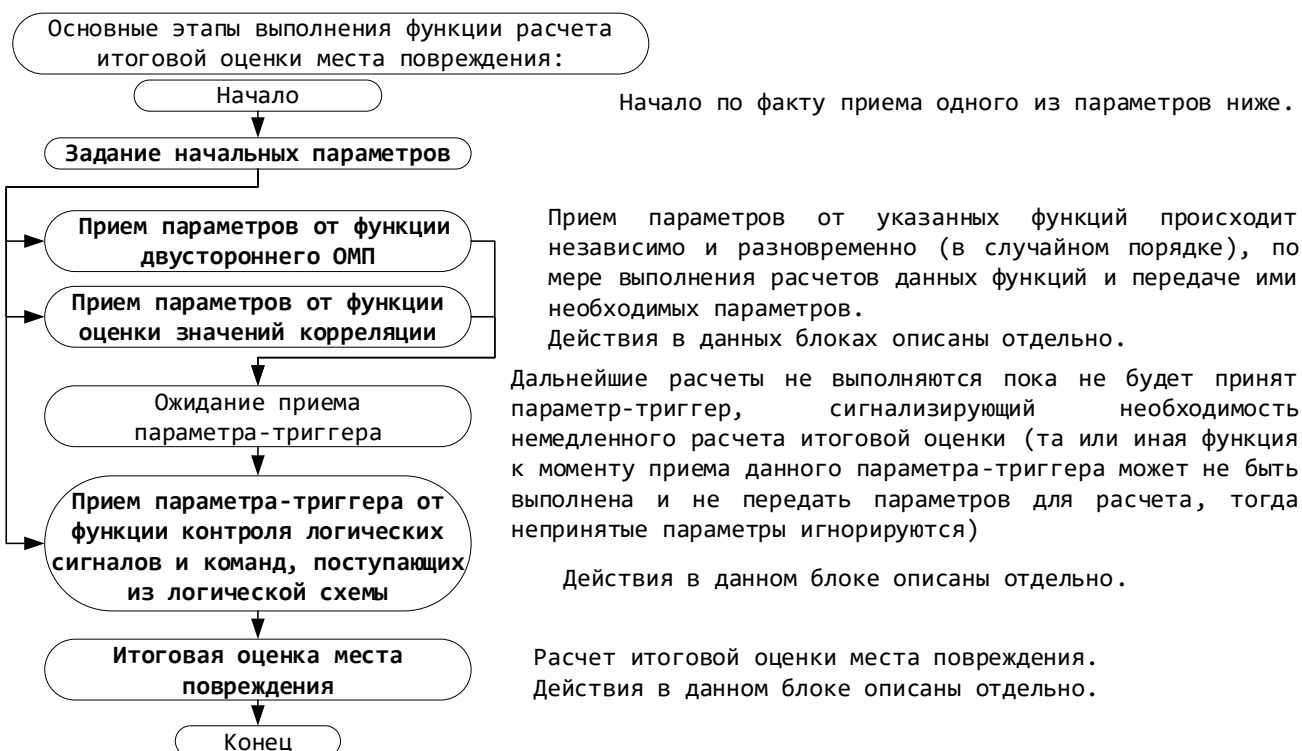


Рисунок В.5.7 – Основные этапы выполнения функции расчета итоговой оценки места повреждения

