

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Нижегородский государственный технический университет
им. Р.Е. Алексеева»

На правах рукописи



Подшивалин Андрей Николаевич

СИСТЕМОТЕХНИКА ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ
ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ
ОБРАБОТКИ ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ

Специальность 2.4.2 – «Электротехнические комплексы и системы»

Диссертация на соискание ученой степени
доктора технических наук

Научный консультант
д.т.н., профессор
Куликов Александр Леонидович

Нижний Новгород 2024

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	8
ГЛАВА 1 РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ОБРАБОТКИ ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ.....	17
1.1 Формирование системотехнических решений защиты и автоматики в условиях технологического развития электротехнических комплексов линий электропередачи	17
1.1.1 Особенности развития технических решений защиты и автоматики линий электропередачи	17
1.1.2 Постановка информационных задач и методологическая основа защиты и автоматики линий электропередачи	25
1.2 Принципы аналитического исследования распознаваемости установившихся аварийных режимов линий электропередачи	37
1.3 Формирование распознающих модулей защиты на основе многомерных структур и разработка подходов к их обучению.....	42
1.3.1 Использование оптимизационных методов в защите и автоматике линий электропередачи	42
1.3.2 Разработка подходов к расчету уставок защиты и автоматики линий электропередачи на основе процедур обучения.....	45
1.3.3 Синтез гибких структур защиты линий с использованием условного преобразования замеров.....	49
1.4 Выводы.....	54
ГЛАВА 2 ИССЛЕДОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ЗАДАЧ ЦИФРОВОЙ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ, СВЯЗАННЫХ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМ ИЗМЕРЕНИЕМ ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ	56
2.1 Анализ информационных задач и принципов измерения токов и напряжений в условиях цифровой трансформации комплекса линии электропередачи	56
2.2 Разработка методов верификации измерений токов и напряжений на основе избыточной информации	58
2.2.1 Постановка задачи диагностики измерительных каналов защиты и автоматики	58
2.2.2 Особенности диагностики измерительных каналов в простой электрической цепи.....	60

2.2.3 Разработка методов совмещения дискретной и аналоговой информации в задаче диагностики измерительных каналов.....	65
2.2.4 Особенности диагностики двух ошибок измерения в простой электрической цепи.....	68
2.2.5 Построение методов восстановления измерений токов на основе данных предварительной диагностики	71
2.2.6 Сравнительный анализ методов диагностики и восстановления измерений токов в схемах с дублированием измерительных преобразователей	74
2.2.7 Исследование возможностей повышения точности оценки измерений с использованием итерационного алгоритма	78
2.2.8 Практические аспекты применения алгоритмов идентификации и восполнения погрешности измерений на подстанции	80
2.3 Разработка методов передачи информации об измерениях на подстанции и между подстанциями	82
2.3.1 Повышение информированности защиты и автоматики за счет применения расширенного профиля передачи мгновенных значений аналоговых сигналов для дифференциальной защиты линии	82
2.3.2 Исследование различных структур коммуникационной среды для дифференциальной защиты многоконцевой линии электропередачи	90
2.4 Выводы.....	98

ГЛАВА 3 ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА СХЕМ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ В АВАРИЙНЫХ И НЕСТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМАХ100

3.1 Новые подходы к автоматике ликвидации асинхронного режима на основе алгоритмической модели в мгновенных значениях.....	100
3.1.1 Разработка каскадной алгоритмической модели линии электропередачи	100
3.1.2 Результаты испытаний каскадных алгоритмических моделей в режиме асинхронного хода	107
3.2 Исследование пусковых органов защиты и автоматики линии электропередачи и разработка методики их настройки.....	110
3.2.1 Анализ и эквивалентные преобразования структуры пускового органа по приращению токов	110
3.2.2 Исследование характеристик пускового органа в условиях электромагнитного переходного процесса.....	115
3.3 Разработка принципов расчета параметров срабатывания	

измерительных органов автоматики ликвидации асинхронного режима	123
3.3.1 Практические аспекты настройки токовых пусковых органов защиты и автоматики	123
3.3.2 Особенности настройки пусковых органов сопротивления на линиях электропередачи с ответвлениями	132
3.4 Оптимизация испытаний защиты и автоматики в условиях нестационарных режимов с использованием низкочастотной имитационной модели	141
3.4.1 Разработка структуры модели электропередачи в нестационарных режимах	141
3.4.2 Реализация комбинированной модели электропередачи и ее оценка при испытаниях модулей защиты.....	146
3.5 Анализ опыта испытаний устройств защиты и автоматики в нестационарных режимах.....	154
3.6 Выводы.....	158
ГЛАВА 4 РАЗВИТИЕ СРЕДСТВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА ПОВРЕЖДЕНИЯ ПО ПАРАМЕТРАМ АВАРИЙНОГО РЕЖИМА НА ОСНОВЕ АЛГОРИТМОВ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ	160
4.1 Методология исследования явления распознаваемости в задаче определения места повреждения	160
4.1.1 Постановка задачи определения ограничений в распознавании коротких замыканий линий электропередачи.....	161
4.1.2 Оценка методической погрешности средств определения места повреждения	167
4.1.3 Оценка погрешности средств определения места повреждения в условиях ограниченной точности измерений	170
4.2 Иллюстрация метода интервальной локации повреждений однородной линии электропередачи.....	173
4.3 Анализ опыта эксплуатации устройств определения места повреждения и выявление значимых факторов их погрешности	180
4.4 Постановка задачи и алгоритм выделения информационных составляющих для устройств определения места повреждения.....	191
4.5 Выводы.....	195
ГЛАВА 5 РАЗРАБОТКА СИСТЕМОТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПАССИВНОГО ВОЛНОВОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА ПОВРЕЖДЕНИЯ	197
5.1 Исследование переходных процессов, вызванных повреждением	

линий электропередачи	197
5.1.1 Анализ переходного процесса в токах и напряжениях при коммутации линии электропередачи методом спектральных составляющих	197
5.1.2 Создание модели сигнала переходного процесса на ограниченном временном интервале	202
5.1.3 Экспериментальное исследование статистических характеристик альтернативного режима	204
5.2 Синтез измерительных органов для устройств определения места повреждения с использованием статистической обработки сигналов	213
5.2.1 Анализ принципов выявления фронта волны при повреждениях ...	213
5.2.2 Исследование реакции измерительного органа на прямоугольный импульс на фоне нулевого предшествующего режима	215
5.2.3 Исследование особенностей срабатывания измерительного органа при нормальном распределении сигнала в предшествующем режиме ...	217
5.2.4 Исследование особенностей срабатывания измерительного органа в условиях периодического сигнала в предшествующем режиме	221
5.2.5 Исследование особенностей срабатывания измерительных органов в условиях линейного нарастания сигнала отслеживаемого режима	224
5.3 Повышение чувствительности измерительных органов волнового определения места повреждения путем компенсации искажения сигналов	229
5.3.1 Синтез модели электрической сети с применением операторного метода	229
5.3.2 Компенсация искажений измерительных преобразователей с использованием их моделей	233
5.3.3 Синтез модели линии и электрической сети и ее использование при выявлении отражений от повреждения	240
5.4 Синтез алгоритмов определения места повреждения на основе поэтапной обработки временной информации	243
5.4.1 Синтез модели волновых процессов в электрической сети	244
5.4.2 Разработка метода волновых рядов для определения места повреждения линии электропередачи	248
5.4.3 Исследование чувствительности метода волновых рядов к погрешности срабатывания измерительных органов	251
5.4.4 Реализация односторонней оценки места повреждения методом	

волновых рядов и проверка на данных реального короткого замыкания	253
5.5 Анализ результатов проектирования и эксплуатации устройств волнового определения места повреждения	256
5.5.1 Реализация алгоритмов волнового определения места повреждения в автоматических системах на основе автономных устройств.....	256
5.5.2 Анализ результатов полигонных испытаний устройств ТОР 300 ВОМП.....	257
5.5.3 Функционирование системы волнового определения места повреждения при искусственных и естественных повреждениях линии электропередачи	260
5.6 Выводы.....	265
ГЛАВА 6 СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМОТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ АКТИВНОГО ВОЛНОВОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА ПОВРЕЖДЕНИЯ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ.....	267
6.1 Исследование метода активного волнового определения места повреждения трехпроводной линии электропередачи.....	267
6.1.1 Анализ принципов активной локации линий электропередачи.....	267
6.1.2 Анализ особенностей зондирования линии электропередачи по одной фазе.....	270
6.1.3 Разработка алгоритма зондирования секционированных линий электропередачи распределительных сетей.....	273
6.2 Исследование распространения зондирующего сигнала в линии электропередачи	276
6.2.1 Анализ закономерностей отражения сигнала от однородной линии электропередачи	276
6.2.2 Синтез и сравнительный анализ численных моделей отражения и преломления волны в линии электропередачи	279
6.2.3 Анализ влияния отражения и преломления волны в линии электропередачи на оценку ее состояния	286
6.3 Синтез структуры измерительного органа активного волнового определения места повреждения с повышенной чувствительностью.....	292
6.4 Оценка состояния линии электропередачи средствами активного волнового определения места повреждения в условиях гололеда	300
6.5 Применение средств активного волнового определения места повреждения для контролируемого повторного включения кабельно-	

воздушной линии	311
6.5.1 Разработка технического решения с использованием технологий определения места повреждения	311
6.5.2 Подтверждение эксплуатационных характеристик системы АПВК результатами эксплуатационных испытаний	319
6.6 Выводы	324
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	327
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ	331
ЛИТЕРАТУРА.....	333
ПРИЛОЖЕНИЕ А РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ К ГЛАВЕ 2	382
ПРИЛОЖЕНИЕ Б МАТЕРИАЛЫ О ВНЕДРЕНИИ	384

Введение

Актуальность темы. Развитие электроэнергетических систем (ЭЭС) и их отдельных элементов предполагают возрастающую интеграцию со средствами автоматизации, выполненными на основе информационно-вычислительной техники. Электротехнический комплекс линии электропередачи (ЛЭП) является ключевым элементом энергосистемы, а от надежности его работы зависят функционирование и эксплуатационная эффективность всей ЭЭС. Устройства релейной защиты и автоматики (РЗА), установленные на ЛЭП, предназначены для решения целого ряда частных и системных задач, среди которых выделяется группа, связанная с дистанционным выявлением и локализацией места повреждения. Дистанционная защита и средства определения места повреждения (ОМП), выполненные на различных принципах, характерны для большинства ЛЭП всех классов напряжения. Принятая схема их реализации включает пусковые измерительные органы, выявляющие изменение режимов ЛЭП. Многовариантность режимов по причине большого числа варьируемых параметров, развитие отдельных процессов, включая асинхронный режим и синхронные качания, во времени служат источником ограничений в распознаваемости и распознавании ситуаций. Очевидные методы функционирования РЗА по параметрам аварийного (принужденного) режима получают развитие в алгоритмах, адаптированных к переходным процессам на коротких (единицы миллисекунд) интервалах, а также в высокочастотных способах. Среди последних выделяются активные локационные методы ОМП и диагностики с обработкой реакции ЛЭП на специализированные сигналы, применяемые к объекту под рабочим напряжением или без него. Цифровизация электроэнергетики создает предпосылки для развития электротехнических комплексов ЛЭП.

Существенный вклад в развитие темы диссертационного

исследования внесли российские и зарубежные ученые: А.И. Айзенфельд, В.И. Антонов, Е.А. Аржанников, Я.Л. Арцишевский, Г.И. Атабеков, А.Н. Висящев, Н.А. Дони, П.В. Илюшин, Р.И. Караев, В.А. Касимов, М.В. Костенко, А.Л. Куликов, В.Ф. Лачугин, Ю.Я. Лямец, Р.Г. Минуллин, В.И. Нагай, В.Г. Наровлянский, Г.С. Нудельман, Е.М. Ульяницкий, А.М. Федосеев, А.И. Федотов, Г.М. Шалыт, Ю.П. Шкарин, Э.М. Шнеерсон, В.А. Шуин, J. Izykowski, B. Kasztenny, M. Kezunovic, A.G. Phadke, M. Saha, E.O. Schweitzer, J.S. Thorp, G. Ziegler и другие.

Несмотря на значительные достижения, связанные с развитием алгоритмов и устройств РЗА ЛЭП, продолжается поиск новых рациональных решений, призванных автоматизировать процессы функционирования и технического обслуживания электротехнического комплекса ЛЭП. Микропроцессорные и коммуникационные технологии последних десятилетий значительно расширили возможности совместной обработки информации, полученной от различных датчиков, установленных на ЛЭП. Этому отвечают методы пространственно-временной обработки данных, учитывающие связность электрических процессов в отдельных частях системы. Производится интеллектуальная обработка информации и принятие решений на основе распознавания образов и накопленной базы знаний. К характерным особенностям новых методов можно отнести функционирование с максимальной распознающей способностью в условиях нарастающей информационной базы и способность к обучению.

Таким образом, задачи развития методов пространственно-временной обработки информации для осуществления защиты и автоматики ЛЭП, а также их приложения с учетом рационального распределения функций системы для удовлетворения современным требованиям, предъявляемым к РЗА, являются актуальными.

Объект исследования – системотехнические решения защиты и

автоматики в составе электротехнических комплексов линий электропередачи.

Предмет исследования – повышение чувствительности и быстродействия отдельных элементов и разработка новых устройств защиты и автоматики.

Цель работы заключается в исследовании, разработке и реализации новых методов и системотехнических решений, относящихся к защите и автоматике ЛЭП, на основе пространственно-временной обработки токов и напряжений. Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

1. Постановка информационных задач релейной защиты и задачи пространственно-временной обработки измерений токов и напряжений. Создание рациональных структур распознающих модулей релейной защиты и подходов к их обучению.

2. Исследование информационных задач, возникающих на цифровой подстанции в связи с передачей измерений для целей РЗА ЛЭП по вычислительной сети. Разработка методов верификации и восполнения недостающей информации для алгоритмов РЗА в соответствии со схемой подстанции.

3. Исследование опыта эксплуатации и возможностей совершенствования средств ОМП ЛЭП на основе пространственно-временной обработки токов и напряжений. Разработка аппарата интервального анализа для оценки режимной обстановки наблюдаемой ЛЭП и качества средств ОМП.

4. Разработка алгоритмических моделей для использования первичных информационных составляющих цифровой РЗА в виде отсчетов токов и напряжений. Применение пространственно-временной обработки сигналов в задачах локализации зоны и места повреждения ЛЭП и контроля

нестационарных режимов электропередачи.

5. Исследование нестационарных процессов, связанных с качаниями и асинхронным режимом на ЛЭП. Разработка методик расчета уставок измерительных органов тока и сопротивления для выявления этих режимов.

6. Анализ переходных процессов и постановка информационных задач волновой РЗА. Совершенствование алгоритмов волновых устройств РЗА за счет расширения информационной базы и пространственно-временной обработки данных.

7. Исследование информационных задач активного зондирования с целью ОМП и диагностики ЛЭП. Разработка способов повышения устойчивости функционирования локационных средств.

Методы исследования. При решении поставленных задач использовались методы теории систем, теории цепей, теоретических основ релейной защиты, теории управления, теории оптимизации и математического моделирования.

Теоретическая значимость и научная новизна. Получены результаты в области теоретических основ разработки и проектирования устройств релейной защиты, относящиеся к проблеме распознавания стационарных и нестационарных режимов, имитационному и алгоритмическому моделированию ЛЭП, анализу низкочастотных и высокочастотных процессов, **новизна** которых заключается в следующем:

1. Разработаны методы распознавания и принципы построения устройств защиты и автоматики ЛЭП на основе пространственно-временной обработки информации. Они предоставляют новые возможности повышения чувствительности и быстродействия как отдельных элементов, так и подсистемы РЗА комплекса ЛЭП в целом.

2. Предложены методы обучения распознающих модулей РЗА, отличающиеся использованием имитационных моделей и многомерных

преобразований. Разработанные методы универсальны по отношению к типу объектов и к РЗА различной степени сложности .

3. Разработан метод верификации и восполнения измерений на подстанции, отличающийся совместной обработкой пространственно-временной информации о токах, напряжениях и положении коммутационных аппаратов. Метод позволяет снизить размерность задачи распознавания в условиях избыточного числа измерений токов и напряжений.

4. Разработан метод каскадных алгоритмических моделей как пространственно-временное преобразование для анализа стационарных, нестационарных и переходных процессов в токах и напряжениях ЛЭП на основе дискретных измерений. Метод объединяет аппарат линейных фильтров и линейных моделей электрической сети. Благодаря низким вычислительным требованиям модели служат вспомогательным инструментом для быстродействующих алгоритмов выявления повреждения на ЛЭП и асинхронного режима.

5. Предложена методика исследования многофазных измерительных органов на основе переходных и амплитудно-частотных характеристик, а также отклика на типовые воздействия. Она позволила выявить граничные режимы и зоны распознаваемости нестационарных и переходных процессов в ЛЭП.

6. Разработан метод волнового ОМП ЛЭП на основе анализа многоэтапного переходного процесса, обусловленного повреждением. Предложенный метод волновых рядов реализует принцип нарастающей информационной базы, использует измерения токов и напряжений в одной или нескольких точках ЛЭП, инвариантен к топологии внешней сети и демонстрирует высокую устойчивость к шумам.

7. Предложены методы синтеза органов пуска и выявления фронта волны для целей ОМП ЛЭП на основе статистической обработки и алгоритмических моделей, полученных в результате идентификации. Такие

структуры пусковых органов обеспечивают повышенную точность фиксации времени, чувствительность и устойчивость к шумам.

8. Разработан способ активного зондирования ЛЭП, обладающий расширенными возможностями в части диагностики ее параметров в условиях обледенения проводов и отличающийся использованием сигналов с частотной модуляцией и дифференциальной обработкой измерений.

Практическая ценность результатов работы:

1. Разработанные методы распознавания служат основой для проектирования перспективных устройств РЗА с большим объемом измерений. Заложены принципы оптимизации элементарных характеристик в соответствии с возможностями аппаратного обеспечения устройств РЗА. Предложены методы усовершенствования и повышения чувствительности ОМП ЛЭП по параметрам аварийного режима.

2. Предложенные методы обучения РЗА на имитационных моделях позволяют выявлять границы распознаваемости режимов для задач определения зоны и места повреждения ЛЭП. Представленные характеристики используются при проектировании РЗА типовых ЛЭП высокого напряжения.

3. Алгоритмы верификации измерений на подстанции существенно повышают устойчивость функционирования устройств РЗА в условиях отказа или отклонения характеристик отдельных измерительных преобразователей или иного искажения их информации. Разработанные алгоритмы передачи информации между устройствами на подстанции и между подстанциями повышают устойчивость систем РЗА к воздействиям на электроэнергетическую инфраструктуру и обеспечивают высокую информированность защит.

4. Метод каскадного моделирования является основой для быстродействующих алгоритмов РЗА ЛЭП, реализующих расчеты с

использованием мгновенных значений токов и напряжений и обладающих расширенными частотными свойствами.

5. Исследование многофазных измерительных модулей послужило обоснованием структуры и методики настройки пусковых органов РЗА ЛЭП.

6. Разработанный метод волновых рядов позволяет значительно повысить распознающие свойства ОМП в условиях высокой неоднородности наблюдаемой электрической сети.

7. Результаты представленного анализа волновых переходных процессов в ЛЭП использованы при проектировании высокочастотного измерительного тракта на подстанции и входных цепей устройства ОМП, а предложенные методы синтеза измерительных органов – для создания алгоритма выявления фронта волны.

8. Разработанные методы в развитие активного локационного ОМП ЛЭП повышают успешность выявления повреждений и разрешающую способность средств ОМП. Результаты исследования гололедных отложений найдут применение для дистанционной диагностики ЛЭП.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Методы пространственно-временной обработки информационных составляющих токов и напряжений с использованием имитационных моделей и обучения для РЗА ЛЭП.

2. Метод верификации измерений тока и напряжения, а также восполнения информации на цифровой подстанции при функционировании РЗА ЛЭП.

3. Метод низкочастотного каскадного моделирования участка электрической сети с обработкой и формированием мгновенных значений токов и напряжений в ее узлах для применения в алгоритмах РЗА ЛЭП.

4. Структуры пусковых органов повышенной чувствительности и методики выбора параметров их срабатывания для автоматики ликвидации

асинхронного режима и дистанционной защиты ЛЭП.

5. Способы повышения точности и устройство ОМП ЛЭП по параметрам аварийного режима, основанные на пространственно-временной обработке информационных составляющих токов и напряжений.

6. Методика определения интервалов распознаваемости в задаче ОМП ЛЭП по параметрам аварийного режима.

7. Метод волновых рядов для ОМП как результат пространственно-временной обработки информации переходного процесса в напряжениях и токах, обусловленного коммутацией в месте повреждения ЛЭП.

8. Способы и устройство волнового ОМП воздушных ЛЭП на основе двухстороннего наблюдения волновых процессов в напряжениях и токах, а также методика его настройки.

9. Метод диагностики ЛЭП активным локационным способом в условиях гололеда и изменения ее параметров с использованием частотно-модулированных сигналов.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на международных и всероссийских научно-технических конференциях: Power System Protection (Блед, Словения, 2002 и 2004 гг.), коллоквиумах и сессиях СИГРЭ (Сидней, Австралия, 2003 г., Мадрид, Испания, 2007 г., Чеджу, Республика Корея, 2009 г., Париж, Франция, 2010 г., Лозанна, Швейцария, 2011 г., Белу Оризонти, Бразилия, 2013 г., Новая Зеландия, 2017 г.), IEE Developments in Power System Protection (Амстердам, Нидерланды, 2004 г.), IEEE PowerTech (С.-Петербург, Россия, 2005 г., Бухарест, Румыния, 2009 г.), RASWorld (Дублин, Ирландия, 2011 г.), Релейная защита и автоматика энергосистем (Москва, 2002, 2004, 2006, 2010, 2012, 2014 гг., С.-Петербург, 2017 г., Москва, 2021 г., Сочи, 2023 г.), Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем (Чебоксары, 2007, Москва, 2009 г., С.-Петербург, 2011 г., Екатеринбург, 2013 г., Сочи, 2015 г.), РелАвЭкспо (Чебоксары, 2012, 2017, 2019, 2021, 2023 гг.), Технологический

суверенитет России в области РЗА и АСУ ТП... (Чебоксары, 2024 г.), Релейная защита, низковольтная аппаратура... (Чебоксары, 2001 г.), Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем (Чебоксары, ЧГУ, 2001, 2003, 2011, 2017, 2019 гг.), Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике (Чебоксары, ЧГУ, 2000, 2002, 2016 гг.), Энергетика глазами молодежи (2013, 2018 гг.), заседания НП «НТС ЕЭС».

Структура диссертации. Диссертация состоит из шести глав. В первой главе выполнен анализ задач при распознавании режимов и состояний ЛЭП с точки зрения структуры и объема информации, способов ее получения и использования, выделены методы пространственно-временной обработки информации с целью создания перспективных систем РЗА ЛЭП. Во второй главе исследованы методы объединения пространственной информации в задачах верификации и восполнения измерений на подстанции, предложены рациональные методы обмена информацией между устройствами разных подстанций. В третьей главе представлены результаты разработки и исследования быстродействующих систем РЗА ЛЭП в нестационарных режимах, предложен инструментарий имитационного моделирования режимов. В четвертой главе представлены результаты анализа опыта эксплуатации устройств, использующих параметры аварийного режима для целей ОМП ЛЭП, и системотехнические решения для развития, повышения надежности и точности работы соответствующих устройств. В пятой главе предложены направления развития средств пассивного волнового ОМП ЛЭП на основе новых методов обработки информации, приведены результаты проектирования алгоритмов и апробации устройств пассивного волнового ОМП ЛЭП, разработанных при участии автора. В шестой главе рассмотрено применение методов активного зондирования для целей диагностики и ОМП воздушных ЛЭП, организации селективного АПВ кабельно-воздушных ЛЭП.

Глава 1 Разработка методов пространственно-временной обработки токов и напряжений для целей защиты и автоматики линий электропередачи

1.1 Формирование системотехнических решений защиты и автоматики в условиях технологического развития электротехнических комплексов линий электропередачи

1.1.1 Особенности развития технических решений защиты и автоматики линий электропередачи

В функционировании РЗА ЛЭП выделяется информационный процесс, связанный с наблюдением объекта, принятием решений и управлением. Отдельные элементы комплекса РЗА ЛЭП представлены на рисунке 1.1. Измерительные преобразователи (ИП) подключают непосредственно к ЛЭП или на смежных с ней подстанциях (ПС). ИП преобразуют наблюдаемые величины в доступный для РЗА вид. Передача информации в РЗА осуществляется по каналам связи в зависимости от вида данных. Так, при использовании электромагнитных измерительных трансформаторов тока и напряжения используются медные проводники с нормированным номинальным значением вторичного тока и напряжения, тогда как от электронных трансформаторов тока и напряжения получают информацию в цифровом формате (например, по протоколу стандарта МЭК 61850-9-2) [1] по оптическим каналам связи. Современные устройства РЗА, представленные интеллектуальными электронными устройствами, или терминалами, принимают и преобразуют полученные данные в форму, необходимую для анализа режима ЛЭП. В зависимости от алгоритма устройства РЗА обмениваются информацией по цифровым каналам связи

(реже – посредством дискретных сигналов) и формируют команды в виде дискретных сигналов [2]. Через различные средства сопряжения, призванные усилить и преобразовать эти сигналы, производится воздействие на элементы первичной схемы электрической сети – коммутационные аппараты (КА), например, высоковольтные выключатели. ОМП и другие диагностические функции устройств РЗА могут предоставлять информацию о режимах ЛЭП на встроенных и удаленных человеко-машинных интерфейсах [3].

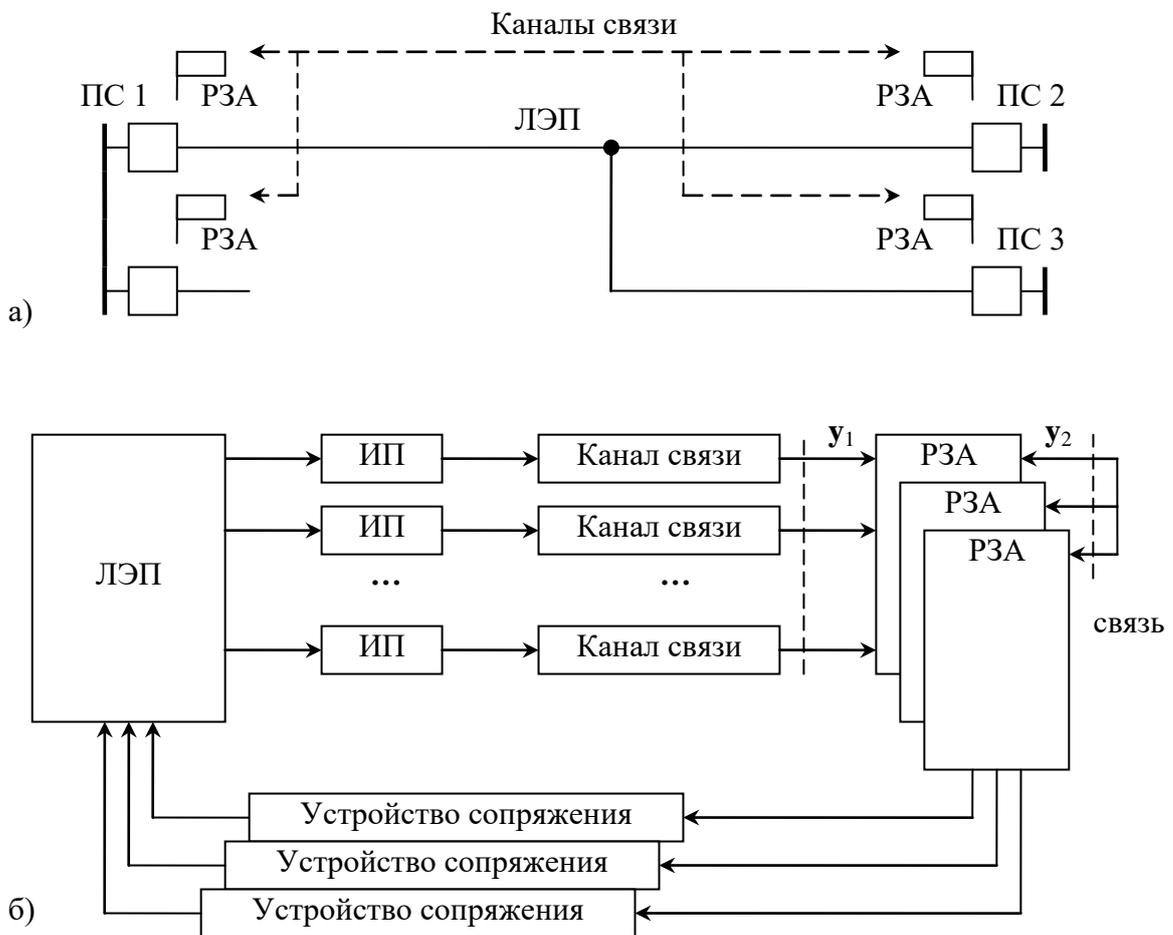


Рисунок 1.1 – Структура ЛЭП (а) и функциональная схема электротехнического комплекса, включающего ЛЭП и устройства защиты и автоматики (б)

Развитие цифровых средств РЗА ЛЭП в большей степени связано с совершенствованием принципов наблюдения объекта и алгоритмов обработки информации [3]. Первые реле, основанные на

электромеханическом принципе, позволяли контролировать диапазон одной электрической величины, с целью выявления аварийных режимов. Но их чувствительность оказывалась недостаточной, а потому схему защиты стали выполнять с логическим объединением реле с одной подведенной величиной, а затем и с совместным преобразованием нескольких измеряемых величин, как например, в индукционных реле сопротивления и направления мощности. Эти реле в большей степени использовали информацию об аварийном процессе, заключенную в основной гармонике токов и напряжений, называемых также параметрами аварийного режима.

Реле на полупроводниковой, а затем и микропроцессорной основе позволили значительно расширить как объем охватываемых алгоритмом измерений токов и напряжений, так и привлечь измерения, выполненные в предаварийном режиме, что придало системам РЗА свойство адаптивности [4].

Дистанционный принцип лежит в основе различных функций РЗА ЛЭП. Большинство алгоритмов используют замер сопротивления (фазного или междуфазного), выполненный на основе основной гармонике токов и напряжений [5]. Это преобразование эффективно в простых схемах на коротких линиях с односторонним питанием, однако методические погрешности этого подхода, исследованные, например, в [6,7], ограничивают область его применения.

Отдельным направлением исследований является повышение устойчивости дистанционных алгоритмов к погрешностям измерений тока [8,9] и к потере цепей напряжения (например, в [10-12]) путем отказа от использования соответствующих величин в алгоритме оценки режима. Восполнение информации производится за счет априорного задания параметров примыкающей к ЛЭП электрической сети в виде уставок или их измерения в предшествующих аварии режимах, в том числе динамических [13]. Алгоритмы находят баланс между устойчивостью к ошибке измерений

и погрешностью оценки аварийного режима. В таких условиях повышение точности оценки может производиться за счет привлечения многостороннего замера электрических величин [14,15], однако это значительно удорожает решение и снижает его автономность. В публикациях также отмечается зависимость алгоритмов от однородности электрических параметров по всей протяженности ЛЭП, что дополнительно ограничивает их применение.

В целом использование двухстороннего замера на ЛЭП снижает неопределенность оценки местоположения КЗ за счет исключения из рассмотрения параметров системы, подключенной к удаленной ПС [13]. Среди таких алгоритмов можно отметить оптимизационные с критерием по равенству электрических параметров, оцениваемых по данным каждой стороны отдельно (например, напряжений) [16-18]. Возможно использование этих данных и для непосредственной оценки неизвестных параметров схемы замещения ЛЭП [19]. Нужно отметить, что за последние двадцать лет цифровая связь в электрических сетях всех уровней напряжения получила большое развитие, а потому двухсторонние алгоритмы получают все большее распространение [20-27]. Отдельно необходимо отметить использование синхронизированных векторных измерений (СВИ), выполняемых в отдельных точках электрической сети. На этой основе выполнены как алгоритмы дистанционной защиты, ОМП, автоматики ликвидации асинхронного режима (АЛАР) и различных видов диагностики [28-31]. Большинство методов опирается на одновременный замер величин токов и напряжений основной гармоники.

В микропроцессорных устройствах стало возможным развитие дистанционных алгоритмов в область усложнения моделей ЛЭП, используемых устройствами. При этом могут использоваться показания фиксирующих приборов или приборов регистрации аварийных событий [32].

К наиболее совершенным можно отнести односторонние алгоритмы ОМП и дистанционной защиты [33-38], построенные на адаптивном

дистанционном принципе. Естественный критерий резистивности повреждения, применяемый в точке предполагаемого повреждения ЛЭП, позволяет повысить чувствительность и точность одностороннего метода. Ключевым свойством является использование детальной модели ЛЭП и всей доступной информации в виде замеров в аварийном и предшествующем режимах [39]. Тем не менее, исследования показывают, что неадекватность встроенной модели может приводить к существенным отклонениям в оценке режимов. Поэтому актуально совершенствование моделей ЛЭП не только в части учета индуктивной связи, ответвлений, неоднородности параметров по длине, но и в части заземления грозозащитных тросов и опор [40].

В результате появились оптимизационные подходы к оценке режимов [41,42], которые получили свое развитие с обобщением критериев и методов оптимизации на основе информационной теории [43-45]. Так, применена оптимизация целевой функции отклонения векторов напряжений модели от измеренных с уточнением места замыкания при наличии ограничений на переходное сопротивление [23,46]. Использование большего объема измерений, как видно, дает более высокие результаты в распознавании. Поэтому оправданным является применение виртуальных реле и иных не прямых методов распознавания [47-60].

Высокими требованиями к РЗА ЛЭП обусловлено появление многомерных методов распознавания режимов [61-65]. Их систематизация и обобщение в отношении распознавания режимов ЛЭП выполнены автором. Наиболее эффективными видятся подходы со снижением размерности задач с использованием информационно емких преобразований [66] и процедур обучения [67,68]. Выделение наиболее емких признаков может производиться на базе обобщенных математических процедур, в том числе решающих функций и функций расстояния [69].

Интеллектуальные алгоритмы на основе нейронных сетей и нечеткой логики также нашли применение в дистанционных алгоритмах РЗА ЛЭП.

Исследования [70-79] показали, что с их применением отпадает необходимость подробного описания структуры объектов, но достигается высокая распознающая способность. Однако алгоритмы обучения этих интеллектуальных модулей должны являться предметом специального исследования, так как обеспечение селективности срабатывания таких устройств является трудновыполнимой задачей.

Важен и другой аспект развития РЗА. В [80] подтверждается, что «эффективными путями повышения чувствительности релейной защиты дальнего резервирования является расширение информационной базы (использование принципа многопараметрических защит) и реализация её измерительных органов на основе адаптации к режиму защищаемой сети и с контролем аварийных составляющих токов и сопротивлений.» Кроме того, «важным является контроль состояния коммутационных аппаратов и устройств смежных устройств РЗА на защищаемой ПС, что позволяет обеспечить снижение выдержек времени резервных защит и в ряде случаев повысить их чувствительность» [80]. Таким образом, предложено развивать использование различных частотных составляющих и привлекать для адаптации дискретную информацию [2, 81].

Как видно, большинство программных и программно-аппаратных комплексов используют частотные модели ЛЭП в симметричных составляющих основной гармоники токов и напряжений, что может приводить к большим методическим погрешностям на протяженных линиях [6,19,82,83]. Применение моделей в фазных координатах и всесторонний учет структурных особенностей линии повышает точность оценки режимов [40,46,84-86]. Однако повышение быстродействия распознавания факта повреждения целесообразно проводить путем сокращения окна фильтрации сигналов [87-89]. При этом осуществляется фильтрация, отличная от Фурье, или упрощенный расчет электропередачи в мгновенных значениях сигналов токов и напряжений [90-92]. Известны решения с изменяемой величиной

окна наблюдения аварийного режима, когда защита демонстрирует малое (до 5 мс) время срабатывания при близких металлических замыканиях и большее запаздывание при удаленных повреждениях через сопротивление [87]. В настоящей работе выполнено обобщение [47,93-96], позволяющее применять его на ЛЭП более сложной структуры с повышенной чувствительностью (например, в сравнении с [87]).

Задача ОМП ЛЭП решается с использованием специализированных терминалов (МИР, МФИ, ФПМ, ИМФ, а затем и ТОР 100-ЛОК, ТОР 300 ЛОК, Бреслер-0107 и других [97-100]), выполняющих как фиксацию режимов, так и расчет расстояния до места повреждения. Дополнительная функция ОМП присутствует также в устройствах защиты ЛЭП, в регистраторах аварийных событий, в программных комплексах [32]. Несмотря на обширный опыт применения средств ОМП актуальным остается повышение точности их работы. Выделяются задачи, связанные с моделированием ЛЭП [46,101], с обработкой входных сигналов токов и напряжений [100]. Отдельно стоят задачи использования статистики показаний устройств ОМП при КЗ на ЛЭП [102,103] во времени и с совместной обработкой их показаний для уточнения координаты. Принимая величину порогового уровня вероятности, определяют интервал возможных местоположений повреждения. В настоящей работе достигнуто существенное обобщение этого интервального подхода, происходящее из равноценного отношения к параметрам моделей и к результатам измерений [104]. Предложены предельные характеристики распознавания места повреждения на ЛЭП.

Многовариантность режимов ЛЭП является следствием большого числа сочетаний параметров прилегающих участков сети, изменения параметров источников электроэнергии, вариативности распределения перетоков мощности, неустойчивости отдельных состояний. Эти факторы ограничивают возможности распознавания аварийных ситуаций [105].

Общие подходы к распознаванию предложены в рамках развиваемых в данной работе методов информационного анализа [105], а также на базе статистических методов теории обнаружения [106]. Подходы имеют близкие характеристики, но именно первый из них предлагает контроль над селективностью и обеспечивает ее в полном объеме, как это требуется в современной практике релейной защиты [107].

В связи с ограничениями распознавания происходит поиск новых видов информации о КЗ и других повреждениях ЛЭП, в частности в высокочастотной области. Возможно прямое использование частотных компонент, как, например, в [108]. Большая протяженность ЛЭП приводит к пространственному распределению электрических величин, которое может быть зарегистрировано на высокой частоте обработки. Соответствующие процессы получили название волновых. Исследование волновых процессов при коммутации привело к появлению устройств, реализующих наблюдение переходных процессов, вызванных повреждением ЛЭП (пассивные волновые) [109,110], и процессов отражения от ЛЭП специально испущенных зондирующих импульсов (активные волновые) [111-114]. Расширенные средства обработки информации позволили выполнить распознавание пассивными методами на основе корреляционной обработки [115], с использованием моделей ЛЭП [116]. Отмечается совместное использование низкочастотных и высокочастотных методов [117]. Основными проблемами пассивных волновых методов остаются низкая точность выявления фронта первой и последующих волн, а также многозначность оценки расстояния координаты повреждения.

В области активных волновых методов ОМП выделяются работы с подачей импульсов различной формы [114,115] и анализом отклонений «портретов» от модельных или ранее измеренных образцов. Отмечается, что ввиду повышенного шума на частотах зондирования необходимо накопление информации во времени. Высокой разрешающей способностью обладают

сложные сигналы с частотной модуляцией [118]. Сохраняется необходимость повышения чувствительности ОМП в связи с малым изменением параметров сети во времени и сложной структурой сети. Кроме того, актуальность и важность защиты и автоматики при однофазном замыкании на землю ЛЭП с изолированной нейтралью подтверждается множеством исследований в этой области, в том числе с разработкой многопараметрических решений (например, [119]).

Представленные в работе подходы к обработке сигналов токов и напряжений предоставляют базу для разработки РЗА ЛЭП с повышением быстродействия, чувствительности и универсальности применения.

1.1.2 Постановка информационных задач и методологическая основа защиты и автоматики линий электропередачи

Анализ показал, что системотехника различных элементов РЗА ЛЭП имеет много общих задач, связанных с обработкой информации. Представляется целесообразным их решение на основе метода информационного анализа, развивающего положения теории уставок [120-122]. Повышение чувствительности и быстродействия РЗА ЛЭП связывается с временной обработкой информации, полученной в распределенной системе измерения. Необходимы методы выявления связи пространственных характеристик объекта наблюдения – ЛЭП – и временных зависимостей токов и напряжений. На первом этапе информационный анализ применяется к объекту защиты и выявляет его физическое свойство – распознаваемость аварийных ситуаций. На последующих этапах метод применяется для синтеза распознающих модулей РЗА на основе пространственно-временной обработки информации и предоставляет возможности для их оценки [123].

Информационная база РЗА ЛЭП представляет собой совокупность замеров электрических величин на интервале наблюдения; она еще включает

априорные сведения о структуре и параметрах имитационных моделей наблюдаемого объекта. В современных системотехнических решениях дополнительная информация РЗА ЛЭП включает также признаки качества информации [124] и оценки режима других устройств и модулей [117]. Автономная интеллектуальная РЗА также может воспользоваться апостериорной информацией об оценке ее предыдущих срабатываниях при испытаниях.

Методы оперируют представлениями о многомерных пространствах: m -мерное объектное C , наблюдаемое B и n -мерное уставочное A . Элементы объектного вектора $\mathbf{x} \in C$, определяющие состояние объекта, подразделяются по информационному признаку на аварийные и нормальные, формируя соответствующие подвекторы \mathbf{x}_a и \mathbf{x}_b , так что $\mathbf{x} = [\mathbf{x}_a, \mathbf{x}_b]^T$.

В рамках аварийного подвектора рассматриваются оцениваемые и неизвестные параметры повреждения. Так, в защитах линий к аварийным параметрам относят координату места КЗ x_f и, часто, вектор переходных сопротивлений \mathbf{R}_f . В задачах, связанных с анализом переходных процессов, в том числе высокочастотных, временные характеристики аварийного режима также следует отнести к составляющим подвектора \mathbf{x}_a . Момент времени, в частности, задает фазу коммутации и в значительной степени определяет интенсивность переходного процесса (вызванного повреждением), на который реагирует защита. Также временные характеристики важны для нестационарных процессов, рассматриваемых в РЗА: при качаниях и асинхронном ходе.