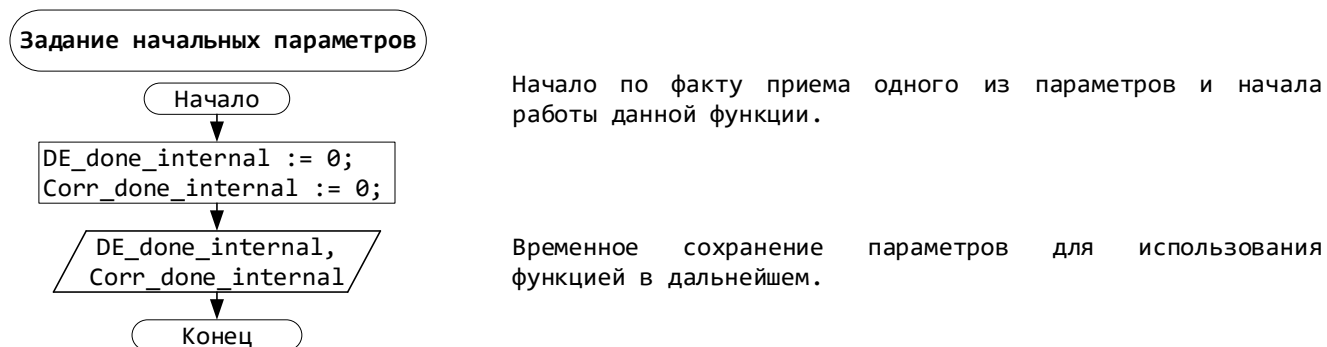


Рисунок В.5.8 – Действия при задании начальных параметров

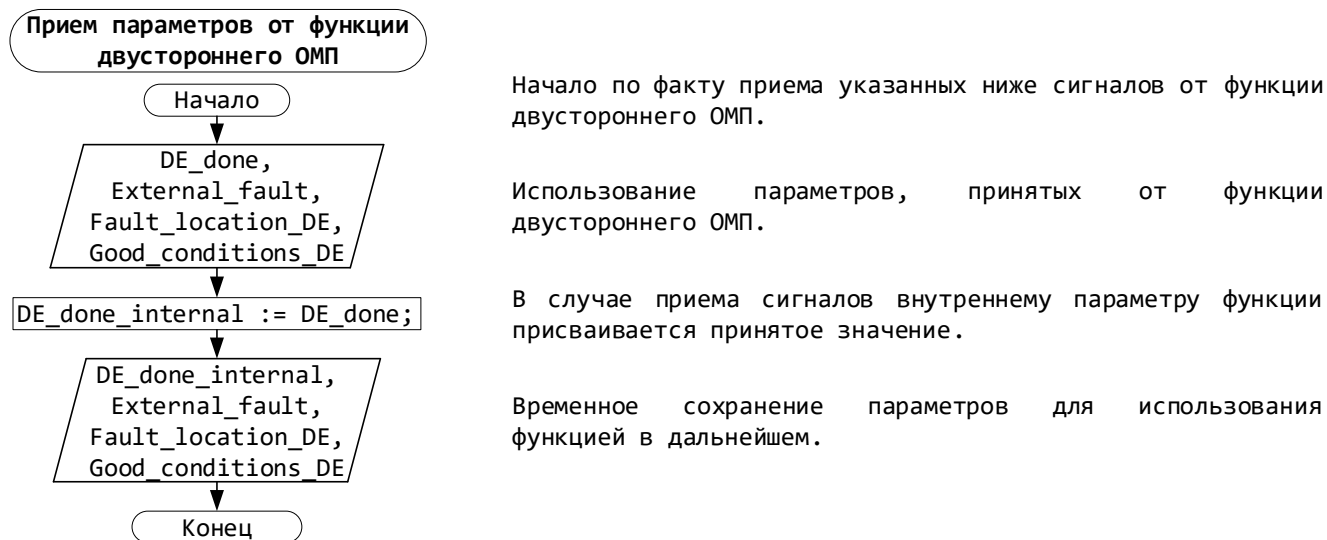


Рисунок В.5.9 – Действия при приеме параметров от функции двустороннего ОМП

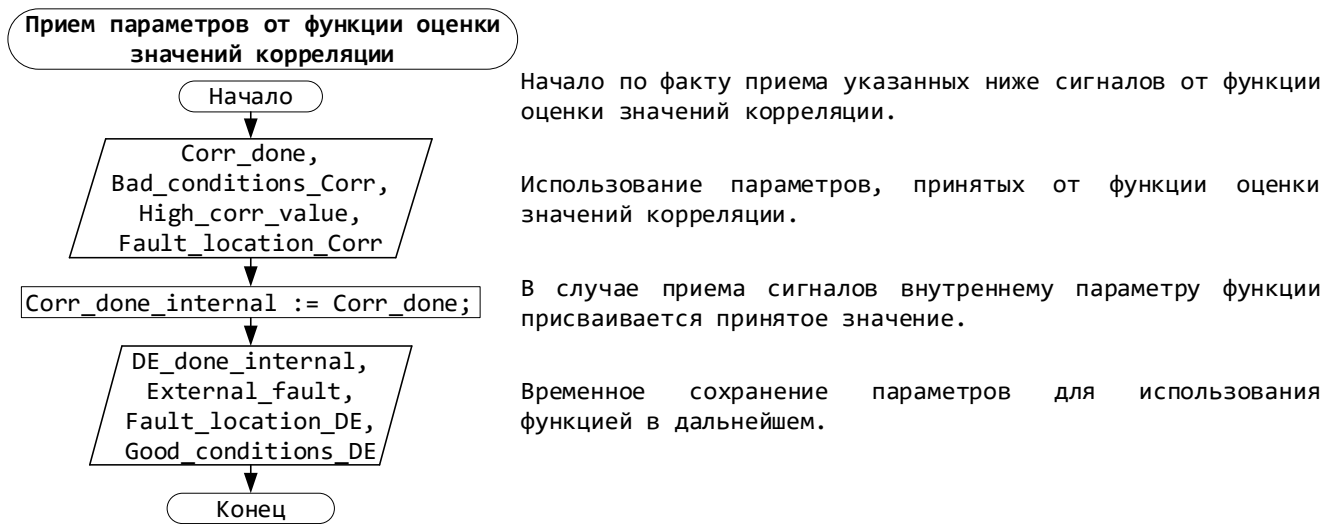


Рисунок В.5.10 – Действия при приеме параметров от функции оценки значений корреляции