Область определения подвектора \mathbf{x}_b , заключающего в себе оставшиеся параметры, как правило, известна априорно. Так, при информационном анализе ЛЭП на основной частоте к нормальным параметрам относят эквивалентные сопротивления и электродвижущие силы (ЭДС) систем по концам линии и другие величины, дающие полное описание

режима.

Каждому значению объектного вектора \mathbf{x} имитационные модели ставят в соответствие единственную точку в пространстве наблюдения $\mathbf{y} \in B$, трансформируемую модулями релейной защиты в собственное уставочное пространство $\mathbf{z} \in A$ с использованием априорной информации об имитационной модели объекта. Точка замера \mathbf{z} может рассматриваться либо независимо от ситуации на контролируемом объекте, либо как отображение точки \mathbf{x} объектного пространства. Имитационная модель объекта ассоциируется с оператором F прямого преобразования вектора (области) параметров объекта $\mathbf{x} (G)$ в n -мерный вектор (область) замера $\mathbf{z} (S)$:

$$F(\mathbf{x}) = \mathbf{z}; \quad (1.1)$$

$$F(G) = S, \quad (1.2)$$

где $\mathbf{x} \in G \subset C$, $\mathbf{z} \in S \subset A$.

В зависимости от вида информационной задачи и алгоритма ее решения уставочный вектор \mathbf{z} может состоять из мгновенных значений электрических величин, спектральных компонент, частотных или статистических характеристик и иных расчетных значений.

Под распознаваемостью понимается физическое свойство объекта взаимно однозначно преобразовывать объектный и наблюдаемый векторы (или области). Задача исследования распознаваемости ставится через противостояние областей G_α и G_β , относящихся к отслеживаемым (α) и альтернативным (β) режимам, в наблюдаемом пространстве через сближение соответствующих замеров \mathbf{y} . На рисунке 1.2 пространства для наглядности изображены плоскими, а области G_α и G_β представлены прямоугольниками. В пространстве сигналов каждый режим \mathbf{x} отображается в виде вектора \mathbf{y} (преобразование условно показано стрелкой). Соответственно, объектная

область G отображается в виде фигуры S .

Режимы $\mathbf{x}_{\alpha p}$, отображения которых $\mathbf{y}_{\alpha p}$ не попадают в область $S_{\beta}(G_{\beta})$, распознаваемы, то есть отличимы от альтернативных. Режимы $\mathbf{x}_{\alpha n}$, отображения $\mathbf{y}_{\alpha n}$ которых оказываются в области S_{β} , нераспознаваемы. Таким образом, если режиму $\mathbf{x}_{\alpha n}$ может быть противопоставлен какой-либо режим \mathbf{x}_{β} такой, что $\mathbf{y}(\mathbf{x}_{\alpha n}) = \mathbf{y}(\mathbf{x}_{\beta})$, то он называется нераспознаваемым. На практике нераспознаваемость режима \mathbf{x}_{α} определяется оптимизационной процедурой при ограничении окрестности ε на основе функции расстояния $\text{dist}(\mathbf{y}_1, \mathbf{y}_2)$:

$$\min_{\mathbf{x}_{\beta} \in G_{\beta}} \text{dist}(\mathbf{y}(\mathbf{x}_{\alpha}), \mathbf{y}(\mathbf{x}_{\beta})) < \varepsilon. \quad (1.3)$$

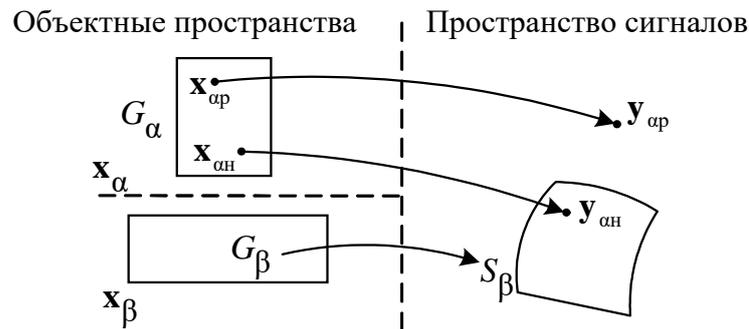


Рисунок 1.2 – Распознаваемые и нераспознаваемые режимы \mathbf{x}_{α}

Множество нераспознаваемых режимов образует область нераспознаваемости $G_{\alpha n} \subset G_{\alpha}$. Остальная часть области α -режимов распознаваема: $G_{\alpha p} = G_{\alpha} \setminus G_{\alpha n}$. Введя понятие об обратном преобразовании из пространства сигналов в объектное α -пространство, получим, что области $G_{\alpha n}$ и $G_{\alpha p}$ представляют собой обратные преобразования областей $S_{\alpha\beta} = S_{\alpha} \cap S_{\beta}$ и $S_{\alpha\alpha} = S_{\alpha} \setminus S_{\alpha\beta}$ (рисунок 1.3).

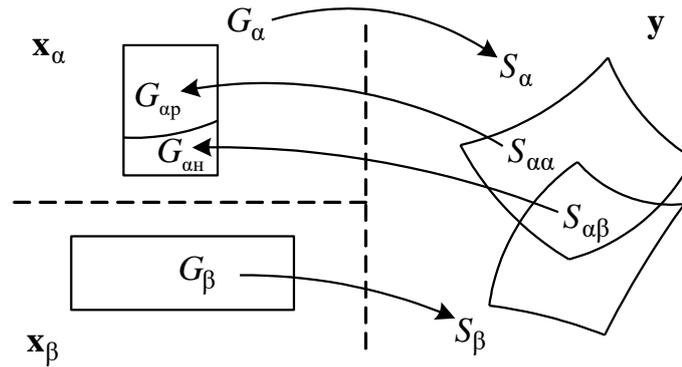


Рисунок 1.3 – Области распознаваемых и нераспознаваемых α -режимов

Уставочное пространство A может рассматриваться как совокупность нескольких подпространств с зависимыми или независимыми координатами, что соответствует тому же числу независимых функций прямого преобразования режима. Разделение пространства целесообразно для задания алгоритмов срабатывания РЗА ЛЭП с меньшей размерностью. Используется условное прямое преобразование, которое для заданного набора областей в нескольких уставочных подпространствах числом $p-1$ (например, $S_i, i = \overline{1, p-1}$,) позволяет получить область отображения в указанное пространство с номером p (например, $S_p^* = F_p^*(G, S_1, \dots, S_{p-1})$), что иллюстрирует рисунок 1.4. Обобщением этой процедуры является адаптивное прямое преобразование, в котором области «стягиваются» в текущие замеры, а область S_p^* определяется аналитически или на основе обучения. Этим обеспечивается высокая гибкость реле с адаптацией в широком смысле [4].

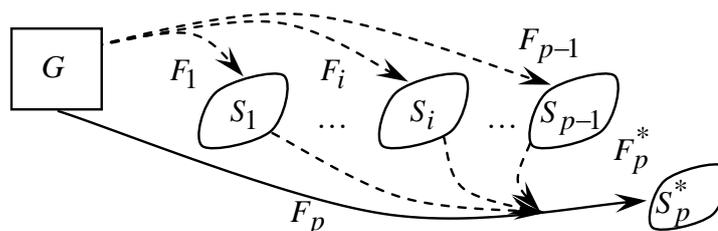


Рисунок 1.4 – Иллюстрация условного прямого преобразования

Чувствительность защит в настоящей работе характеризуется величиной объектной области распознаваемых режимов. Численно и графически она определяется объектной характеристикой [125], полностью замещающей коэффициент чувствительности [126]. Коэффициент чувствительности получил распространение, например, в анализе токовых защит и защит по напряжению в связи с применением односистемных аналоговых реле. Для реле с двумя подведенными величинами требуется определение иерархии распознаваемых режимов, причем в уставочном пространстве. Чаще всего предпочтение отдается отображениям металлических КЗ ЛЭП. Напротив, процедура построения и анализа объектной характеристики носит обобщенный характер и не зависит от принципа распознавания повреждений объекта. Так, в частности, она позволяет оценить качество дистанционной защиты и сравнить его с направленной токовой или дифференциальной защитой [45].

Объектная характеристика модуля РЗА строится в объектном пространстве и показывает область гарантированно распознаваемых режимов объекта в координатах наиболее важных объектных параметров, например, аварийных. В задачах защиты и ОМП ЛЭП, как правило, выбирают координатные оси места короткого замыкания и переходного сопротивления. При этом под объектной характеристикой понимают наименьшее нераспознаваемое значение параметра в зависимости от величин, входящих в нормальный вектор.

Объектная характеристика универсальна тем, что она дает количественную оценку не только распознаванию устройствами РЗА, зависящему от конкретного алгоритма, но и распознаваемости, являющейся внутренним свойством реального объекта.

Применительно к анализу аварийных ситуаций на ЛЭП рассматривается противостояние двух режимов: отслеживаемого α и

альтернативного β . Каждому месту замыкания x_f , вектору нормальных и иных аварийных параметров объекта \mathbf{x}_b и замеру \mathbf{z}_γ ставится в соответствие значение объектной функции $R_f(x_f, \mathbf{x}_b, \mathbf{z}_\gamma)$, наименьшее значение которой на множестве G_b названо объектной характеристикой замера $R_{f \text{ inf}}(x_f, \mathbf{z}_\gamma)$.

Одна из реализаций процедуры определения объектной характеристики

$$R_{f \text{ inf}}(x_f, \mathbf{z}_\gamma) = \arg \min_{R_f} \min_{\mathbf{x}_b \in G_b} \text{dist}(\mathbf{z}_\gamma, F_\alpha([\mathbf{x}_f, R_f, \mathbf{x}_b]^T)), \quad (1.4)$$

где F_α – функция преобразования вектора параметров имитационной модели ситуации α в точку замера \mathbf{z} уставочного пространства.

Удаленность точки \mathbf{z}_γ от альтернативной ситуации G_β также определяется минимизационной процедурой

$$\Delta_{\min}(\mathbf{z}_\gamma) = \min_{\mathbf{x}_\beta \in G_\beta} \text{dist}(\mathbf{z}_\gamma, F_\beta(\mathbf{x}_\beta)). \quad (1.5)$$

Представления об информационной ценности точки (1.4) распространяются и на произвольную область ΔS уставочного пространства. Ей отвечает сегмент объектных характеристик, верхняя и нижняя границы которого определяются следующими процедурами:

$$R_{f, \text{inf}, \text{inf}}(x_f, \Delta S) = \inf_{\mathbf{x}_b \in G_b} \inf_{\mathbf{z} \in \Delta S} R_f(x_f, \mathbf{x}_b, \mathbf{z}) \geq 0; \quad (1.6)$$

$$R_{f, \text{inf}, \text{sup}}(x_f, \Delta S) = \inf_{\mathbf{x}_b \in G_b} \sup_{\mathbf{z} \in \Delta S} R_f(x_f, \mathbf{x}_b, \mathbf{z}) \geq 0, \quad (1.7)$$

а удалённость от альтернативных ситуаций G_β

$$\Delta_{\min}(\Delta S) = \min_{\mathbf{x}_\beta \in G_\beta, \mathbf{z} \in \Delta S} \text{dist}(\mathbf{z}, F_\beta(\mathbf{x}_\beta)). \quad (1.8)$$

Пусть задана уставочная область $S_{\text{уст}}$ устройства РЗА. Тогда, условие

срабатывания защиты используется для выявления верхней и нижней объектных функций:

$$F_{\alpha} \left([x_f, R_f, \mathbf{x}_b]^T \right) \in S_{\text{уст}} \Rightarrow \begin{matrix} R_{f,\text{sup}}(x_f, \mathbf{x}_b) \\ R_{f,\text{inf}}(x_f, \mathbf{x}_b) \end{matrix} \quad (1.9)$$

В объектную характеристику защиты включаются только те координаты x_f , где гарантируется срабатывание при металлических замыканиях:

$$\begin{cases} R_{f,\text{sup,inf}}(x_f) = \min R_f(x_f, \mathbf{x}_b); \\ R_{f,\text{inf}}(x_f, \mathbf{x}_b) \equiv 0. \end{cases} \quad (1.10)$$

Ранее автором выделены модули, составляющие основу РЗА ЛЭП [127-129]:

- реле, срабатывающее в заданном диапазоне режимов, отличных от нормального;
- локатор, предоставляющий оценку места повреждения;
- фильтр, выделяющий полезный сигнал;
- селектор, выбирающий одну ситуацию из группы;
- сегментатор, выделяющий временные интервалы однородности режимов.

Для их создания решаются следующие общие информационные задачи, подробно рассматриваемые ниже.

1. Диагностическая задача. При ее решении оценивают интервал определения одного или нескольких объектных параметров: координаты в задаче ОМП или компонентов сигналов в фильтрации информационных составляющих. Например, контролируется значение $x_{1\text{уст}}$ заданного аварийного параметра x_1 , которое формирует линию или поверхность, составляющую область $G_{\alpha}: x_1 = x_{\text{уст}}$ из общей однородной области $G \subset C$, и области $G_{\beta 1}$ и $G_{\beta 2}$ при иных значениях x_1 . Требуется определить

расширение поверхности G_α в обе стороны вдоль оси x_1 , т.е. подобласти нераспознаваемости $\beta 1$ - и $\beta 2$ -режимов $G_{\beta 1\alpha}$ и $G_{\beta 2\alpha}$, их объединение \hat{G}_α , охватывающее все режимы, неотличимые от одного, по меньшей мере, отслеживаемого режима, а также оценки крайних значений $\Delta x_{1\text{inf}}$, $\Delta x_{1\text{sup}}$ интервала неопределенности значения $x_{1\text{уст}}$ (рисунок 1.5). Режимы \mathbf{x}_β , образующие область \hat{G}_α , отвечают условию

$$\min_{\mathbf{x}_b \in G_b, \mathbf{x}_\beta \in G_\beta} \text{dist}(F(\mathbf{x}_\beta), F([x_{1\text{уст}}, \mathbf{x}_b]^T)) < \varepsilon, \quad (1.11)$$

где G_b – область определения подвектора \mathbf{x}_b размерности $(n-1)$, составленного из всех элементов вектора \mathbf{x} , кроме x_1 .

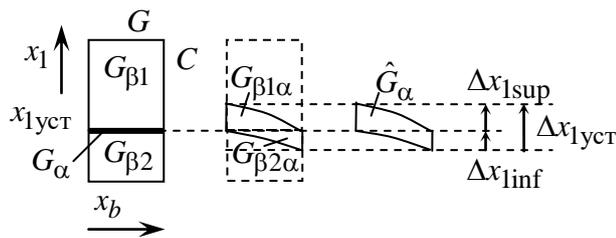


Рисунок 1.5 – Иллюстрация преобразований диагностической задачи

При решении диагностической задачи часто производится экстраполяция процесса. Она может рассматриваться в двух измерениях. Экстраполяция во времени выполняется на базе n -мерного замера в виде выборки из отсчетов сигнала, например, $\mathbf{y} = [i_{k-n}, i_{k-n+1}, \dots, i_{k-1}]^T$ (рисунок 1.6). Для решения задачи используется имитационная модель объекта с объектной областью G . Экстраполяция в пространстве выполняется аналогичными преобразованиями вектора наблюдения \mathbf{y} , наполненного измерениями в разных точках объекта. В этом случае имитационная модель связывает входные и выходные величины на одном интервале времени.

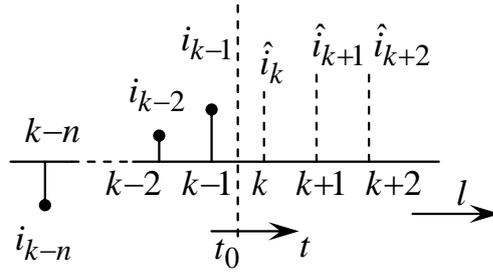


Рисунок 1.6 – Экстраполяция процесса, наблюдаемого во времени до момента $l = k - 1$, и координаты его экстраполяции \hat{i}_l , $l \geq k$

На основе интервальной экстраполяции может выполняться интервальный фильтр аварийной составляющей на время после момента смены процессов t_0 , например,

$$i_{ав}(t) = i(t) - \hat{i}(t), \quad t \geq t_0 \quad (1.12)$$

с последующим его использованием для распознавания режимов работы объекта или сегментации процессов во времени или верификации измерений.

2. Ситуационная задача. Задача связана с выбором одного из возможных разнотипных режимов, имеющих структурные отличия, и охватывает, например, фазовые селекторы, пусковые органы. Имитационные модели F_α и F_β режимов α и β различны, и потому области $G_\alpha \subset C_\alpha$ и $G_\beta \subset C_\beta$ определения их параметров в общем случае заданы в разных пространствах. Если режимы однородны, возникает частный случай ситуационной задачи – граничный, характерный, например, для дистанционной защиты ЛЭП. Увеличение количества альтернативных друг другу ситуаций не сопровождается усложнением математического аппарата задачи: при помощи оптимизационной процедуры

$$\min_{\mathbf{x}_\alpha \in G_\alpha, \mathbf{x}_\beta \in G_\beta} \text{dist}(F_\alpha(\mathbf{x}_\alpha), F_\beta(\mathbf{x}_\beta)) < \varepsilon \quad (1.13)$$

получают собственные области

$$\mathbf{x}_\alpha \in G_{\alpha\alpha} : \text{dist}(F_\alpha(\mathbf{x}_\alpha), F_\beta(\mathbf{x}_\beta)) > \varepsilon; \quad (1.14)$$

$$\mathbf{x}_\beta \in G_{\beta\beta} : \text{dist}(F_\alpha(\mathbf{x}_\alpha), F_\beta(\mathbf{x}_\beta)) > \varepsilon. \quad (1.15)$$

Минимизация (1.13) и условия (1.14), (1.15) могут быть выражены в форме операций над областями:

$$G_{\alpha\alpha} = G_\alpha \setminus G_{\alpha\beta}; \quad (1.16)$$

$$G_{\alpha\beta} = \Phi_\alpha^{-1}(F_\beta(G_\beta)) \cap G_\alpha. \quad (1.17)$$

3. Уставочная задача. Для решения перечисленных задач распознавания необходим аппарат манипуляций в уставочном пространстве. Попытки использования методов вычислительной геометрии не дали практически ощутимых результатов [130]. Ставится задача построения уставочных областей в подпространствах такой размерности, которая соответствует вычислительным возможностям устройства РЗА. При этом должно обеспечиваться максимальное приближение к распознаваемости режимов [131,132]. Целью построения $S_{уст}$ является наиболее полный охват области

$$S_{\alpha\alpha} = F_\alpha(G_\alpha) \setminus F_\beta(G_\beta) \quad (1.18)$$

с контролем по условиям:

$$\Delta_{\min}(S_{уст}) > \varepsilon. \quad (1.19)$$

4. Имитационная задача. Задача состоит в синтезе эквивалентных моделей, призванных сократить размерность задачи распознавания. На замену сложной имитационной модели с исчерпывающими параметрами пространства S синтезируется эквивалентная ей модель $F_{эКВ}$ с параметрами $S_{эКВ}$ (рисунок 1.7). Неварьируемые параметры эквивалентной модели определяются по критерию минимума невязки

$$\Delta x_{1\max} = \max(|x_1 - x_{1\text{ЭКВ},\min}|, |x_{1\text{ЭКВ},\max} - x_1|);$$

$$x_{1\text{ЭКВ}} = \text{Pr}_1 H_{\text{ЭКВ}}; H_{\text{ЭКВ}} = F^{-1}(\Delta G_{\text{ЭКВ}}, \mathbf{z}); \mathbf{z} = F(\mathbf{x} \in \Delta G); \mathbf{x}_{\text{ЭКВ}} \in \Delta G_{\text{ЭКВ}}.$$

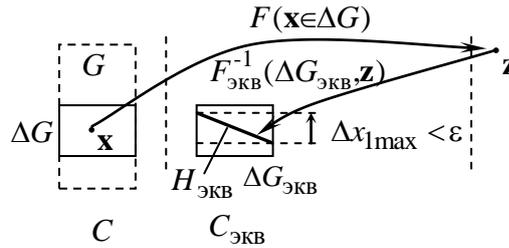


Рисунок 1.7 – Иллюстрация преобразований имитационной задачи

Размеры допускающих эквивалентирование подобластей ΔG и $\Delta G_{\text{ЭКВ}}$ с равными проекциями на ось x_1 устанавливаются условием $\Delta x_{1\text{max}} < \varepsilon$.

Метод информационного анализа предоставляет инструментарий для решения задач распознавания режимов ЛЭП [120,133-136]:

- постановка задачи РЗА с определением объектных параметров и области их вариации, выявлением противопоставляемых режимов и их основного противоречия;
- определение области распознаваемости аварийной ситуации по отношению к альтернативным режимам;
- построение уставочной характеристики с предварительным выбором координатных осей;
- исследование отстройки уставочной области от альтернативных ситуаций;
- определение чувствительности релейной защиты к отслеживаемым коротким замыканиям или, что то же, качества распознавания ситуации α как способности отличить ее от альтернативных ситуаций.

Информационный анализ, ранее продемонстрированный по отношению к объекту, применим и к модулям РЗА. Его проводят с использованием процедур, аналогичных (1.13), (1.19), с заменой области отслеживаемых режимов уставочной областью $S_{\text{уст}}$.

В [137-145] определена распознаваемость некоторых видов аварийных

ситуаций на ЛЭП, предложены способы синтеза уставочных характеристик, сформулированы «принципы информационного совершенства:

- а) максимально использовать всю доступную информацию об аварии;
- б) в имеющемся уставочном пространстве охватывать максимально возможную область отслеживаемых режимов».

При этом сохраняются базовые требования к модулям РЗА: селективность и приемлемое быстродействие.

В настоящей работе развиваются положения информационного анализа [146-148] и предлагается синтез модулей РЗА ЛЭП на основе методов пространственно-временной обработки сигналов, дополняющий известные решения из [60,144], Рассматриваемые решения учитывают ограничения современных вычислительных платформ, используемых для РЗА ЛЭП.

1.2 Принципы аналитического исследования распознаваемости установившихся аварийных режимов линий электропередачи

Исследуется распознаваемость повреждений ЛЭП в задаче дистанционной защиты. Имитационная модель ЛЭП в режиме КЗ принимается линейной. Включение переходного сопротивления R_f показано на рисунке 1.8. Как отмечалось, большинство существующих алгоритмов ОМП и дистанционной защиты ЛЭП оперируют комплексными величинами, относящимися к установившимся режимам работы объекта: а) нормальный (предаварийный), б) аварийный – КЗ. Замеры напряжения \underline{U} и тока \underline{I} текущего аварийного режима описываются уравнениями годографов

$$\underline{U} = \underline{U}_{\text{пд}} + \frac{\underline{U}_{\text{кз}} - \underline{U}_{\text{пд}}}{1 + \frac{R_f}{Z_{\text{вн}}}}; \quad (1.20)$$

$$\underline{I} = \underline{I}_{\text{ПД}} + \frac{\underline{I}_{\text{КЗ}} - \underline{I}_{\text{ПД}}}{1 + \frac{R_f}{\underline{Z}_{\text{ВН}}}} \quad (1.21)$$

на основе величин при металлическом КЗ ($R_f = 0$) (индекс «кз») и предшествующего (нагрузочного) (индекс «пд») режима. Здесь $\underline{Z}_{\text{ВН}}$ – внутреннее сопротивление электрической системы как эквивалентного генератора относительно места КЗ.

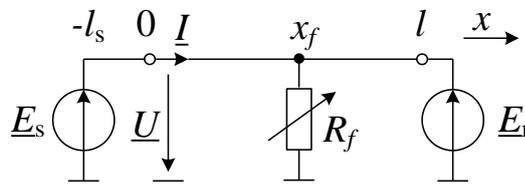


Рисунок 1.8 – Имитационная модель ЛЭП в режиме КЗ

Комплексные величины (1.20) и (1.21) являются функциями параметров имитационной модели, т.е. объектных параметров – элементов вектора $\mathbf{x} = [x_f, R_f, \mathbf{x}_b]^T$. Снова примем аварийные параметры x_f, R_f . К числу нормальных параметров подвектора \mathbf{x}_b отнесем угол передачи, а также соотношение модулей ЭДС источников $k = E_s / E_r$ и варьируемые пассивные параметры имитационной модели. На рисунке 1.9 показан только наиболее значимый нормальный параметр – угол передачи δ .

Из (1.20) и (1.21) следует выражение замера комплексного сопротивления $\underline{Z} = \underline{U} / \underline{I}$ [130]:

$$\underline{Z} = \underline{Z}_{\text{ПД}} + \frac{\underline{Z}_{\text{КЗ}} - \underline{Z}_{\text{ПД}}}{1 + \frac{\underline{Z}_{\text{КЗ}} - \underline{Z}_{\text{ав}}}{\underline{Z}_{\text{ПД}} - \underline{Z}_{\text{ав}}} \cdot \frac{R_f}{\underline{Z}_{\text{ВН}}}}; \quad (1.22)$$

$$\underline{Z}_{\text{КЗ}} = \frac{U_{\text{КЗ}}}{I_{\text{КЗ}}}; \quad \underline{Z}_{\text{ав}} = \frac{U_{\text{ав}}}{I_{\text{ав}}} = \frac{U_{\text{ав, КЗ}}}{I_{\text{ав, КЗ}}};$$

$$\underline{U}_{ав} = \underline{U} - \underline{U}_{пд}; \quad \underline{I}_{ав} = \underline{I} - \underline{I}_{пд};$$

$$\underline{U}_{ав, кз} = \underline{U}_{кз} - \underline{U}_{пд}; \quad \underline{I}_{ав, кз} = \underline{I}_{кз} - \underline{I}_{пд}.$$

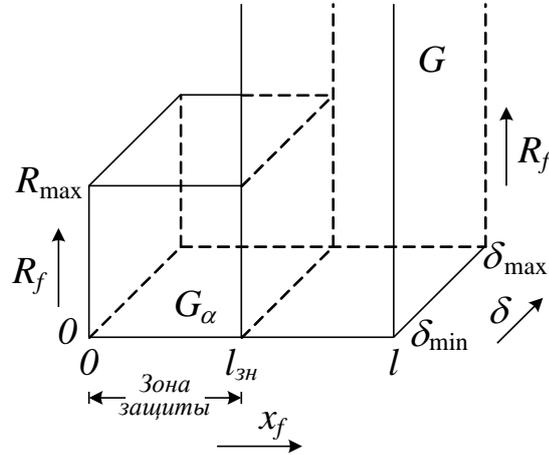


Рисунок 1.9 – Объектные области режимов замыканий в зоне защиты (α) и замыканий вне зоны (β)

Выражения (1.20)–(1.22) дают примеры прямых преобразований, из которых следует соотношение:

$$R_f = \frac{(\underline{Z} - \underline{Z}_{кз}) \cdot (\underline{Z}_{пд} - \underline{Z}_{ав})}{(\underline{Z}_{пд} - \underline{Z}) \cdot (\underline{Z}_{кз} - \underline{Z}_{ав})} \cdot \underline{Z}_{вн}. \quad (1.23)$$

Особое значение имеет функция всех объектных параметров, кроме R_f , определяемая для удобства с использованием операции комплексного сопряжения вместо деления:

$$\underline{N}(x_f, \mathbf{x}_b) = (\underline{Z} - \underline{Z}_{кз})^* \cdot (\underline{Z}_{пд} - \underline{Z})^* \cdot (\underline{Z}_{пд} - \underline{Z}_{ав}) \cdot (\underline{Z}_{кз} - \underline{Z}_{ав})^* \cdot \underline{Z}_{вн}. \quad (1.24)$$

Из (1.23) следует уравнение:

$$\text{Im } \underline{N}(x_f, \mathbf{x}_b) = 0 \quad (1.25)$$

с условием

$$\text{Re } \underline{N}(x_f, \mathbf{x}_b) > 0, \quad (1.26)$$

что позволяет определить R_f через \mathbf{x}_b в виде зависимости $R_f(x_f, \mathbf{x}_b)$, что и

будет являться объектной областью замера \underline{Z} . Таким образом, соотношения (1.23)–(1.26), взятые в совокупности, определяют обратные преобразования F_α^{-1} , F_β^{-1} комплексного сопротивления \underline{Z} .

В случае однородной модели ЛЭП условие абсолютной нераспознаваемости режима α как невозможности отличить его от режима β выражается в виде равенства токов и напряжений одностипных α - и β -режимов: предшествующих и чисто аварийных [150]:

$$\underline{V}_{\text{пд}\alpha} = \underline{V}_{\text{пд}\beta}; \quad \underline{V}_{\text{ав}\alpha} = \underline{V}_{\text{ав}\beta}, \quad (1.27)$$

где \underline{V} – векторы фазных токов и напряжений на наблюдаемом конце ЛЭП.

Для однофазного КЗ в однородной модели может быть получено описание объектной характеристики [150]:

$$R_f(x_f) = \frac{|2\underline{Z}_1^0 + \underline{Z}_0^0|(l_s + x_f)(l - x_f)}{3(l + l_s)\sin(\pi + \varphi_1^0 + \psi_{\text{пд}})} \times \left[\frac{E_s \sin \varphi_{\text{вн}}}{Z_1^0(l_s + x_f)I_{\text{пд}}} - \sin(\varphi_{\text{вн}} - \psi_{\text{пд}} - \varphi_1^0) \right]. \quad (1.28)$$

Зависимость (1.28) близка к линейной. Для идеализированной линии без потерь ($\varphi_{\text{вн}} = \pi/2$, $\varphi_1^0 = \pi/2$, $Z_1^0 = X_1^0$, $Z_0^0 = X_0^0$) получена оценка объектной характеристики (1.28):

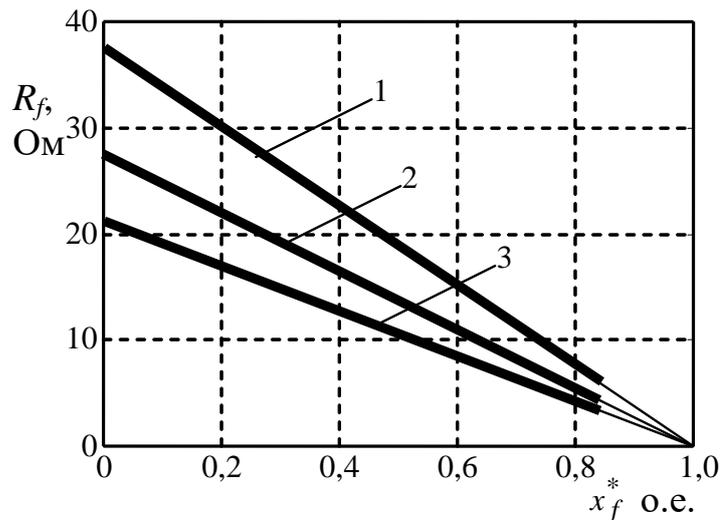
$$R_f(x_f^*) \approx \frac{1}{-3G_{s,\text{пд}}} \left(2 + \frac{X_0^0}{X_1^0} \right) \frac{1 - x_f^*}{1 + l_s^*}, \quad (1.29)$$

где $G_{s,\text{пд}} = \text{Re}(\underline{I}_{\text{пд}} / \underline{E}_s)$; $x_f^* = x_f / l$ – относительная координата места замыкания;

$l_s^* = l_s / l$ – относительная длина линии «за спиной».

Для однородной модели по рисунку 1.8 получено аналитическое решение. В качестве примера на рисунке 1.10 приведены характеристики распознаваемости для линии со следующими параметрами:

- удельное сопротивление ЛЭП по прямой и нулевой последовательностям – $\underline{Z}_1^0 = 0,1 + 0,4j$ Ом/км, $\underline{Z}_0^0 = 0,25 + 1,2j$ Ом/км;
- длина защищаемой ЛЭП – $l = 16$ км ;
- длина линии «за спиной» – $l_{s,\text{sup}} = 31$ км ;
- диапазон изменения ЭДС обеих систем – $E \in (0,95; 1,05) \times 63$ кВ ;
- максимальный уровень предшествующего тока варьируется – $I_{\text{пд},\text{sup}} = 0,5$ кА , $0,73$ кА и $0,88$ кА.



кривые 1, 2, 3 – для предельных токов нагрузки 0,5 кА, 0,73 кА, 0,88 кА
Рисунок 1.10 – Объектные характеристики распознаваемости зоны и места повреждения однородной линии электропередачи

Характеристика распознаваемости указывает для каждой координаты наибольшее сопротивление R_f , до которого распознать это замыкание в данном месте возможно теоретически. С другой стороны, для зоны от 0 до l_z эти характеристики указывают возможность отличить замыкания в зоне ($x_f < l_z$) от замыканий вне зоны ($x_f > l_z$). Соответствующая часть

характеристики показана на рисунке 1.10 утолщенной линией. Характеристики показывают общую тенденцию к снижению возможностей одностороннего распознавания при удалении места КЗ от места наблюдения. Видна и зависимость распознаваемости от нормальных параметров модели: увеличение длины линии (или эквивалентного сопротивления) «за спиной» l_s и увеличение нагрузки линии при передаче активной мощности в обратном направлении, выражаемое в повышении уровня тока предшествующего режима, снижают величину объектной области распознавания.

1.3 Формирование распознающих модулей защиты на основе многомерных структур и разработка подходов к их обучению

1.3.1 Использование оптимизационных методов в защите и автоматике линий электропередачи

В части синтеза распознающих систем в информационном анализе выделены три аспекта интеллектуализации РЗА:

- расширение информационной базы РЗА;
- повышение эффективности использования информации;
- способность РЗА оптимально работать с информационной базой любого доступного ей объема.

Расширение информационной базы РЗА в работе связывается с повышением размерности пространства замеров y (с учетом локальных y_1 и удаленных y_2 (рисунок 1.1)) за счет сбора информации от большего числа измерительных преобразователей, повышения надежности и скорости передачи информации, повышения точности измерений, синхронизации времени замеров. При этом особое внимание уделяется совместной

обработке измерений, выполненных во всех трех фазах систем переменного тока, а также измерениям на разных подстанциях, ограничивающих ЛЭП. Накопление измерений во времени позволяет повысить степень определенности задачи ($n > m$), а в отдельных случаях – соотнести их с различными режимами работы объекта, например, предшествующим нормальным и последующим аварийным.

Повышение эффективности использования информации в работе связано с развитием теории уставок, алгоритмических моделей и обучением. Целью обучения является задание характеристик срабатывания модуля РЗА.

Рассмотрим распознающий модуль РЗА, оперирующий m' -мерным режимом в собственном объектном пространстве C' , каждому режиму которого путем преобразования, обозначаемого Φ ($F_{\text{ЭКВ}}$), сопоставляют замеры \mathbf{z} : $\Phi(\mathbf{x}') = \mathbf{z}$, $\mathbf{x}' \in G' \subset C'$, $\mathbf{z} \in A$. Наиболее общее решение задачи распознавания выполняется путем обратного преобразования Φ^{-1} заданного замера \mathbf{z} в пространство C' . Объектная область замера $\Delta G' = \Phi^{-1}(\mathbf{z})$ может быть найдена аналитически или как множество точек, определяемых оптимизационной процедурой:

$$\Phi^{-1}(\mathbf{z}) = \hat{\mathbf{x}} = \arg(\min_{\mathbf{x}' \in G'_\alpha} \text{dist}(\mathbf{z}, \Phi(\mathbf{x}')) < \varepsilon), \quad (1.30)$$

где ε – малая величина.

Если модель линейная, то, как будет показано ниже, эффективным методом решения переопределенных задач является метод наименьших квадратов.

Обратное преобразование (1.30) – идентификатор [61], который в частном случае может быть локатором или фильтром. Такой модуль имеет возможность проверить однозначность решения и его неопределенность, что достигается вариациями начального приближения при минимизации.

Универсальный распознающий модуль реализует еще один блок – блокиратор – пусковой орган, проверяющий степень отстройки от β -режимов,

$$\min_{\mathbf{x}'_{\beta} \in G'_{\beta}} \text{dist}(\Phi_{\beta}(\mathbf{x}'_{\beta}), \mathbf{z}) > d_{\beta}, \quad (1.31)$$

где d_{β} – положительная величина отстройки.

Таким образом, универсальный модуль представляет собой идентификатор (1.30) и пусковой орган (1.31), объединенные логической операцией «И» (рисунок 1.11). Чем больше величина d_{β} , тем выше селективность реле, но ниже его чувствительность. При $d_{\beta} \rightarrow \varepsilon_{\alpha}$ условие (1.31) проверяет распознаваемость α -режима. Универсальный распознающий модуль, построенный в соответствии с принципами (1.30) и (1.31), способен решить любую информационную задачу релейной защиты независимо от типа противостояния режимов. Ранее автором продемонстрировано его применение для целей ОМП [151].

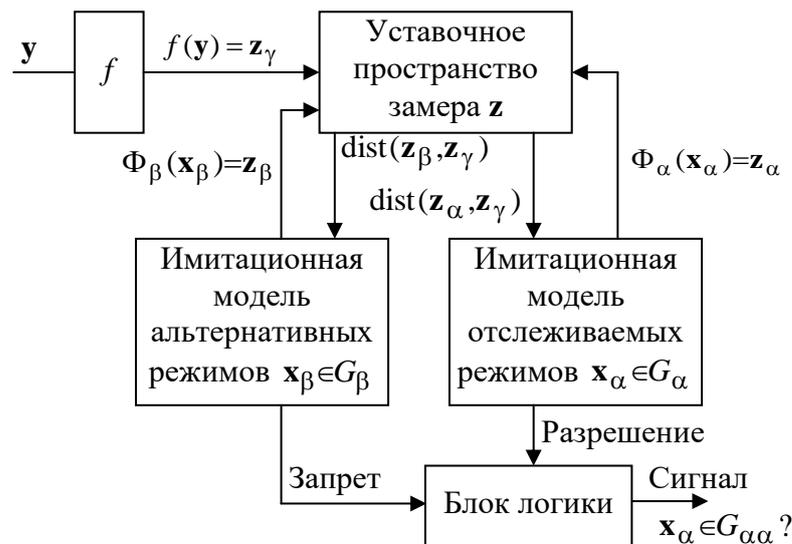


Рисунок 1.11 – Структура универсального распознающего модуля

1.3.2 Разработка подходов к расчету уставок защиты и автоматики линий электропередачи на основе процедур обучения

Существующие методики расчета уставок РЗА в недостаточной степени учитывают всю специфику интеллектуальных терминалов, поэтому на практике высокие качества защиты остаются недоиспользованными. Традиционный подход в задании параметров с опорой на упрощенное или устаревшее понимание измерительных органов может иметь следствием неселективное срабатывание, изначально недопустимое. Развиваются программные комплексы автоматизации расчета уставок с воспроизведением режимов, возможных в сложных режимах электрической сети. Задание граничных режимов, характерных для РЗА предыдущих поколений [152], в целом показывает высокую эффективность, но требует пересмотра для многомерных защит.

Разработана общая методология расчета уставок, способствующая повышению эксплуатационных характеристик микропроцессорных защит [62]. Предлагаемая методология не только служит для создания инженерных методик расчета уставок с учетом особенностей алгоритмической и аппаратной реализации устройств защиты, но и позволяет анализировать существующие методики. Предварительно разграничивают отслеживаемые (α) и альтернативные (β) режимы, задание их объектных областей и имитационных моделей. Затем методология включает следующие этапы.

Этап 1. Определяют границы отображений α - и β -режимов в уставочном пространстве и выявляют собственную область α -режимов. Для этого осуществляется переход от объектного пространства к уставочному: $S_\alpha = F_\alpha(G_\alpha)$, $S_\beta = F_\beta(G_\beta)$. Расчет наблюдаемых величин как результат моделирования является промежуточным этапом этой процедуры.

Затем определяют границы уставочных областей S_α и S_β . Граница

отвечает условиям, подчиняющим себе производные координат замера по объектным параметрам (теорема о коллинеарности векторных производных граничного замера) [153], записываемой для комплексного уставочного вектора \underline{Z} или вектора \mathbf{z} :

$$\operatorname{Im} \left[\frac{\partial \underline{Z}(\mathbf{x})}{\partial x_j} / \frac{\partial \underline{Z}(\mathbf{x})}{\partial x_k} \right] = 0;$$

$$\frac{\frac{\partial z_2(\mathbf{x})}{\partial x_j}}{\frac{\partial z_1(\mathbf{x})}{\partial x_j}} = \frac{\frac{\partial z_2(\mathbf{x})}{\partial x_k}}{\frac{\partial z_1(\mathbf{x})}{\partial x_k}}; \quad j = \overline{1, m}; \quad k = \overline{1, m}; \quad k \neq j, \quad (1.32)$$

где z_1 и z_2 – компоненты вектора \mathbf{z} .

Выражение (1.32) позволяет получить границу аналитическим путем [154]. Однако для реальных объектов такой способ может оказаться затруднительным, поэтому на практике используются инженерные и математические методы с привлечением вычислительной техники: метод триангуляции, проход Джарвиса, алгоритм Грэхема и др. На основе найденных граничных точек с использованием методов триангуляции можно описать искомую область уставочного пространства без охвата альтернативных режимов: $S_{\alpha\alpha} = S_{\alpha} \setminus S_{\beta}$. При этом обеспечивается непрерывность области распознавания.

Этап 2. Задают вектор уставок \mathbf{M} , содержащий все параметры искомой характеристики срабатывания защиты. Характеристика строится в уставочном пространстве таким образом, чтобы она максимально охватывала собственную область α -режимов $S_{\alpha\alpha}$ и при этом не пересекалась с областью β -режимов. Процесс нахождения вектора уставок можно записать в виде процедуры оптимизации

$$\mathbf{M}_{\text{опт}} = \arg \max_{\mathbf{M}} V(\mathbf{M}), \quad (1.33)$$

где $V(\mathbf{M}) = V_S(S(\mathbf{M}) \cap S_{\alpha\alpha})$ – размер (объем) пересечения уставочной области $S(\mathbf{M})$, соответствующей вектору \mathbf{M} , с собственной областью $S_{\alpha\alpha}$ или, как вариант, $V(\mathbf{M}) = V_G(\mathbf{M})$ – размер (объем) объектной области, все режимы которой охвачены уставочной характеристикой $S(\mathbf{M})$.

Оптимизация ведется по заранее выбранному критерию исходя из назначения рассматриваемой защиты и предъявляемых к ней требований.

Распознающую способность обученного реле оценивают степенью охвата области отслеживаемых режимов G_α , а граничную поверхность (в частном случае – линию) описывают в объектном пространстве в поле аварийных параметров \mathbf{x}_a , составляющих объектный вектор $\mathbf{x} = [\mathbf{x}_a, \mathbf{x}_b]^T$ наряду с нормальными объектными параметрами \mathbf{x}_b : $f(\mathbf{x}_a) = 0$.