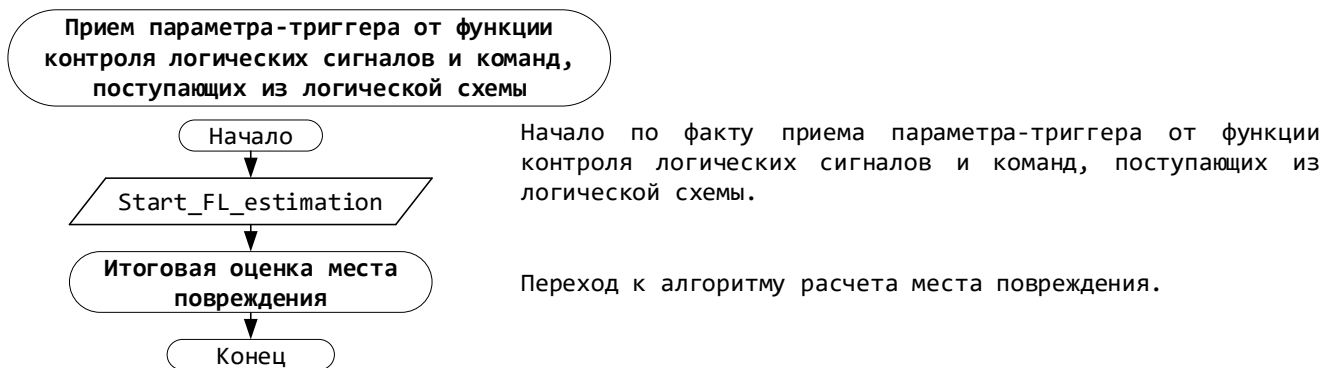
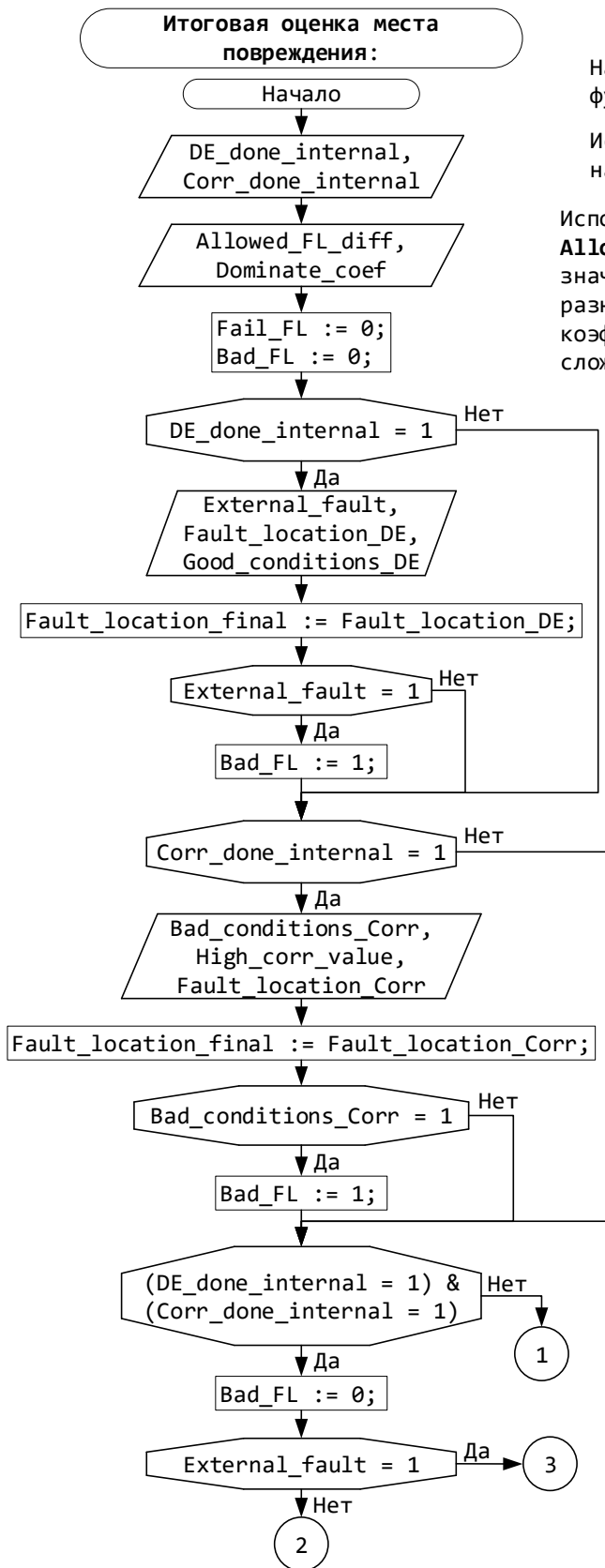