Этап 3. Проверка чувствительности средствами информационного анализа заключается в переходе от выбранной и заданной в устройстве уставочной области к объектной характеристике защиты в координатах аварийных параметров, например, места повреждения x_f и переходного сопротивления R_f . Применение объектных характеристик позволяет оценить зону действия защиты при выбранных уставках и ее чувствительность к повреждениям через переходные сопротивления. Сравнение полученных объектных характеристик с объектной характеристикой распознаваемости дает оценку полноты использования информации рассматриваемым алгоритмом защиты.

Этот метод отличается от статистических подходов, представленных, например, в [155], большей вычислительной сложностью, поскольку оптимизация производится на основе дискретных функций. Однако метод обеспечивает несрабатывание защиты во всей объектной области

альтернативных режимов.

В [62] приведены результаты применения методики для расчета уставок дистанционной защиты ЛЭП напряжением 110 кВ. Рисунки 1.12–1.14 иллюстрируют этапы описанной процедуры в многомерном объектном пространстве угла передачи δ , координаты места повреждения x_f , переходного сопротивления R_f и на уставочной плоскости текущего (аварийного) сопротивления $\underline{Z}_{\text{TK}} = R_{\text{TK}} + jX_{\text{TK}}$. Результирующий вектор уставок \mathbf{M} круговой характеристики реле сопротивления во многом зависит от выбранного критерия поиска характеристики срабатывания. Так, например, характеристика 1 на рисунке 1.14а соответствует условию совпадения линии максимальной чувствительности с линией металлических КЗ, что отвечает требованиям традиционных методик расчета уставок. Для характеристики 2 на рисунке 1.14а основным условием стал максимальный охват линии металлических КЗ.

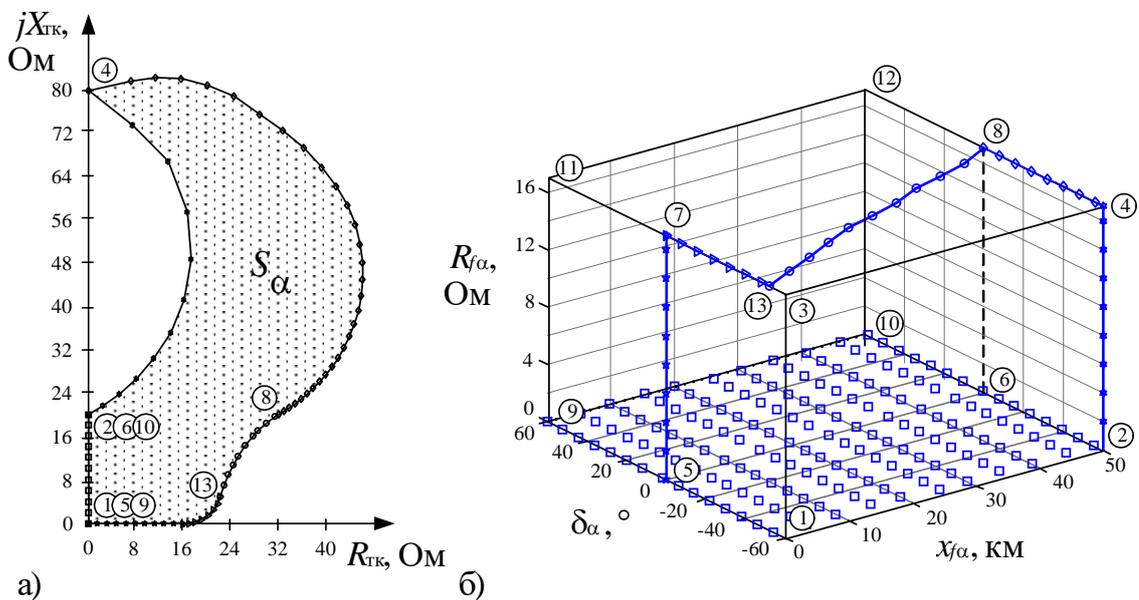


Рисунок 1.12 – Отображение α -режимов S_α в уставочном пространстве (а) и граничные режимы в объектном пространстве (б)

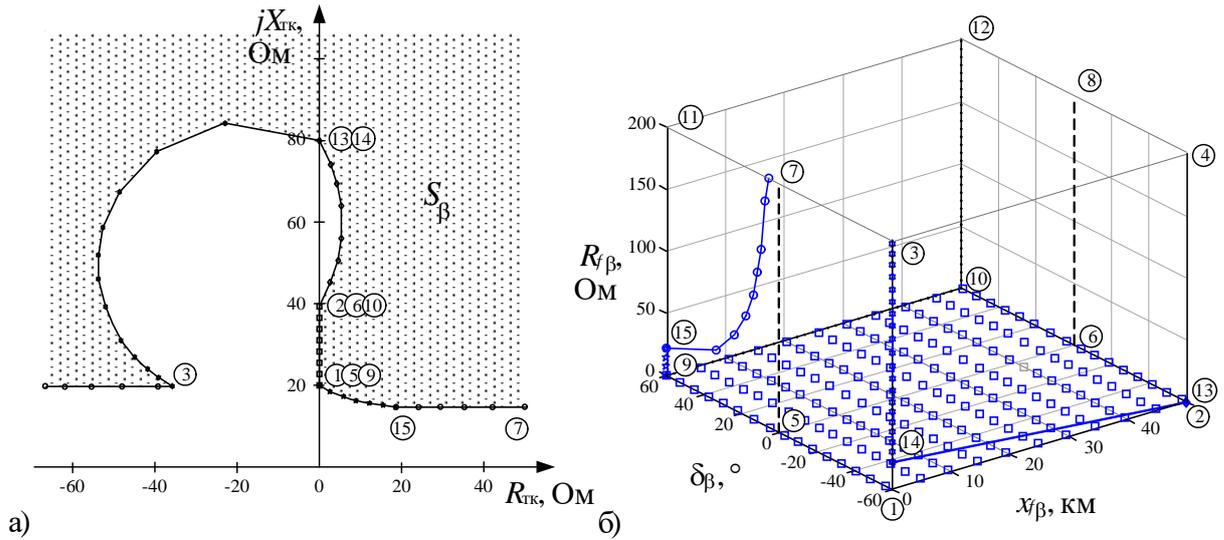


Рисунок 1.13 – Отображение β -режимов S_β в уставочном пространстве (а) и граничные режимы в объектном пространстве (б)

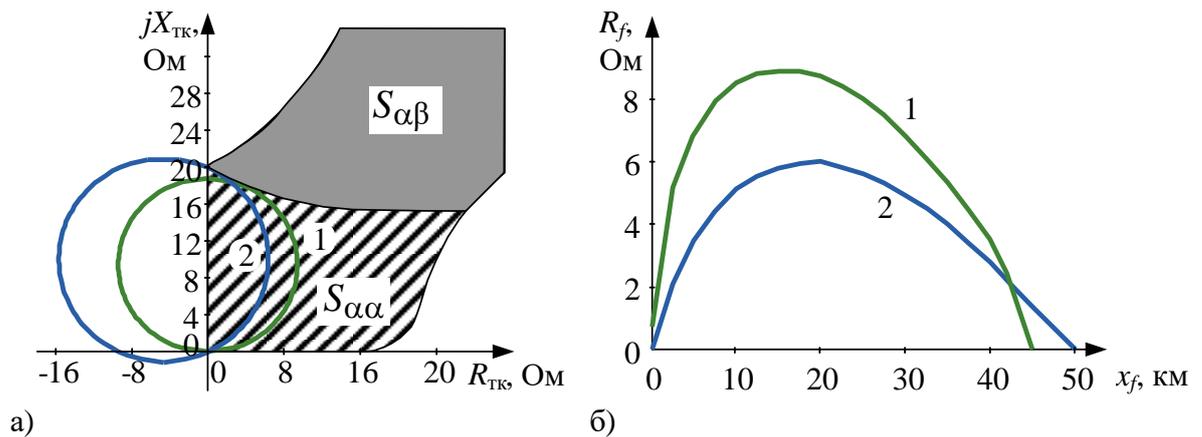


Рисунок 1.14 – Характеристики срабатывания в уставочном пространстве (а) и объектные характеристики (б): кривые 1 – для вектора параметров $\mathbf{M} = [19,2; 90^\circ]$; кривые 2 – для вектора параметров $\mathbf{M} = [22,0; 115^\circ]$

1.3.3 Синтез гибких структур защиты линий с использованием условного преобразования замеров

Микропроцессорная техника позволяет накапливать и объединять информацию о состоянии контролируемого объекта. Традиционные алгоритмы РЗА мало приспособлены к восприятию произвольных объёмов информации. Прямой путь манипуляций в пространстве замеров возможен,

но представляется трудно реализуемым в устройствах реального времени [145,156,157]. Разработаны способы многомерной защиты с использованием уставочных плоскостей и условного прямого преобразования (рисунок 1.4) [158].

В общем случае релейная защита оперирует в нескольких подпространствах единого уставочного пространства. В каждом уставочном подпространстве задается уставочная область $S_{уст,i}$. Результаты проверки попадания замеров \mathbf{z}_i в эти области объединяются некоторой логической операцией Ω , формирующей выходной логический сигнал модуля релейной защиты [94]:

$$\mathfrak{D} = \bigcap_{i=1}^M \{ \mathbf{z}_i \in S_{уст,i} \}, \quad (1.34)$$

где M – число подпространств.

Каждое подпространство или области в нем подразделяются на элементарные области (ячейки), что, как правило, связано с оптимизацией алгоритма функционирования модуля защиты. Уставочная область $S_{уст,i}$ предстает при этом в виде объединения N_i ячеек $S_{i,j}$:

$$S_{уст,i} = \bigcup_{j=1}^{N_i} S_{i,j}. \quad (1.35)$$

Поэтому методы распознавания решают три взаимосвязанные задачи информационного синтеза:

- а) подбор элементарных областей $S_{i,j}$;
- б) составление уставочных областей $S_{уст,i}$;
- в) выбор подпространств A_i уставочного пространства A .

Автором в составе научной группы разработаны и запатентованы

способы защиты энергообъекта, применимые в РЗА ЛЭП, основанные на принципах обработки многомерных пространств измерений [158-160]. Далее подробно рассматривается схема одного из них как пример предложенной гибкой структуры РЗА ЛЭП.

Основной этап обучения релейной защиты состоит из двух процедур. Сначала для заданной области изменения параметров $G_{\alpha}^{(0)}$ при помощи имитационной модели α -режимов получают области $S_{\alpha i}$ на плоскостях подпространств A_i . Для этого могут использоваться операции триангуляции и другие виды кодирования части плоскости.

Затем замеры, полученные в имитационной модели β -режимов проверяются на срабатывание в областях $S_{\alpha i}^{(0)}$ (применяется прямое условное преобразование), и в совокупности формируют области $S_{\alpha\beta i}^{(0)} \subset S_{\alpha i}^{(0)}$.

В результате получают настройки защиты в соответствии со структурой рисунка 1.15, где характеристики срабатывания отдельных реле объединены логической операцией И. Защита блокируется в том случае, если сработают все без исключения β -модули. Разрешение на срабатывание требует действия всех α -модулей и отсутствия блокировки от β -модулей.

Результаты поэтапного обучения в объектном и уставочных пространствах показаны на рисунке 1.16.

Этап 1. Имитационная модель α -режимов отображает точки объектного пространства $\mathbf{x}_{\alpha} \in G_{\alpha}^{(0)}$ в двумерные замеры на соответствующих плоскостях $\mathbf{z}_{\alpha i} = F_{\alpha i}(\mathbf{x}_{\alpha})$. Совокупность этих замеров образует области срабатывания $S_{\alpha i}^{(0)}$ (рисунок 1.16а).

Этап 2. Имитационная модель β -режимов отображает множество режимов $\mathbf{x}_{\beta} \in G_{\beta}$ в уставочные плоскости. Запоминаются лишь те режимы и

замеры, что отображаются во всех ранее полученных областях $S_{\alpha i}^{(0)}$.

Соответствующее условие имеет вид:

$$\bigcap_{i=1}^n \{z_{\beta i} \subset S_{\alpha i}^{(0)}\} = 1; z_{\beta i} = F_{\beta i}(x_{\beta} \in G_{\beta}). \quad (1.36)$$

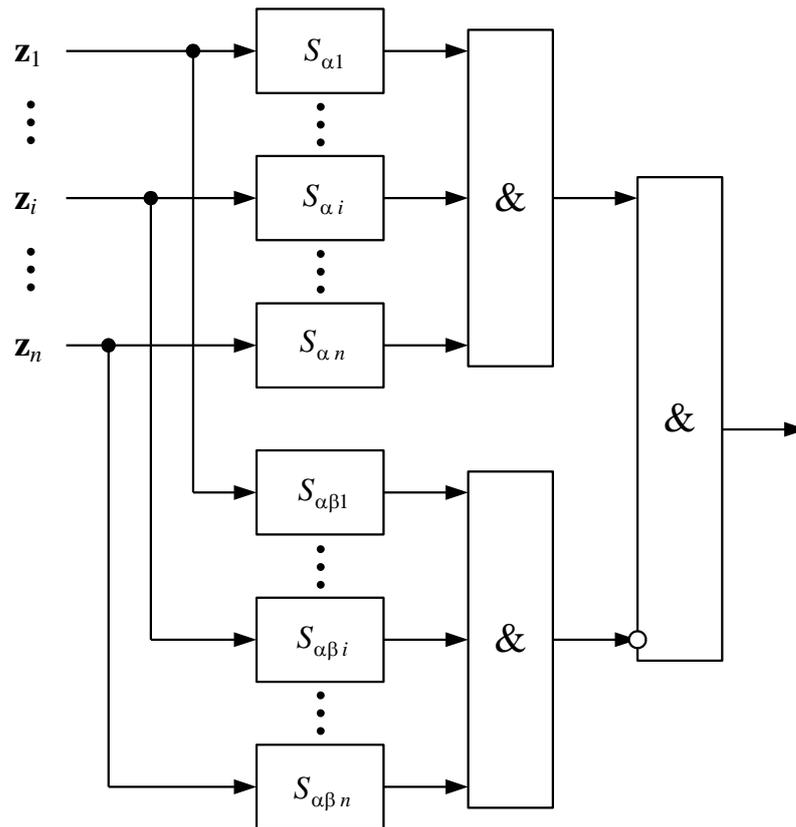


Рисунок 1.15 – Структурная схема одного из вариантов многомерной защиты

В итоге на больших или меньших частях областей $S_{\alpha i}^{(0)}$ разместятся области β -режимов $S_{\alpha\beta i}^{(0)}$. Двойной индекс свидетельствует о том, что эта подобласть более крупной области $S_{\alpha i}^{(0)}$. Обведенные жирными линиями на рисунке 1.16б, эти подобласти служат областями срабатывания блокирующих модулей.

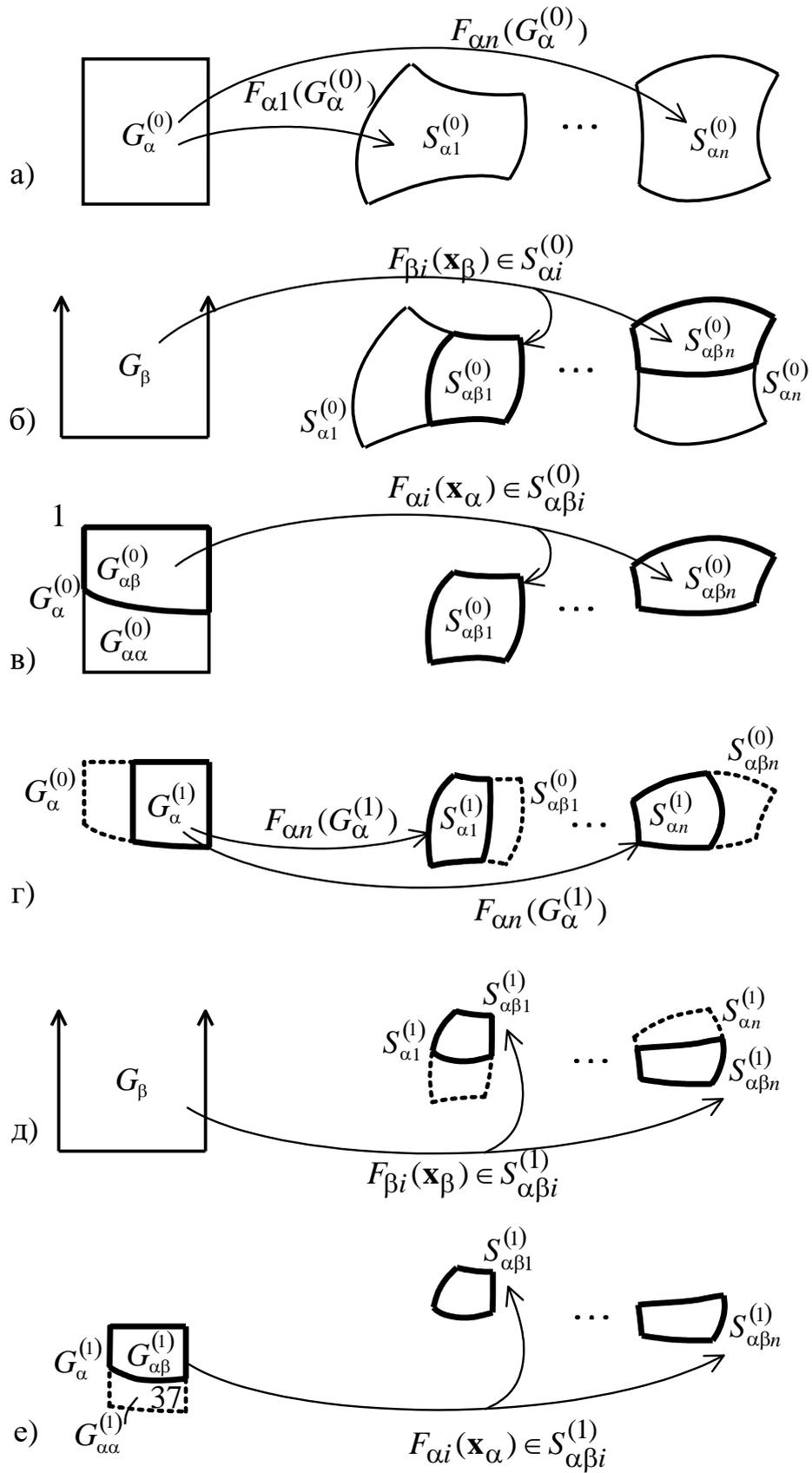


Рисунок 1.16 – Поэтапное обучение многомерной РЗА

Этап 3. Обученные модули защиты могут быть использованы для распознавания режимов объекта, если входные сигналы $\mathbf{z} = [z_1, z_2, \dots, z_n]^T$ поступают от измерительных преобразователей, а не от имитационных моделей. Проверка покажет, в какой части отслеживаемых объектных режимов $G_{\alpha\alpha}^{(0)}$ обеспечено срабатывание РЗА. Но часть α -режимов, обозначенная $G_{\alpha\beta}^{(0)}$, может попасть во все области блокирующих модулей, что вызовет блокирование и несрабатывание РЗА:

$$\bigcap_{i=1}^n \{ \mathbf{z}_{\alpha i} \in S_{\alpha\beta i}^{(0)} \} = 1; \quad \mathbf{z}_{\alpha i} = F_{\alpha i}(\mathbf{x}_{\alpha} \in G_{\alpha}^{(0)}). \quad (1.37)$$

Назначение последующих этапов – сократить размеры области α -режимов, не поддавшихся распознаванию. Для этого обучаются дополнительные модули по итерационной схеме. При переходе к дальнейшему обучению РЗА объектная область $G_{\alpha}^{(1)} \subset G_{\alpha\beta}^{(0)}$ занимает место $G_{\alpha}^{(0)}$, а процедура повторяется (рисунок 1.16 г, д, е).

Разработанные процедуры обработки информации открывают возможности для создания целого класса новых видов обучаемых модулей РЗА ЛЭП, оперирующих в пространствах меньшей размерности, отличающихся видом элементарных характеристик, порядком их настройки и алгоритмом срабатывания.

1.4 Выводы

1. Стремительное развитие и распространение микропроцессорных и коммуникационных технологий последних десятилетий значительно расширило возможности совместной обработки информации в РЗА ЛЭП. Этому отвечают методы пространственно-временной обработки данных, учитывающие корреляцию электрических процессов в отдельных частях

системы, а значит, и измеряемых электрических величин.

2. В качестве универсального инструментария анализа и распознавания режимов предложены многомерные методы обработки информации. В приложении к анализу объекта они позволяют выделить области распознаваемости и объектные характеристики ЛЭП. В упрощенных моделях ЛЭП возможен аналитический расчет характеристик распознаваемости зоны и места повреждения ЛЭП для дистанционного принципа, используемого в устройствах ОМП и дистанционной защиты.

3. Предложены алгоритмы построения универсального распознающего модуля РЗА, основанного на оптимизационной процедуре и имитационной модели ЛЭП. Для прикладных задач разработаны гибкие обучаемые структуры измерительных органов РЗА в многомерном пространстве и методы их настройки, позволяющие достигать наивысшей возможной распознающей способности.

Глава 2 Исследование информационных задач цифровой защиты и автоматики, связанных с распределенным измерением токов и напряжений

2.1 Анализ информационных задач и принципов измерения токов и напряжений в условиях цифровой трансформации комплекса линии электропередачи

В целях обеспечения надежного и экономичного функционирования электрической сети устройства РЗА выполняют измерение токов в ее ветвях и напряжений в узлах. В России в соответствии с технической политикой ПАО «Россети» [161] и типовыми схемами подстанций [163] для этого используются измерительные преобразователи, установленные на электрических подстанциях.

С точки зрения принятия решений выделяются следующие важнейшие требования к получаемой устройствами РЗА информации [164]:

- полнота,
- актуальность,
- достоверность,
- релевантность,
- защищенность.

Повышение быстродействия, селективности и чувствительности современных систем РЗА ЛЭП связано с развитием методов анализа цифровых сигналов и привлечением к распознаванию максимально большего количества измерений. Выше указывалось, что возможно применение универсальных обобщенных подходов к формированию таких модулей защиты. Современные информационные и коммуникационные технологии,

применяемые в РЗА, в полной мере способствуют этому развитию.

Так, последние два десятилетия все большее распространение получает стандарт МЭК 61850 «Сети и системы связи на подстанциях» [165-168], предоставляющий технологии для расширенного обмена информацией. Измерительные преобразователи передают данные о токах и напряжениях в шину процесса согласно протоколу Sampled Values (SV) [169], где они становятся доступны устройствам РЗА. Обмен дискретной информацией осуществляется по протоколам GOOSE и MMS [170]. Устройства РЗА, подключенные к соответствующим шинам процесса или станции, могут значительно расширять объем обрабатываемых в реальном времени данных по сравнению с устройствами, выполняющими непосредственное измерение [171-173].

Имея достаточный объем информации, устройства могут воспользоваться многомерными методами ее обработки. Так, на подстанции типа «5АН-мостик» [163] будут использованы дополнительно 14 трехфазных групп токов, что повысит размерность задачи распознавания, однако с точки зрения распознаваемости, изложенной в 1.2, качество защиты ЛЭП останется тем же, что и при измерении одной группы токов. С другой стороны, дополнительная информация может быть полезна, если ожидается погрешность или ошибка в измерении.

Поэтому для комплексов защиты и автоматики ЛЭП видится решение следующих задач:

- верификация входной информации,
- эффективное использование информации,
- эффективные преобразование информации,
- восстановление потерянной или недостающей информации,
- сохранение качества информации при передаче.

Эти задачи решаются в предложенном методе верификации и

восполнения информации на подстанции. Совместная пространственно-временная обработка входной информации, выполняемая с использованием автоматических процедур, позволяет осуществлять диагностику измерений и строить рациональную систему защиты. Предложенные протоколы и схемы передачи информации между подстанциями для продольной токовой дифференциальной защиты предоставляют инструментарий оптимизации комплекса ЛЭП с сохранением основных качеств защиты.

2.2 Разработка методов верификации измерений токов и напряжений на основе избыточной информации

2.2.1 Постановка задачи диагностики измерительных каналов защиты и автоматики

В соответствии с отраслевыми стандартами [2], устройства РЗА должны выполнять функции диагностики измерительных цепей:

- блокировки при неисправностях в цепях напряжения;
- контроль исправности вторичных цепей напряжения;
- блокировка при неисправности цепей переменного тока;
- контроль исправности токовых цепей.

Эти функции в большей степени ориентированы на локальный контроль одной трехфазной группы токов или напряжений или нескольких групп токовых цепей (в дифференциальной защите и в устройствах контроля исправности измерительных токовых цепей).

В отличие от названных методов, в настоящей работе будет решаться общая задача оценки качества измеренной информации в произвольных, более сложных конфигурациях и с большим числом измерений. Контроль исправности измерительных каналов РЗА будет производиться в

предположении отсутствия потерь в первичных проводниках подстанции, что допустимо принять для распределительных устройств одного уровня напряжения (в силу ограничений [174]).

Основная диагностическая задача состоит в распознавании режима неверных измерений в наблюдаемой сети. Дополнительная диагностическая задача – идентификация ошибочного измерения в электрической сети и его восстановление с использованием имеющейся информации.

Решение этих задач может производиться в рамках оценивания состояния электрической сети [175-181], анализа ее наблюдаемости [182,183], методами контрольных уравнений [184-186], интеллектуальных алгоритмов [187,188] и идентификации [189,190], если принимается, что вектор состояния совпадает с вектором измерений. Однако в настоящей работе предлагаются развитие и существенное упрощение методов, ориентированные на применение в вычислительных системах реального времени и по отношению к данным, доступным в рамках одной цифровой подстанции.

Известна еще одна группа методов [191-193] диагностики измерительных цепей и алгоритмов защиты шин и участка электрической сети, основанная на дифференциально-логическом принципе. Путем предварительного топологического анализа схемы соединений подстанции ее разбивают на отдельные узлы, определяющие границы зоны каждого участка. Совместный анализ срабатывания дифференциальных измерительных органов отдельных зон позволяет выявлять ошибочное измерение и отличать его от короткого замыкания на этом участке.

В настоящей работе предлагаются значительное развитие и обобщение методов с использованием основных соотношений законов электрической цепи для токов и напряжений. В результате формализации метода удастся расчетом не только выявить состояние ошибки, но и оценить истинные значения искаженных измерений. Кроме того, предложенный

метод формализует работу с дискретными данными о положении КА и позволяет выявлять ошибки в этих данных.

2.2.2 Особенности диагностики измерительных каналов в простой электрической цепи

Контроль токов и напряжений на подстанции осуществляется с использованием множества измерительных преобразователей, например, измерительных трансформаторов тока и напряжения (ИТТ и ИТН), включенных последовательно в ветви или поперечно между узлами и «нулем» первичной схемы. Простой будем называть такую электрическую цепь, в которой измеряются токи всех ветвей и напряжения всех узлов.

Введем обозначения векторов токов n ветвей \mathbf{I} и m узловых напряжений \mathbf{U} . Для описания топологии цепи удобно использовать матрицу инциденций \mathbf{A} , которая однозначно описывает любую электрическую схему, указывая на соединение ветвей и узлов. Число столбцов n матрицы \mathbf{A} соответствует числу обозначенных ветвей, число строк m – числу узлов. Каждый элемент $A_{i,j}$ матрицы \mathbf{A} принимает следующие значения:

0, если ветвь j не имеет непосредственной связи с узлом i ;

1, если ток ветви j вытекает из узла i ;

-1, если ток ветви j втекает в узел i .

Тогда первый закон Кирхгофа для всех узлов схемы в матричной форме:

$$\mathbf{A}\mathbf{I} = \mathbf{0}. \quad (2.1)$$

Здесь и далее $\mathbf{0}$ – вектор нулевых значений соответствующей длины (в данном случае – m).

Выполнение этого равенства означает соответствие измерений токов

заданной топологии сети. Равенство (2.1) может использоваться для различных типов измеряемых величин: мгновенных токов

$$\mathbf{I} = \{i_i\}, i = \overline{1, n}$$

или для комплексных значений основной гармоники токов ветвей:

$$\underline{\mathbf{I}} = \{\underline{I}_j\}, j = \overline{1, n}.$$

Без ущерба для общности будем во всех случаях использовать выражение (2.1), подразумевая мгновенные или комплексные величины.

Аналогичное выражение может быть записано и для напряжений (второй закон Кирхгофа):

$$\mathbf{U}^T \mathbf{A} = \mathbf{0}. \quad (2.2)$$

Условие (2.2) также справедливо для разных типов измеряемых величин.

В качестве примера простой цепи рассмотрим схему по рисунку 2.1 одной секции шин в соответствии со схемой «№110-9 – одна рабочая секционированная выключателем система шин» [163]. В предположении, что все коммутационные аппараты замкнуты, матрица инцидентий для токов одной секции (показаны на рисунке 2.1) состоит из одной строки, а потому выражение (2.1) в режиме без внутреннего повреждения можно записать как сумму токов, сходящихся в одном узле:

$$\sum I_i = 0. \quad (2.3)$$

Если равенство (2.3) не соблюдается, одно или несколько измерений во входном векторе \mathbf{I} содержат ошибку. Может оказаться и так, что равенство (2.3) выполняется при ошибочном векторе (например, в случае взаимной компенсации погрешностей в нескольких величинах при суммировании, в том числе при ошибочном обращении всех элементов вектора \mathbf{I} в ноль). Контроль напряжений по равенству (2.2) в схеме по рисунку 2.1 выполняется аналогично токам. Таким образом, равенство (2.1)

(и (2.2)) является необходимым условием адекватности измерений, однако не гарантирует отсутствие ошибок в измерениях. В данном случае равенство (2.1) не может использоваться и для нахождения замеров с ошибкой. Расширенный анализ был бы возможен при наличии дополнительных измерений или топологических ограничений, которые в представленной схеме отсутствуют.

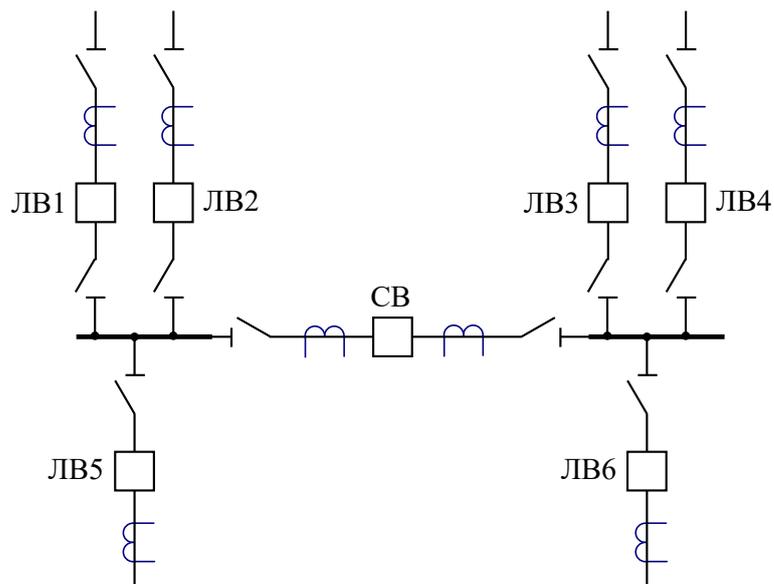


Рисунок 2.1 – Схема одной рабочей секционированной выключателем системы шин

Рассмотрим более сложную цепь, показанную на рисунке 2.2. Она составлена на основе схемы «5АН-мостик» с выключателями в цепях трансформаторов и ремонтной перемычкой со стороны трансформаторов [163]. Схема дополнена измерительными преобразователями тока, чтобы соответствовать критерию простой схемы: каждая ветвь схемы должна содержать не более одного измерительного преобразователя тока и не более одного коммутационного аппарата. В результате этого преобразования исходная схема дополняется новыми узлами, образующими новые ветви, чтобы удовлетворить указанным ограничениям. Этим объясняется появление узлов 2, 3, 5, 6, 8, 9 и 11, объединяющих по две ветви. Дополнительные ИТТ позволяют рассматривать схему как простую.

Ветвь, находящаяся между двумя узлами, будем называть внутренней, а ветвь на «периферии» схемы, присоединенную к единственному узлу – внешней.

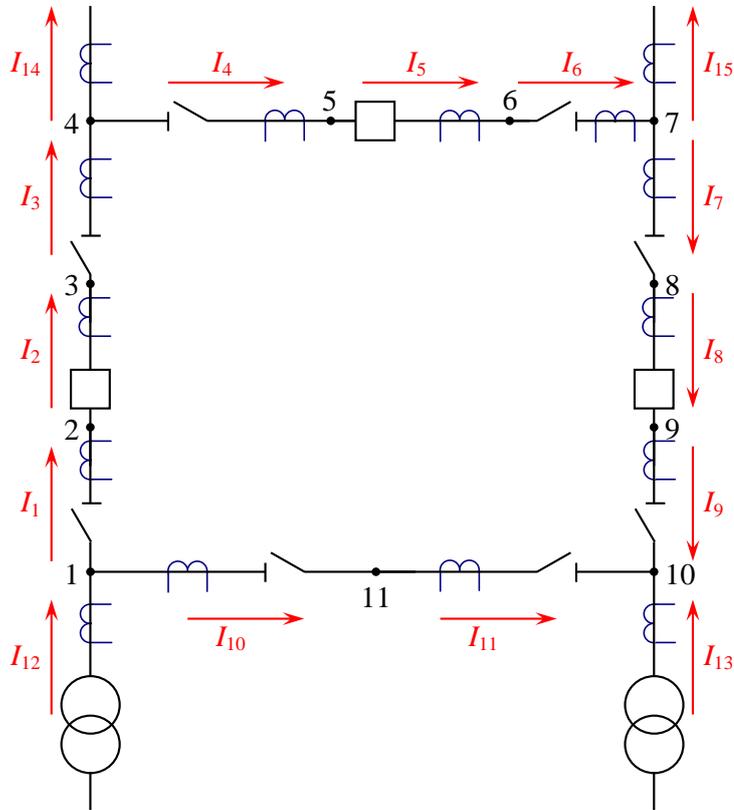


Рисунок 2.2 – Схема «5АН-мостик», дополненная измерительными преобразователями

В предположении, что все коммутационные аппараты замкнуты, матрица инциденций \mathbf{A} для представленной цепи имеет следующий вид:

\mathbf{A}															
	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	-1	0	0	0
	-1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	-1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	-1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
	0	0	0	-1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	-1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	-1	1	0	0	0	0	0	0	0	1
	0	0	0	0	0	0	-1	1	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	-1	1	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	-1	0	-1	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	1	0	0	0	0

Равенство (2.1) охватывает все измеряемые токи и может использоваться для их контроля по величине вектора невязки:

$$\mathbf{E} = \mathbf{A}\mathbf{I}. \quad (2.4)$$

Ошибка в измерениях фиксируется, если имеются ненулевые элементы вектора невязки \mathbf{E} : множество L_E указывает на узлы, в которых сумма токов, сходящихся в узле, отлична от нуля:

$$L_E = \{i, |E_i| > \varepsilon_0\},$$

где ε_0 – заданная величина невязки.

Возможно дальнейшее исследование электрической схемы с целью поиска одного или нескольких ошибочных токов. Легко видеть, что ошибочное измерение отражается только на строках, относящихся к тем узлам, в которые оно вводится матрицей инциденций. Поэтому величину ошибки и возможные ветви с ошибкой находят по формулам:

$$\mathbf{E}' = \mathbf{A}^T \mathbf{E};$$

$$L_J = \{j, |E'_j| > \varepsilon_0\}.$$

Важно, что в случае единственной ошибки в измерениях отклонение невязки всегда пропорционально отклонению измерения ΔJ в ветви k . Так, если представить вектор с ошибкой как сумму вектора истинных токов \mathbf{I} и вектора отклонения $\Delta \mathbf{I}$:

$$\mathbf{I}' = \mathbf{I} + \Delta \mathbf{I},$$

где элементы вектора

$$\Delta I_j = \begin{cases} \Delta J, & j = k; \\ 0, & j \neq k, \end{cases}$$

то для узлов p и q , к которым подключена ветвь с током k :

$$\mathbf{A}_p \mathbf{I}' = \mathbf{A}_p \mathbf{I} + \mathbf{A}_p \Delta \mathbf{I} = \mathbf{0} + \mathbf{A}_p \Delta \mathbf{I} = A_{p,k} \Delta J; \quad \mathbf{A}_q \mathbf{I}' = A_{q,k} \Delta J,$$

где A_p – вектор, составленный из строки p матрицы A ;
 $A_{p,k}$ – элемент с номером k этого вектора.

Следовательно, одна ошибка в векторе токов проявит себя в одном или в двух уравнениях для узлов, что укажет на множество возможных ошибочных ветвей в множестве L_J . Так, если невязка проявляется в двух узлах, то ошибка лежит на пересечении множеств ветвей, соединенных с этими узлами, то есть она находится в токах ветвей, соединяющих эти узлы. Если же невязка наблюдается только в одном узле, то под подозрение попадают «внешние» токи, вводимые в схему от неизвестных внешних узлов (ветви 12, 13, 14, 15 на рисунке 2.2).

В таблице 2.1 представлен анализ возможностей оценки одного ошибочного измерения схемы на рисунке 2.2 на основе предложенного метода. В данной схеме всегда возможно выделить единственный ток, являющийся причиной невязки. Он совпадает с заданным неверным значением. Как указывалось выше, в схеме на рисунке 2.1 метод указывает на ошибку в токе «внешней» ветви, что верно, так как все ветви схемы являются «внешними».

Таким образом, ошибка в измерении токов ветвей рассмотренной простой электрической цепи может быть выявлена, а круг токов с возможной ошибкой может быть значительно сокращен, если в схеме имеется достаточное число ограничений (уравнений).

2.2.3 Разработка методов совмещения дискретной и аналоговой информации в задаче диагностики измерительных каналов

В приведенных электрических схемах на рисунках 2.1 и 2.2 имеются коммутационные аппараты, способные изменить электрические связи между отдельными узлами. К КА относятся высоковольтные выключатели и

разъединители. Знание состояния этих элементов позволяет увеличить число ограничений в схеме. Одновременно вводятся и новые неизвестные – множество признаков корректности сведений о состоянии коммутационных аппаратов.

Примем, что положение коммутационных аппаратов в схеме задается вектором дискретных значений \mathbf{D} , элементы D_j которого принимают значение 0, если КА ветви j отключен, и 1, если аппарат ветви j включен.

Таблица 2.1 – Ошибка в измерениях и ее анализ

№	Ветвь с введенной ошибкой	Узлы с невязкой	Токи с возможной ошибкой согласно алгоритма	
1	1	1, 2	1,12,10	1,2
2	2	2, 3	1,2	2,3
3	3	3, 4	2,3	3,4,14
4	4	4, 5	3,4,14	4,5
5	5	5, 6	4,5	5,6
6	6	6, 7	5,6	6,7,15
7	7	7, 8	6,7,15	7,8
8	8	8, 9	7,8	8,9
9	9	9, 10	8,9	9,11,13
10	10	1, 11	1,12,10	10,11
11	11	10, 11	9,11,13	10,11
12	12	1	1,12,10	
13	13	10	11,9,13	
14	14	4	3,4,14	
15	15	7	6,7,15	

В предположении, что в наблюдаемой электрической цепи

отсутствуют повреждения (т.е. не предусмотренные матрицей инцидентий связи), можно принять, что отключенному положению КА ветви всегда соответствует нулевое значение тока этой ветви, что выражается уравнением:

$$(\mathbf{1}_n - \mathbf{Q})\mathbf{I} = \mathbf{0}, \quad (2.5)$$

где $\mathbf{1}_n$ – единичная матрица размером $n \times n$;

$\mathbf{Q} = \mathbf{1}_n \mathbf{D}$ – матрица состояний КА.

Соответственно, проверка на состояние ошибки осуществляется с использованием вектора невязки

$$\mathbf{E} = (\mathbf{1}_n - \mathbf{Q})\mathbf{I}. \quad (2.6)$$

Ошибка в измерениях фиксируется по описанному выше алгоритму, если имеются ненулевые элементы вектора невязки \mathbf{E} .

Дополнительный эффект диагностики измерений достигается при совместном анализе величин различных фаз, однако в данной работе это расширение метода не описано, а все схемы и выражения приведены в своем однолинейном варианте.

Если по (2.6) не выявлены несоответствия в отключенных ветвях, то выполняется проверка на ошибки в других измерениях схемы. При изменении положения КА должна изменяться матрица инцидентий \mathbf{A} . Это изменение относительно наиболее полной схемы соединений можно производить домножением на матрицу состояний КА. Тогда условия (2.1) и (2.2) с учетом состояния коммутационных аппаратов записывают с ее учетом:

$$\mathbf{AQI} = \mathbf{0}; \quad (2.7)$$

$$\mathbf{UAQ} = \mathbf{0}. \quad (2.8)$$

Таким образом, информация о состоянии КА дает возможность повысить степень локализации ошибочных измерений. Однако и сама эта

информация о состоянии нуждается в проверке.

Индикаторами её ошибочности являются эксплуатационные ограничения первичной схемы, а также выражения (2.5) и (2.7) (для токов). Невыполнение одного из равенств может означать ошибку как в токах, так и в состояниях КА. Чтобы локализовать ошибку, необходимо найти дополнительные условия. Так, при правильных измерениях токов в простой электрической цепи всегда выполняется равенство (2.1), составленное для схемы со всеми включенными КА. Можно выделить два возможных ошибочных состояния КА:

- Ошибочный ноль – указание на отключенное состояние ветви, являющейся частью сети под напряжением. Такое состояние будет выявлено условием (2.5), откуда будут получены номера ветвей с ошибочной дискретной информацией. Существует ограничение этого метода – при малом значении токов в соответствующих ветвях ошибка не будет обнаружена.

- Ошибочная единица – указание на включенное состояние отключенной ветви. Отключение характеризуется отсутствием тока и возможным неравенством напряжений на разных сторонах КА. Однако этот режим неотличим от эксплуатационных условий присоединений, находящихся под охранном напряжением, а потому не может быть надежно выявлен на основе имеющейся информации.

2.2.4 Особенности диагностики двух ошибок измерения в простой электрической цепи

По отношению к контролю токов ветвей и состояний КА существуют три варианта двух ошибок во входной информации:

- две ошибки в токах;
- одна ошибка в токах и одна ошибка в состоянии КА;

- две ошибки в состояниях КА.