Рисунок В.5.11 – Действия при приеме параметра-триггера от функции контроля логических сигналов и команд, поступающих из логической схемы



Начало по факту приема параметра-триггера от функции контроля логических сигналов и команд.

Использование параметров, заданных (вычисленных) на предыдущих этапах данной функции.

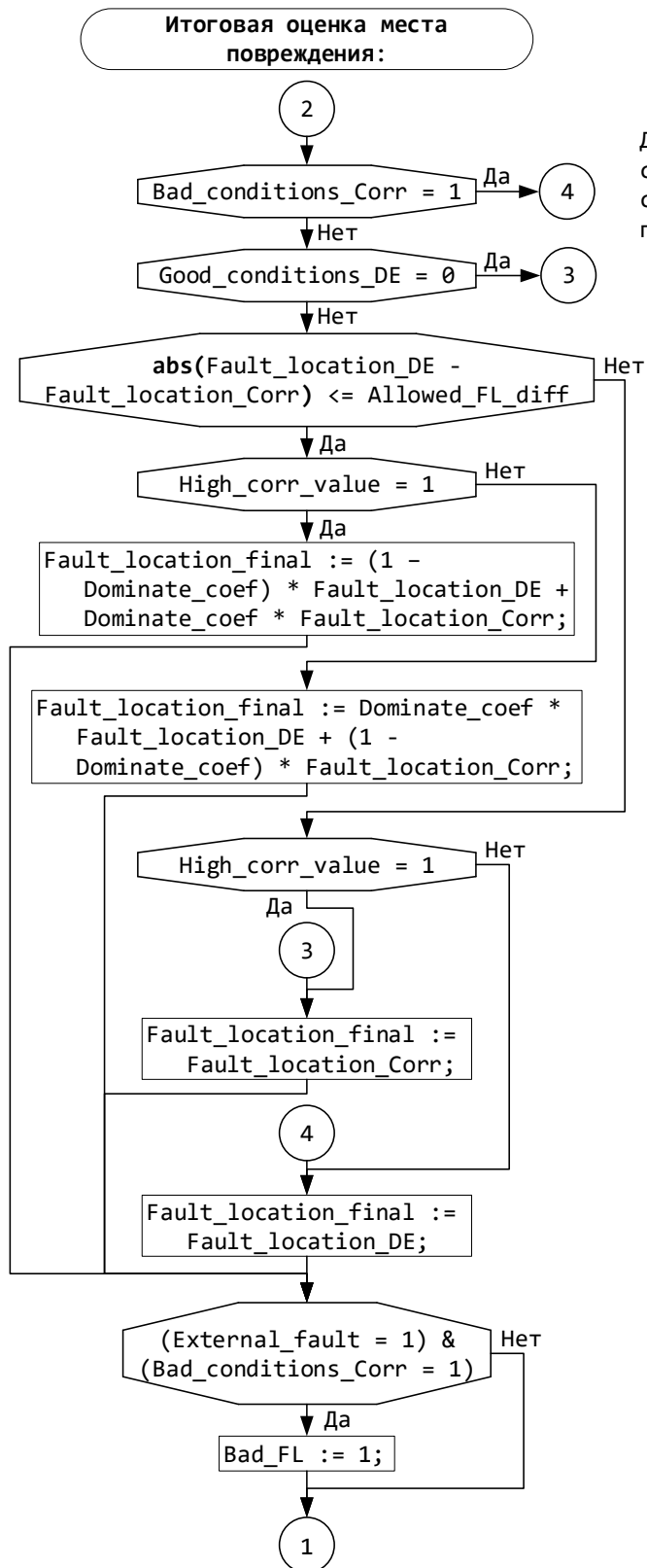
Использование настроек данной функции:
Allowed_FL_diff – величина допустимой разницы между значениями расстояния до места повреждения от разных функций; **Dominate_coef** – значение весового коэффициента для доминирующего показателя при сложной оценке расстояния до места повреждения.

Использование параметров, принятых от функции двустороннего ОМП, если они были приняты.

Использование параметров, принятых от функции оценки значений корреляции, если они были приняты.