Проверим работу предложенного метода в случае двух не компенсирующих друг друга погрешностей в измеряемых величинах тока. В таблице 2.1 представлены результаты распознавания введенной ошибки измерения в схеме на рисунке 2.2. На пересечении столбцов номеров токов с ошибкой находятся ячейки с номерами токов, которые могут содержать ошибку, согласно представленному выше алгоритму. Необходимо использовать дополнительный алгоритм выявления токов, действительно содержащих ошибку.

Такая методика выявления ветвей с ошибочным измерением представлена в таблице 2.2 и основана на анализе узлов с невязкой [194,195]. Такие узлы обозначены номерами N_i . Ниже приведено описание шагов алгоритма в зависимости от числа узлов с невязкой, а иллюстрация его применения – в таблице А.1.

Шаг 1. Четыре узла с невязкой (голубые ячейки таблицы). Ветви с ошибками в измерении заключены между узлами с невязкой, причем данные ветви не должны иметь общего узла.

Шаг 2. Три узла с невязкой (серые ячейки таблицы).

Шаг 2а. Если два узла соединяет внутренняя ветвь, а к третьему узлу подключена внешняя ветвь, то это и есть ветви с ошибочным измерением.

Шаг 2б. Если три узла соединены двумя ветвями с одним общим узлом, и к этому узлу подведена внешняя ветвь, то две внутренние ветви содержат ошибочное измерение.

Шаг 3. Два узла с невязкой.

Шаг 3а. Если два узла не соединены ветвью, то внешние ветви, подведенные к узлам, содержат ошибку (розовые ячейки таблицы).

Шаг 3б. Если два узла соединены ветвью, и к одному из узлов подведена внешняя ветвь, то принимается, что ошибочное измерение

произведено в обеих ветвях, причем следует отметить, что во внешней ветви ошибки может и не быть (желтые ячейки таблицы).

Этот алгоритм также может быть представлен через процедуру исключения из-под подозрения токов, сходящихся к узлам, в которых невязка не превысила заданный порог:

$$L_E = \{i, |E_i| > \varepsilon_0\};$$

$$\mathbf{E}'_{\beta} = \mathbf{A}^T \mathbf{E}_{\beta}.$$

Таблица 2.2 – Метод идентификации ошибочных измерений

№	Узлы с невязкой				Ветви с ошибкой	
	№1	№2	№3	№4	№1	№2
1	N1	N2	N3	N4	N1-N2	N3-N4
2	N1	N2	N3	–	N1-N2	N2-N3
3	N1	N2	N3 (внеш.)	–	N1-N2	Внеш. N3
4	N1	N2 (внеш.)	–	–	N1-N2	Внеш. N2
5	N1 (внеш.)	N2 (внеш.)	–	–	Внеш. N1	Внеш. N2
6	N1	N2	–	–	N1-N2	–
7	N1 (внеш.)	–	–	–	Внеш. N1	–

При создании инверсной матрицы \mathbf{E}_{β} необходимо воспользоваться кодированием узлов, обеспечивающим невозможность взаимной компенсации токов предполагаемых ветвей и обращением их в нуль:

$$L_{J\beta} = \{j, |E'_{\beta}| > \varepsilon_0\};$$

$$L'_J = L_J \setminus L_{J\beta}.$$

Анализ распознаваемости показал, что из 105 возможных сочетаний ошибочных измерений в ветвях простой схемы «5АН-мостик» лишь в 13

случаях невозможно точно определить ветви с ошибками, однако во всех случаях удастся в разы сузить круг ветвей, находящихся под подозрением. Нераспознаваемые случаи связаны с внешними ветвями, для которых нет дополнительных ограничений. Для исключения эффекта нераспознаваемости необходимо изменить схему измерения на подстанции.

В таблице А.2 представлены результаты распознавания одной ошибки в измерении тока и одной ошибки в положении коммутационного аппарата в схеме на рисунке 2.2. Из таблицы видно, что обе ошибки могут быть выявлены во всех случаях, к тому же возможно непосредственно определить ветви с ошибкой.

Исследование показало, что два ложных нуля во входной дискретной информации (положении коммутационных аппаратов) также надежно обнаруживаются указанным выше способом. Причем выражение (2.6) позволит выявить все ветви непосредственно.

2.2.5 Построение методов восстановления измерений токов на основе данных предварительной диагностики

После того, как определено множество L_J ветвей с возможной ошибкой, предпринимается попытка восстановления измерений. Рассмотрим этот процесс на примере контроля токов. Разработан метод [194,196], при котором все значения токов множества L_J находят из системы линейных уравнений (2.1).

Для этого вектор токов \mathbf{I} разбивают на два подвектора: вектор измеряемых доверенных токов \mathbf{I}_α и вектор подлежащих оценке расчетных токов \mathbf{I}_x (их индексы перечислены в L_J). Как следствие, образуются две матрицы инцидентий, являющиеся подматрицами исходной матрицы \mathbf{A} и связанные с двумя группами токов: \mathbf{A}_α и \mathbf{A}_x . Тогда выражение (2.1) можно

записать с использованием введенных блочных матриц:

$$\mathbf{A}_\alpha \mathbf{I}_\alpha + \mathbf{A}_x \mathbf{I}_x = \mathbf{0}. \quad (2.9)$$

Решая уравнение (2.9), можно получить матрицу расчетных токов \mathbf{I}_x . В зависимости от различных условий уравнение (2.9) может не иметь однозначного решения. Тогда рекомендуется получать решение по методу наименьших квадратов:

$$\hat{\mathbf{I}}_x = (\mathbf{A}_x^T \mathbf{A}_x)^{-1} \mathbf{A}_x^T (-\mathbf{A}_\alpha \mathbf{I}_\alpha). \quad (2.10)$$

Повторная проверка правильности решения производится по выражению (2.5), а нулевой вектор невязки \mathbf{E} укажет на успешность восстановления информации.

Ранее показано, что метод анализа узлов и ветвей правильно выявляет ветви с ошибкой измерения. Поэтому и процедура (2.10) также правильно восстанавливает неизвестные значения токов.

Выше рассмотрена так называемая простая электрическая схема, в которой измерены токи всех ветвей, содержащих КА или измерительный преобразователь. Большинство применяемых схем подстанций [163] не соответствуют этим условиям, а потому требуется адаптация метода для случаев, когда число измерений меньше, а неопределенность их значений выше.

Рассмотрим схему рисунка 2.2 «110-5АН – мостик» с реальным числом измерений. Сохраним ее представление простой схемой, однако все дополнительные измерения будем считать неизвестными и обозначим \mathbf{I}_x . Тогда можно определить эти токи в соответствии с методикой восстановления токов по выражению (2.10). Последующая верификация найденных измерений осуществляется по выражению (2.5). Грубая ошибка проявит себя, а дальнейшее восполнение измерений производится по описанной процедуре восстановления.

Проведен анализ выявительной способности алгоритма при допущении одного ошибочного замера в схеме на рисунке 2.2. Результаты его работы представлены в таблице 2.3. Как видно, существуют случаи, когда метод не выявляет ошибку, а «компенсирует» ее за счет вычисляемых, неизвестных ранее значений токов. Это характерно для ситуаций, когда измерений недостаточно для контроля всех ветвей электрической цепи. Предварительный топологический анализ позволяет выявить условия нераспознаваемости ошибки на стадии проектирования. Ситуация, показанная в таблице 2.3, решается введением дополнительных измерительных преобразователей во внешние ветви или дублированием измерений в отдельных ветвях.

Таблица 2.3 – Возможность выявления ошибки в измерениях

Ток ветви	Возможность выявления ошибки
I_1	Да
I_2	Да
I_3	Да
I_4	Нет
I_5	Нет
I_6	Да
I_7	Да
I_8	Да
I_9	Да
I_{10}	Да
I_{11}	Да
I_{12}	Да
I_{13}	Да
I_{14}	Да
I_{15}	Да

2.2.6 Сравнительный анализ методов диагностики и восстановления измерений токов в схемах с дублированием измерительных преобразователей

Дублирование – один из методов повышения наблюдаемости схемы подстанции. Для этого в каждой цепи устанавливают дополнительные ИП, а схему представляют расширенным графом с увеличенным числом узлов и ветвей, дополняющих исходную схему в соответствии правилами простой схемы.

Возможны варианты автономности дублирующих измерений в зависимости от следующих факторов:

- объединение и разделение питания дублирующих ИП;
- объединение и разделение системы связи дублирующих ИП;
- объединение и разделение аппаратного обеспечения (силовая, преобразовательная, измерительная, вычислительная части) дублирующих ИП.

В настоящей работе рассмотрены аспекты анализа распознаваемости ситуаций ошибки в измерениях, поступающих на вход РЗА ЛЭП, применимые к любой из заданных схем.

В работе рассмотрен пример схемы «110-6Н – треугольник» [163], которая дополнена измерительными преобразователями тока до вида простой. Результирующая схема показана на рисунке 2.3а. На рисунке 2.3б представлена одна из дублирующих систем измерения с указанием всех узлов и токов ветвей. Полная схема содержит 21 узел и 24 ветви.

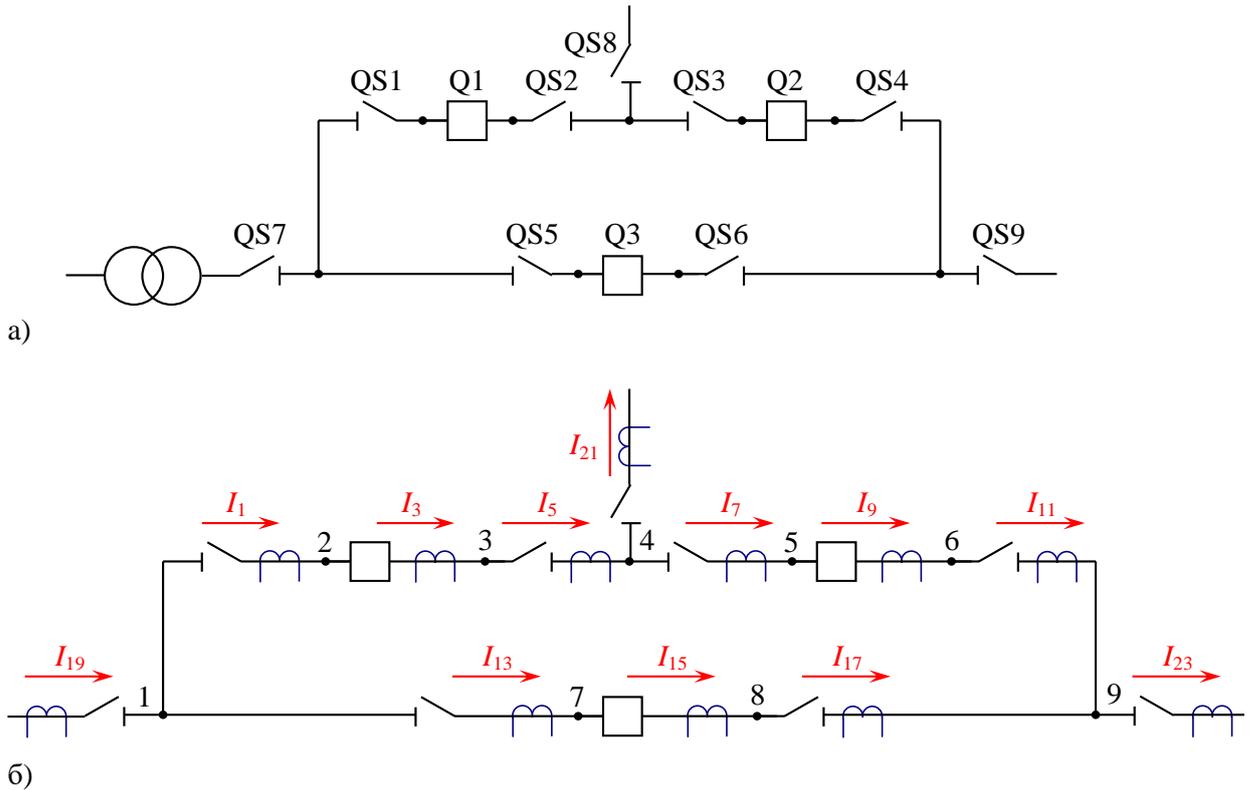


Рисунок 2.3 – Схема «110-6Н – треугольник»

Использованы следующие методы использования измерений. В первом методе идентификацию ошибок измерения и восстановление токов в схеме производят по уравнениям (2.5) и (2.10) соответственно. Этот метод (№1) не учитывает специфику дублированных систем измерения и оперирует полными блочными матрицами инцидентности \mathbf{A}_x и \mathbf{A}_α . В качестве альтернативы ему рассматриваются два метода.

Метод №2 предполагает деление множества L_E на два подмножества L_{E1} и L_{E2} в соответствии с принадлежностью к первой или второй дублирующей системе измерений. Далее токи каждой системы восстанавливаются независимо в соответствии с формулой (2.10) по данным только своей системы.

Метод №3 рассматривает системы измерения как независимые еще на этапе идентификации узлов и ветвей с ошибками. Этот случай наиболее характерен для современной РЗА.

Проверим работу предложенных методов в предположении, что ошибки измерений взаимно не компенсируются. Испытания проводятся при числе ошибок от 1 до 5 с перебором всех возможных комбинаций. При этом алгоритм восстановления токов не получает информацию о реальном числе ошибок, а действует в соответствии с описанным механизмом выявления ветвей с возможной ошибкой. Результаты работы алгоритмов представлены в таблице 2.4. Заметим, что при наличии четырех и более ветвей с ошибками в данной схеме существуют условия, когда измерений недостаточно для однозначного определения токов всех ветвей электрической цепи предложенными методами.

Таблица 2.4 – Ограничения распознающей способности методов

Число ошибок	Всего Случаев	Доля ошибок при восстановлении токов, %		
		Метод №1	Метод №2	Метод №3
1	24	0	0	0
2	276	0	0	10,87 (0)
3	2024	0	2,42 (0)	30,24 (0)
4	10626	0,37	9,74 (0,37)	53,11 (0,71)
5	42504	1,85	23,63 (1,85)	73,80 (3,51)

Алгоритм №3 показал низкую устойчивость к большому числу ошибок измерения, что связано с тем, что в каждой изолированной дублирующей системе измерений избыточных показаний оказывается недостаточно для восстановления большого числа неизвестных токов, которое всегда не меньше, чем размерность L . Алгоритм №2 показал промежуточные результаты, тогда как полносхемный алгоритм №1 оказался устойчив даже к трем ошибкам измерения.

Примечательно, что использование информации о дублировании измерений путем попарного сравнения и восстановления токов двух систем позволяет повысить работоспособность алгоритма №2 (значения в скобках в

таблице 2.4) и приблизить показатели к алгоритму №1.

Также следует отметить, что предел распознавания для информационной базы каждого из методов находится значительно выше (таблица 2.5). При этом он совпадает с числом токов множества L_E при максимальном распознаваемом числе ошибок.

Таблица 2.5 – Абсолютная нераспознаваемость ошибок в схеме

Число Ошибок	Всего случаев	Доля ошибок при восстановлении токов, %		
		Метод №1	Метод №2	Метод №3
1,2,3,4	2324= 24+276+2024	0	0	0
5	42504	0	0,0141	0,0141
6	134596	0	0,0847	0,0847
7	346104	0	0,2964	0,2964
8	735471	0	0,7913	0,7913
9	1307504	0	1,7852	1,7852
10	1961256	0,0001	3,5859	3,5859
11	2496144	0,0017	6,6088	6,6088

Достижение этого предела в распознавании возможно, так как теория и вычислительный эксперимент показывают, что минимальное число токов, уравнивающих ошибки в узлах по уравнению (2.10), дает единственное верное решение задачи поиска ошибки в измерениях. Таким образом, обладая достаточными вычислительными ресурсами, диагностическая система может демонстрировать экстремальное распознавание ошибок в измерениях.

Эти расчеты показывают, что возможна оптимизация инфраструктуры подстанции в двух направлениях. Если при расчете надежности измерений для РЗА ЛЭП допустить одновременный отказ только одного ИП, то из 12 преобразователей можно отказаться от трех, а из 24 (после дублирования) преобразователей – от 8. С учетом размещения дополнительных

преобразователей в соответствии с неопределенностью, отраженной в таблице 2.5, то общий эффект может составлять до 50% от числа ИП. С другой стороны, использование информации по методу №1 предполагает передачу всех данных в общей шине, что повышает требования к ее пропускной способности и скорости обработки в устройствах РЗА. В методе №2 возможна распределенная обработка информации, а методе №3 – прямое снижение потока передаваемых данных в один узел РЗА, что способствует снижению полной стоимости коммуникационного оборудования подстанции,

2.2.7 Исследование возможностей повышения точности оценки измерений с использованием итерационного алгоритма

Кроме грубой ошибки в токах и напряжениях, различают также погрешность измерения, когда ИП остаются в своем классе точности, однако измеренное значение не соответствует действительному. Эта погрешность будет служить причиной несогласованности измерений в примыкающих ветвях электрической схемы или различных устройств защиты и автоматики ЛЭП. В условиях избыточности системы измерений возможно снизить максимальную погрешность измерений. Для этого используют алгоритм восстановления с меньшими порогами ε_0 . Затем запускают итерационную процедуру (на примере токов):

- определяют невязку в узлах по выражению (2.5);
- выявляют ветви, примыкающие к заданному числу узлов с максимальной невязкой;
- восстанавливают токи выбранных ветвей по выражению (2.10).

Процесс завершается после снижения максимальной невязки до приемлемого уровня с ограничением максимального числа итераций.

Для примера выполнены вычислительные эксперименты на схеме

рисунка 2.3. В токи введены случайные погрешности до 1%. Предполагается распределение погрешностей, близкое к нормальному. Рассчитаны величины максимального (синий) и стандартного среднего (красный) отклонения оценки измерений от истинных значений (без погрешности) и невязки в узлах схемы на каждой итерации. Результаты для первых десяти итераций, показанные на рисунке 2.4, свидетельствуют о том, что погрешность в измерениях была значительно снижена. В вычислительных экспериментах со случайным распределением ошибок уточнение составляло от 2 до 10 раз.

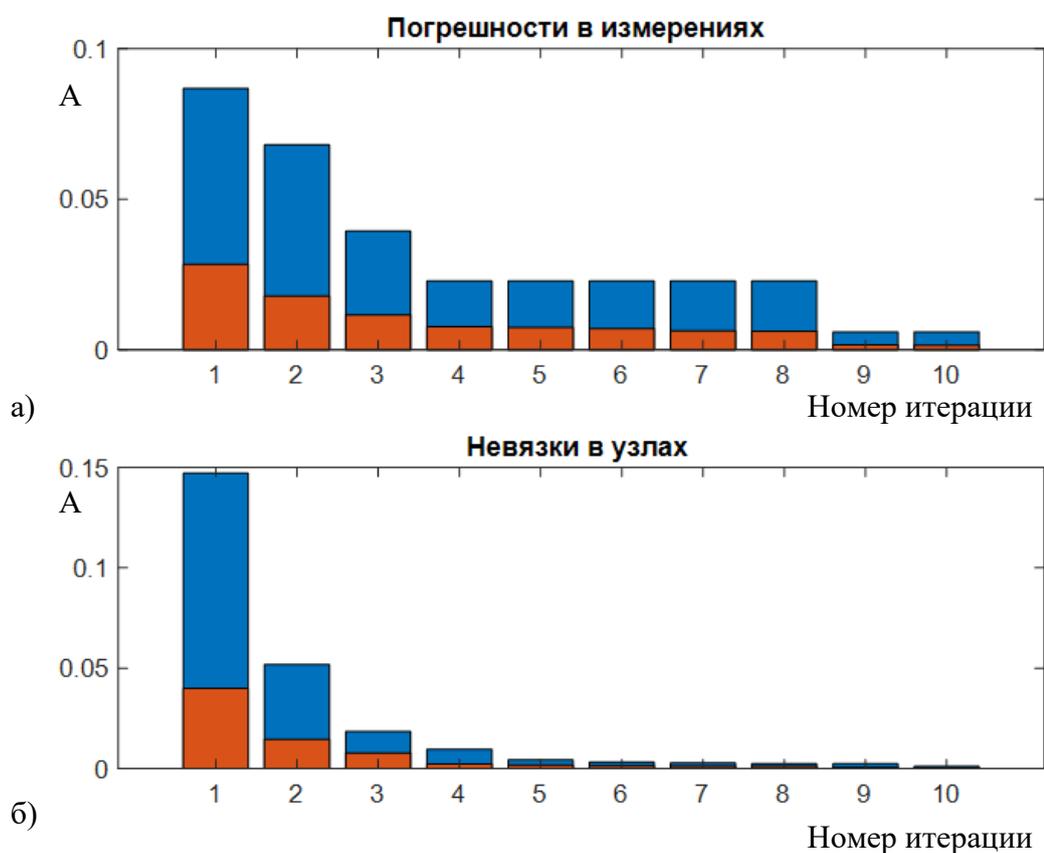


Рисунок 2.4 – Восстановление токов итерационным методом: погрешности в измерениях (а); невязки в узлах (б)

Таким образом, при наличии достаточного числа ИП на подстанции достигается повышение точности оцениваемых величин токов и напряжений для целей в РЗА ЛЭП.