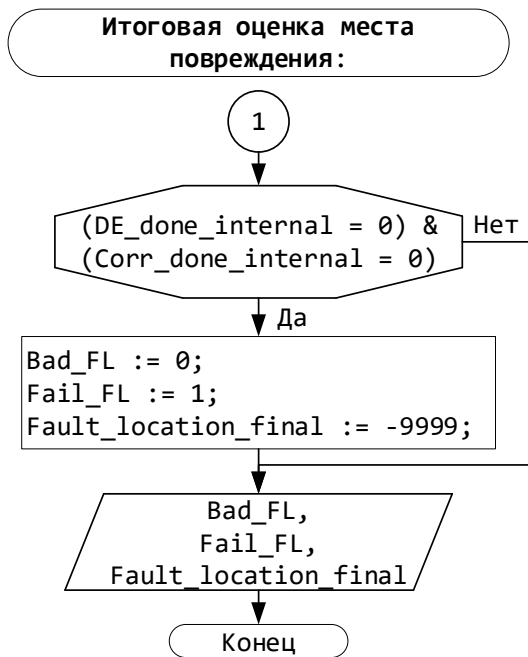
Далее происходит проверка различных вариантов сочетания параметров для выбора соответствующего сценария расчета оценки места повреждения.

Рисунок В.5.12 – Алгоритм расчета итоговой оценки места повреждения



Далее происходит проверка различных вариантов сочетания параметров для выбора соответствующего сценария расчета оценки места повреждения.

Рисунок В.5.13 – Алгоритм расчета итоговой оценки места повреждения (продолжение)



Значения рассчитываемых параметров для случая, когда не были приняты параметры ни от одной отдельной функции расчета места повреждения.

Временное сохранение вычисленных параметров;
Передача значений параметров в другие функции.

Рисунок В.5.14 – Алгоритм расчета итоговой оценки места повреждения (продолжение)

5.5 Функция логики принятия решений

Основной задачей этой функции является прием логических сигналов, передаваемых в логическую схему от других функций, обработка их в соответствии с внутренней логической схемой и передача вычисленных логических сигналов на отдельные функции.

5. Функции работы УОПЧ

Основными функциями узла обработки сигналов промышленной частоты являются:

- Измерение аналоговых сигналов тока и напряжения ПЧ, формирование логических сигналов измерительных и пусковых органов ПЧ, их передача на УОСиПР;
- Прием дискретных сигналов от внешних устройств РЗА, формирование соответствующих логических сигналов и их передача на УОСиПР;
- Прием дискретных логических сигналов от УОСиПР и их передача на внешние устройства РЗА в виде дискретных физических сигналов путем замыкания соответствующих реле или путем передачи информации по выбранному протоколу цифровой связи, например, по протоколу GOOSE в соответствии с МЭК 61850.

6. Функции УИЧМ

Основными функциями узла интерфейса человек-машина являются:

- Чтение и изменение настроек (уставок) устройства по команде оператора, передача настроек на другие вычислительные узлы;
- Передача параметров-команд оператора на другие вычислительные узлы;

- Прием сигналов и параметров от других вычислительных узлов и их отображение заданным способом;
- Предоставление интерфейса к чтению журнала событий;
- Предоставление интерфейса к загрузке осциллограмм.

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Вариации корреляционных алгоритмов распознавания волнового портрета при дополнительной предобработке регистрируемого сигнала

В результате исследований были разработаны 2 дополнительных алгоритма одностороннего ОМП и АПВ КВЛ. Оба алгоритма основаны на использовании кросскорреляции эталонных волновых портретов, получаемых путем имитационного моделирования, и реального сигнала, замеряемого устройством, который проходит предварительную цифровую обработку. Алгоритмы отличаются способом предварительной обработки сигналов и формирования волнового портрета.

На рисунке Г.1 представлена структурная схема разработанного корреляционного алгоритма распознавания волновых портретов с использованием упрощенной предварительной обработки сигнала. Исходный дискретный сигнал, формируемый при повреждении КВЛ (ИС на рисунке Г.1), со вторичных цепей преобразователей (ТТ, ТН) подвергается первичной цифровой обработке, заключающейся в цифровой фильтрации высокочастотных составляющих в широком спектре частот. Затем производится нормирование сигнала по дисперсии сигнала (или энергии) или по амплитуде (в случае использования детектора). Такие операции необходимы для сравнимости результатов корреляционной обработки, поскольку амплитуда и энергия волнового портрета зависят от фазы (момента) возникновения КЗ. В зависимости от момента возникновения КЗ крутизна фронта первичной волны меняется, а следовательно, меняется амплитуда регистрируемых переходных волновых составляющих, при этом соотношение между амплитудами первого импульса и последующих остается примерно одинаковой.

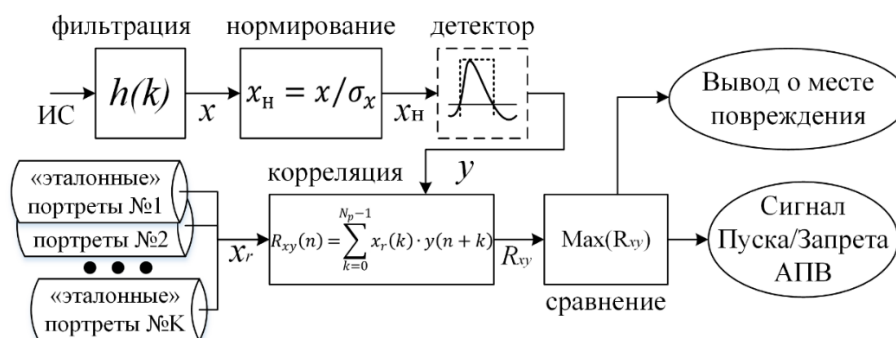


Рисунок Г.1 – Поясняющая диаграмма корреляционного алгоритма с упрощенной предварительной обработкой сигналов

Поскольку основная часть информации волнового портрета содержится во временной последовательности импульсов и их полярности, то целесообразен переход от портретов вида (рисунок Г.2, линия синего цвета) к упрощенной форме (рисунок Г.2, красная пунктирная линия). Поэтому согласно алгоритму (рисунок Г.1) возможно использования специального детектора, при котором обработанный сигнал поступает на пороговый элемент (детектор), который

осуществляет требуемое преобразование волнового портрета. Детектор (рисунок Г.1) «срабатывает» и формирует прямоугольный импульс на выходе до тех пор, пока абсолютное значение сигнала превышает уставку (рисунок Г.2). Полярность импульса зависит от полярности сигнала. Таким образом длительность формируемого прямоугольного импульса зависит от величины и длительности импульса в исходном сигнале.

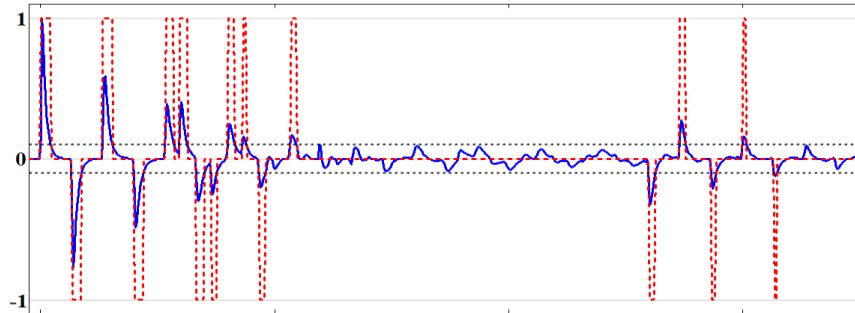


Рисунок Г.2 – Работа детектора

Далее производится вычисление корреляционных сумм между модифицированным волновым портретом и аналогичными эталонными волновыми портретами, полученными для воздушных и кабельных участков КВЛ (рисунок Г.1). При использовании детектора вычисляется нормированная корреляция, при отсутствии детектора – ненормированная. Значения рассчитанных корреляционных сумм сравниваются между собой по величине в блоке сравнения (рисунок Г.1). Вывод о поврежденном участке формируется по эталонному портрету, которому соответствует наибольшее из рассчитанных значений корреляционных сумм. В зависимости от принятого решения относительно поврежденного участка (кабельный или воздушный) выдается команда о запрете/разрешении АПВ КВЛ, а также по номеру эталонного портрета определяется соответствующее ему место повреждения.

Для снижения количества вычислений при расчете корреляции вместо сложных полноценных волновых портретов можно перейти к упрощенным, состоящим из прямоугольных импульсов единичной амплитуды и заданной длительности (рисунок Г.3). Каждый импульс формируется путем фиксации времени появления и полярности импульсов. Структурная схема алгоритма, реализующего определение поврежденного участка КВЛ со сложной предварительной обработкой сигнала и формированием упрощенного волнового портрета, показана на рисунке Г.4.

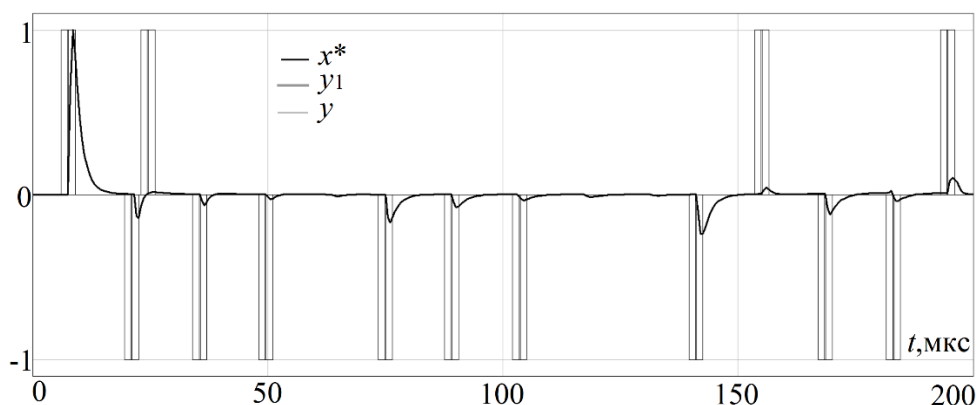


Рисунок Г.3 – Формирование упрощенного волнового портрета

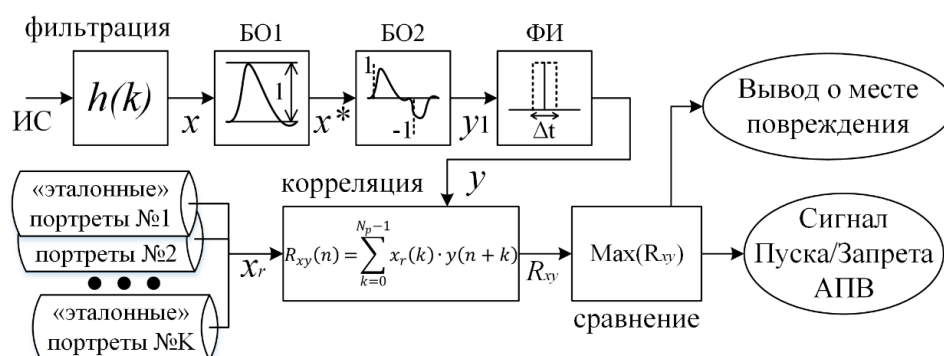


Рисунок Г.4 – Поясняющая диаграмма алгоритма определения поврежденного участка и места повреждения КВЛ с использованием сложной предварительной обработки сигнала

Отличия обработки волнового сигнала по этому алгоритму в отличие от первого следующие. После цифровой фильтрации в блоке обработки (БО1) производится нормирование сигнала по амплитуде первого импульса (рисунок Г.3, сплошная утолщенная линия черного цвета) для того, чтобы исключить зависимость метода от фазы возникновения КЗ. Далее в БО2 производится определение времени прибытия для каждой волны достаточно большой амплитуды и формирование сигнала, содержащего единичные импульсы, соответствующие определенным временам их прихода, имеющие ту же полярность, что и волны (рисунок Г.3, серая линия). В формирователе импульсов (ФИ) каждый единичный импульс расширяется на определенное значение в отрицательную и положительную сторону по шкале времени для обеспечения частичного наложения сигналов «соседних» волновых портретов. Таким образом, на выходе ФИ (рисунок Г.4) получается сигнал, имеющий вид, показанный на рисунок Г.3 сплошной тонкой линией, и названный упрощенным волновым портретом. После обработки видоизмененный сигнал поступает в блок вычисления корреляции (ВК на рисунке Г.4). При этом целесообразно вычислять нормированную корреляцию. В этом алгоритме наиболее сложным является реализация БО2, при этом могут быть использованы различные методы, в том числе корреляционный анализ или согласованная фильтрация.

Переход к упрощенным волновым портретам в алгоритмах позволяет перейти к знаковой корреляции и снизить вычислительную нагрузку на процессор устройства, реализующего этот алгоритм. Это достигается за счет того, что при вычислении корреляции не требуется перемножать числовые значения, а достаточно логически сравнивать полярности импульсов и накапливать сумму при совпадении знаков.

Однако стоит отметить, что оба алгоритма предполагают относительно сложную предварительную обработку сигнала и обнаружение точного момента прибытия переотраженных волн к месту измерения. Несмотря на то, что в модельных сигналах, ничем не искаженных, выполнить это относительно просто, в реальных сигналах, как отмечено в главе 4, фронты волн могут быть искажены, что является серьезной помехой в обнаружении переотраженных волн в сигналах, поэтому указанная задача является на практике нетривиальной. Поэтому без дополнительных опытных исследований и разработки специальных алгоритмов обнаружения волн применять вышеописанные алгоритмы корреляционной обработки в реальном устройстве преждевременно.

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Результаты интеллектуальной деятельности и Акты внедрения

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ
НА ИЗОБРЕТЕНИЕ
№ 2658673

Способ автоматического повторного включения кабельно-воздушной линии электропередачи

Патентообладатель: *Куликов Александр Леонидович (RU)*

Авторы: *Куликов Александр Леонидович (RU), Лоскутов Антон Алексеевич (RU), Пелевин Павел Сергеевич (RU)*

Заявка № 2017133565
Приоритет изобретения 26 сентября 2017 г.
Дата государственной регистрации в
Государственном реестре изобретений
Российской Федерации 22 июня 2018 г.
Срок действия исключительного права
на изобретение истекает 26 сентября 2037 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности



Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2020612951

Программа формирования набора сигналов волнового
переходного процесса на линиях электропередачи

Правообладатель: *Пелевин Павел Сергеевич (RU)*Автор: *Пелевин Павел Сергеевич (RU)*

Заявка № 2020612017

Дата поступления 29 февраля 2020 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 06 марта 2020 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

 Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2719763

Способ автоматического повторного включения кабельно-воздушной линии электропередачи

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

Авторы: *Куликов Александр Леонидович (RU), Пелевин Павел Сергеевич (RU), Лоскутов Антон Алексеевич (RU)*

Заявка № 2019143621

Приоритет изобретения 25 декабря 2019 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 23 апреля 2020 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 25 декабря 2039 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев



ОВИИСТ
НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ



**ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ
 ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ
 НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ
 ПРЕДПРИЯТИЕ
 «О В И С Т»**

111524, г. Москва, ул. Электродная, дом 10,
 строение 21, эт. 2, пом. II, ком. 6
 Тел.: (495) 672-70-61, 672-70-21, 672-70-09
<http://www.ovist.ru>, e-mail: info@ovist.ru
 ОКПО 18106319, ОГРН 1027700540328
 ИНН/КПП 7720018815 / 772001001
 р/с № 40702810538000192050
 ПАО СБЕРБАНК г. Москва
 к/с № 30101810400000000225,
 БИК 044525225

УТВЕРЖДАЮ

генеральный директор ООО НПП «ОВИИСТ»

Д.А. Мишин

«11» сентября 2023 г.

АКТ

о внедрении результатов кандидатской диссертации Пелевина Павла Сергеевича

Настоящим актом удостоверяю, что результаты диссертации Пелевина Павла Сергеевича на тему «Автоматическое повторное включение высоковольтных кабельно-воздушных линий электропередачи с применением волновых методов», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.2 – «Электротехнические комплексы и системы» используются в научно-исследовательской и производственной практике ООО НПП «ОВИИСТ».

Результаты исследований использовались при реализации функции автоматизации управления выключателем в терминалах релейной защиты, установленных в опытно-промышленную эксплуатацию.

Материалы диссертационной работы учтены в качестве направлений совершенствования разрабатываемых устройств релейной защиты в части логики автоматического повторного включения, реализации перспективных алгоритмов цифровой обработки сигналов, позволяющих с высокой точностью определить поврежденный участок и место повреждения ЛЭП.

Главный инженер

И.А. Сенин

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
 федеральное государственное бюджетное
 образовательное учреждение высшего образования
 «Нижегородский государственный технический
 университет им. Р.Е. Алексеева»
 (НГТУ)

АКТ

19.09.2023 № 21.2-150

г. Нижний Новгород

УТВЕРЖДАЮ
 Первый проректор - проректор по
 образовательной деятельности НГТУ

Ивашкин Е.Г.



2023 г.

О внедрении в учебный процесс результатов кандидатской диссертации Пелевина П.С.

Мы, нижеподписавшиеся, начальник учебного отдела ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева» (НГТУ) Мухина И.В., директор образовательно-научного института электроэнергетики НГТУ, д.т.н., доцент Дарьенков А.Б., заведующий кафедрой «Электроэнергетика, электроснабжение и силовая электроника» НГТУ, к.т.н., доцент Севостьянов А.А., составили настоящий акт о том, что материалы диссертационной работы Пелевина П.С.: "Автоматическое повторное включение высоковольтных кабельно-воздушных линий электропередачи с применением волновых методов" внедрены в учебный процесс кафедры "Электроэнергетика, электроснабжение и силовая электроника" НГТУ.

Материалы диссертационной работы используются при чтении лекций по курсам "Автоматизация и управление систем электроснабжения", "Компьютерные, сетевые и информационные технологии", "Средства автоматизированного анализа и управления СЭС", "Цифровая обработка сигналов" для магистров по направлению 13.04.02 "Электроэнергетика и электротехника" и при выполнении выпускных квалификационных работ.


Начальник учебного
 отдела НГТУ

 Мухина И.В.

Директор образовательно-научного
 института электроэнергетики НГТУ,
 к.т.н., доцент

 Дарьенков А.Б.

Заведующий кафедрой
 "Электроэнергетика,
 электроснабжение и силовая
 электроника" НГТУ, к.т.н., доцент

 Севостьянов А.А.