2.2.8 Практические аспекты применения алгоритмов идентификации и восполнения погрешности измерений на подстанции

Используемые в России электрические сети являются трехфазными, поэтому видится пофазное применение методики верификации и восполнения информации измерительных преобразователей одного класса напряжения. Это соответствует пофазному исполнению ИП тока (для всех классов напряжения) и напряжения (как правило, при номинальном напряжении 220 кВ и выше), а также отдельному каналу аналогово-цифрового преобразования для каждой фазы в устройствах РЗА. Дискретные сигналы состояния коммутационных аппаратов также обрабатывают либо для одной, либо для трех фаз. Предел распознаваемости режимов с ошибкой измерения определяется топологией участка электрической сети, а потому является общим для всех фаз.

Как указывалось выше, методики верификации и восполнения информации могут применяться как к ортогональным составляющим основной гармоники, так и к мгновенным значениям токов и напряжений. Во всех случаях при регулярном наблюдении (например, каждые 0,25–1 мс) получают векторы невязок \mathbf{E}' и множество ошибочных токов L_J . Повторяемость в этих величинах во времени означает длительную ошибку в одних и тех же токах и служит дополнительным признаком подтверждения режима ошибки (рисунок 2.5).

С распространением стандартов серии МЭК 61850 [165,197] в области автоматизации электрических подстанций и стандартов Единой информационной модели (ЕИМ) для описания электрической сети создают условия для автоматизации процессов верификации и восполнения измерений на подстанции. Так, описание информационного обмена по стандартам МЭК 61970 и МЭК 61968 приведено в [198]. В цифровом обмене доступна как коммутационная, так и топологическая информация [199-202].

Дополнительным источником сведений о системе служат файлы настройки (SCD и CLD) по стандарту МЭК 61850, в которых содержатся структуры устройств, публикующих информацию о состоянии коммутационного оборудования, а также измерениях, выполненных в различных точках сети. Таким образом, может предусматриваться автоматический анализ базы данных Единой информационной модели для построения матрицы инцидентов, использование данных SCD – для выявления отслеживаемых измерений и состояний коммутационных аппаратов.

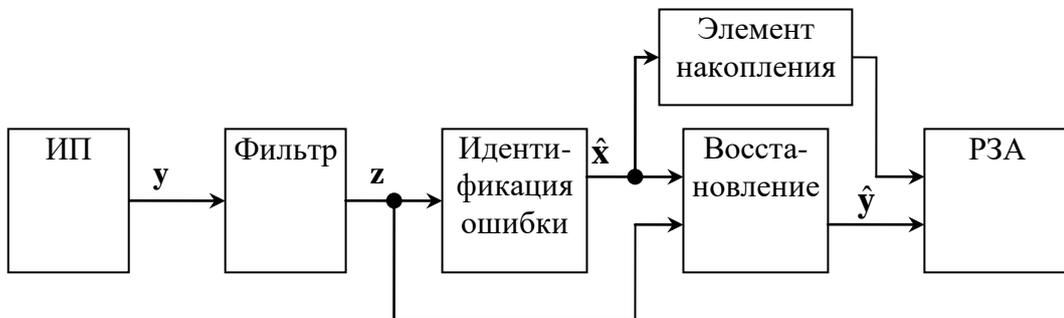


Рисунок 2.5 – Схема преобразований при восстановлении входной информации

В результате решения основной и дополнительной диагностических задач устройствам РЗА ЛЭП могут предоставляться как дискретные сигналы неисправности соответствующих измерительных цепей, так и верифицированные и восстановленные измерения. На цифровой подстанции измерения распространяются с соответствующим признаком качества. Использование верифицированной информации позволяет повысить надежность работы РЗА.

Схема функционирования такой системы автоматизации показана на рисунке 2.6 с разделением процессов на реальное и отложенное время. Требуется предварительная конфигурация алгоритма верификации и восстановления информации в качестве логического устройства – приемника данных от первичных ИП и источника соответствующих данных для РЗА

ЛЭП на подстанции.

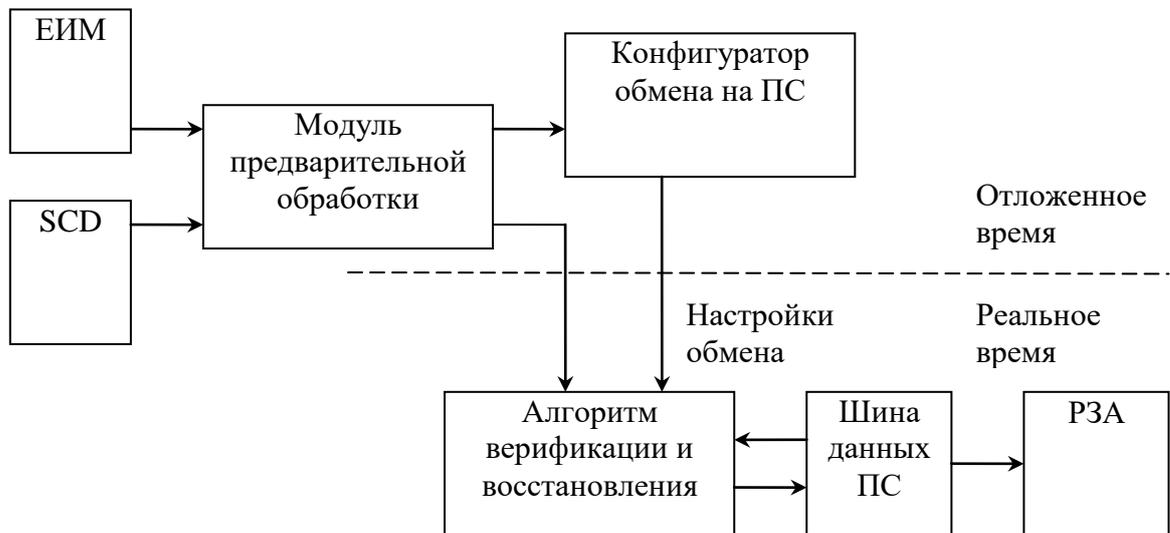


Рисунок 2.6 – Схема функционирования верификации и восстановления информации в рамках системы автоматизации подстанции

Таким образом, предложенный метод диагностики и восстановления может быть частью системы автоматизации и автоматически адаптируется под изменения на подстанции.

2.3 Разработка методов передачи информации об измерениях на подстанции и между подстанциями

2.3.1 Повышение информированности защиты и автоматики за счет применения расширенного профиля передачи мгновенных значений аналоговых сигналов для дифференциальной защиты линии

Электрические сети развиваются по пути оптимизации и унификации технических решений. Совершенствуется информационная и телекоммуникационная инфраструктура, развивается автоматизация процессов передачи и распределения электрической энергии [161]. Вводятся и уточняются отраслевые стандарты в области цифровых подстанций.

Интерфейсы межподстанционного обмена продольной дифференциальной защиты линии (ДЗЛ), применяемой в сетях всех классов напряжения, долгое время остаются в стороне от этой трансформации. С одной стороны, терминалы с функцией ДЗЛ уже реализуют обмен цифровой информацией по цифровым каналам связи. С другой стороны, дифференциальный принцип выставляет к каналам связи намного более высокие требования, чем обмен устройств релейной защиты и автоматики на подстанции между собой (горизонтальные связи) и с автоматизированными системами управления и сбора информации.

Для ДЗЛ требуется долговременная стабильная связь между подстанциями с заранее определенными характеристиками. На практике каналы организуют по выделенным оптическим волокнам или с использованием синхронной сети мультиплексоров. Обмен между полуккомплектами ДЗЛ и оборудованием связи выполняют в соответствии с международным стандартом IEEE C37.94 [203].

Стандарт IEEE C37.94 описывает протокол передачи и физический уровень интерфейса связи. Преобразователь стандарта IEEE C37.94 в протоколы для оборудования связи представляет собой либо составной модуль мультиплексора, либо отдельное устройство, которое фактически обеспечивает совместимость технологий РЗА и систем связи (рисунок 2.7).



Рисунок 2.7 – Архитектура связи с использованием интерфейса IEEE C37.94

Существующие преобразователи вносят приемлемую задержку в канал связи между полуккомплектами. Принято дублировать каналы связи и обеспечивать бесшовное переключение ДЗЛ на резервные маршруты

передачи информации. Все эти меры гарантируют малую вариацию задержки в канале связи во время работы защиты.

В настоящее время в системах связи наблюдается тенденция замены синхронных интерфейсов на протоколы пакетной передачи данных, в том числе в промышленных вычислительных сетях электроэнергетики. Однако такие принципы связи повышают неопределенность величины задержки в канале, а потому появились гибридные решения. Синхронные каналы могут успешно имитироваться такими технологиями, как MPLS (multi-protocol label switching, многопротокольная коммутация по меткам). Адаптация этих технологий для ДЗЛ требует разработки совершенно новых преобразователей IEEE C37.94 и накладывает ограничения на общую пропускную способность сети связи [204]. Вместе с тем подход является универсальным и обеспечивает максимальную продолжительность жизненного цикла устройств РЗА вне зависимости от оборудования связи. В то же время существуют другие технологии, позволяющие передавать информацию, необходимую для ДЗЛ, в сетях Ethernet. Например, распространена передача пакетов Sampled Values (SV, МЭК 61850-9-2), содержащих данные о мгновенных значениях аналоговых сигналов, дискретизация которых синхронизирована с астрономическим временем [205]. Принцип использования SV в локальных сетях был продемонстрирован во многих пилотных и коммерческих проектах цифровых подстанций [206]. Передаваемых данных достаточно для дифференциального алгоритма в составе защиты, однако на практике надежность меток времени, установленных серверами времени на разных подстанциях, вызывает вопросы [207]. Необходимо техническое решение, которое будет обеспечивать автономность системы защиты. Поэтому автором предложен общий формат передачи критичных по времени данных для устройств защиты по сети Ethernet, обеспечивающий независимую синхронизацию времени полукomплектов ДЗЛ.

Современные устройства ДЗЛ обмениваются следующими видами информации:

- величины токов и напряжений,
- пользовательские дискретные сигналы,
- проприетарные сигналы состояния,
- информация для синхронизации времени.

Величины токов и напряжений должны быть предпочтительно представлены в виде выборок токов и напряжений с частотой дискретизации 1000 Гц и более [208]. Каждая выборка должна быть точно соотнесена с абсолютным (астрономическим) или относительным (для терминала) временем. Информация о синхронизации должна быть достаточной для ассоциации текущего времени терминала и времени измерения. Пользовательские сигналы – дополнительный сервис, предоставляемый устройствами ДЗЛ, дублирующий и расширяющий функционал систем сбора и передачи информации.

Рассмотрим протоколы и схемы передачи данных, обеспечивающие необходимые виды и качество информации в полуконструкциях ДЗЛ. Предполагается, что пользовательские дискретные сигналы в сетях пакетной передачи данных могут передаваться по протоколам GOOSE (МЭК 61850-8-1) или R-GOOSE (МЭК 61850-90-5). Для этих данных важна надежность, тогда как допустимая задержка в передаче информации может достигать 10-20 мс [208]. Для передачи аналоговых сигналов в работе предложен модифицированный, расширенный по функциональности механизм SV, названный E-SV. Используются следующие свойства механизмов SV:

- измерение, синхронизированное с тактами локального сервера точного времени;
- способ кодирования аналоговой информации в пакете.

E-SV – механизм двунаправленной связи типа «точка-точка» двух абонентов (устройств РЗА) в сети Ethernet. Пакеты E-SV, помимо непосредственно отсчетов токов и напряжений, содержат информацию об относительном времени, которая позволяет определять смещение моментов замера отсчетов аналоговых сигналов относительно времени второго абонента, а также сигналы диагностики информационного обмена. Абоненты используют элементы механизма и допущения «эхо»-метода для определения меток времени [209]: маршрут и время доставки пакетов в обоих направлениях одинаковые.

Возможные схемы с различным распределением функций между устройствами показаны на рисунках 2.8 и 2.9. В схеме «2-2» по рисунку 2.8 устройство защиты опрашивает оба устройства измерения и, тем самым, получает возможность синхронизировать между собой аналоговые сигналы обоих концов линии. Предполагается, что для связи E-SV используются выделенные порты устройств. Такое разделение сетей SV (не используются для алгоритма ДЗЛ) и E-SV необходимо для разделения требований к сетевому оборудованию внутри и между подстанциями и обеспечения естественного приоритета трафика. В этой схеме устройства ДЗЛ находятся в одной информационной сети, но обмен данными между собой не производят. Это дает дополнительное преимущество схеме в части резервирования действия защиты, однако возможно и упрощение схемы до одного полукомплекта ДЗЛ с реализацией команд отключения удаленного конца.

В схеме «1-1» по рисунку 2.9 устройства измерения и устройства защиты синхронизированы от локальных серверов времени на подстанции. Устройства защиты получают локальные аналоговые измерения по технологии SV, а удаленные – по технологии E-SV. Синхронизация данных разных подстанций производится внутри устройства ДЗЛ. Преимуществом схемы является замыкание требований E-SV в рамках устройств защиты.

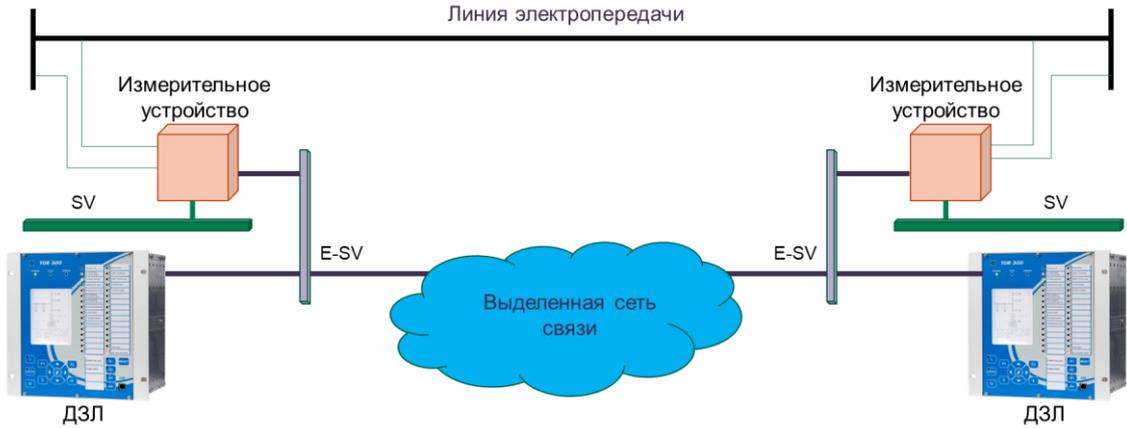


Рисунок 2.8 – Архитектура связи «2-2» с использованием E-SV

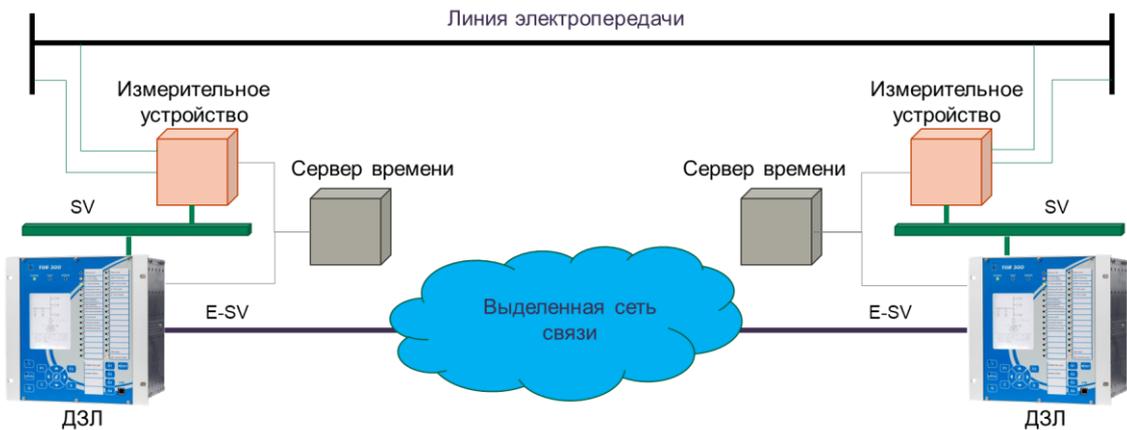


Рисунок 2.9 – Архитектура связи «1-1» с использованием E-SV

Предложенные схемы обладают высокой степенью автономности, поскольку потеря сигналов синхронизации серверов точного времени и устройств измерения с глобальным временем не приводит к мгновенному отказу или излишнему действию ДЗЛ. Система продолжает функционировать на основе стабильного относительного времени каждого ее элемента. Система оказывается также нечувствительной к малым отклонениям и к скользящим в службах времени отдельных компонентов, так как протокол E-SV позволяет рассчитывать на краткосрочную (на каждом интервале в пределах нескольких секунд) стабильность их внутренних таймеров.

Каждая из представленных схем может использоваться для поэтапного внедрения цифровых решений на подстанциях электрической

сети. Предположим, что первая подстанция реализует все технологии цифровой подстанции (архитектура 3 в понимании ПАО «Россети» [210]), а вторая подстанция использует аналоговые технологии измерения. Тогда на второй подстанции необходимо установить сравнительно небольшой объем оборудования:

для схемы «2-2»:

- измерительное устройство,
- каналобразующее оборудование для сети E-SV,
- полукомплект ДЗЛ (опционально);

для схемы «1-1»:

- измерительное устройство,
- каналобразующее оборудование для сети E-SV,
- полукомплект ДЗЛ,
- каналобразующее оборудование для сети SV (шина процесса) (опционально),
- оборудование для синхронизации времени.

Как видно, схема «2-2» имеет преимущества по количеству оборудования при поэтапной цифровизации сети. Потенциально полукомплект ДЗЛ может реализовывать собственные измерения тока и напряжения аналогично традиционным решениям, что упрощает вариант «1-1», хотя это и не снижает стоимость последующей «цифровизации» второй подстанции.

Проведем оценку требований к пропускной способности каналов связи. Для выполнения функции ДЗЛ измерение на каждой подстанции должно производиться с частотой дискретизации от 2 до 4 кГц (здесь и далее рассматривается сеть с промышленной частотой 50 Гц). Обмен информацией между подстанциями достаточно производить с частотой дискретизации данных не более 1 кГц, что означает использование не более 0,5 Мбит/с на

один комплект токов или напряжений. Включенный объем дополнительной информации для синхронизации по таблице 2.6 не превышает 50% от объема передаваемых в цифровой форме аналоговых данных.

Таблица 2.6 – Информация для синхронизации времени в пакете

№	Назначение поля
1	Номер пакета
2	Номер последнего полученного пакета
3	Метка времени замера отсчетов
4	Метка времени отправки пакета
5	Метка времени последнего приема пакета от удаленного устройства

Предложенная система синхронизации данных двух подстанций представляется работоспособной, если загрузка сети невысока, пропускная способность канала связи составляет не менее 10 Гбит/с, а также возможно настроить приоритеты обработки различных видов трафика [211]. Один и тот же сегмент связи может использоваться как часть маршрута связи до десяти комплектов ДЗЛ. Это свойство технологии E-SV окажется полезным в регионах с высокой концентрацией электрических сетей, например, в мегаполисах.

Полукомплекты ДЗЛ должны выполнять постоянную автоматическую диагностику качества каналов связи, наблюдая стабильность периода пакетов E-SV. Если отклонение значительное, полукомплекты могут блокировать расчет дифференциального органа и ожидать восстановления характеристик связи.

Таким образом, технология E-SV может быть оформлена в виде открытого стандарта и реализована в измерительных устройствах и в терминалах защиты различных производителей. Это повысит гибкость в

развитии и цифровизации электрической и информационной сетей. Однако эксплуатация «смешанных» ДЗЛ от разных производителей может столкнуться со следующими эффектами, ранее не характерными для традиционных ДЗЛ:

- Различная чувствительность и быстродействие полуккомплектов ДЗЛ, установленных на разных концах линии электропередачи.

- Необходимость согласования работы полуккомплектов защиты на этапе проектирования за счет перекрестного отключения (отключения удаленного конца линии).

- Усложнение процесса испытаний полной схемы ДЗЛ.

Тем не менее, переход на пакетную передачу данных будет означать применение наиболее современных технических решений в области коммуникаций и увеличенный срок службы технических решений защиты ЛЭП (совпадение с трендом развития связи).

2.3.2 Исследование различных структур коммуникационной среды для дифференциальной защиты многоконцевой линии электропередачи

Развитие электрических сетей и изменение структуры потребителей приводит к появлению многоконцевых ЛЭП. Рассмотрим объекты из трех сходящихся «звездой» сегментов линий, оканчивающихся на подстанциях ПС1, ПС2, ПС3, где выполнена защита этой линии с использованием устройств РЗА и высоковольтных выключателей. Часто питание ЛЭП может осуществляться с каждого ее конца (рисунок 2.10). В дополнение к трем наблюдаемым концам линии структура может включать и ответвления на подстанции, выполненные по упрощенной схеме для питания нагрузки.

Дифференциальный принцип эффективен для защиты многоконцевых линий электропередачи и имеет преимущество перед ступенчатыми

защитами [212]. Функцию ДЗЛ выполняют взаимосвязанные устройства, измеряющие токи и напряжения по концам линии.

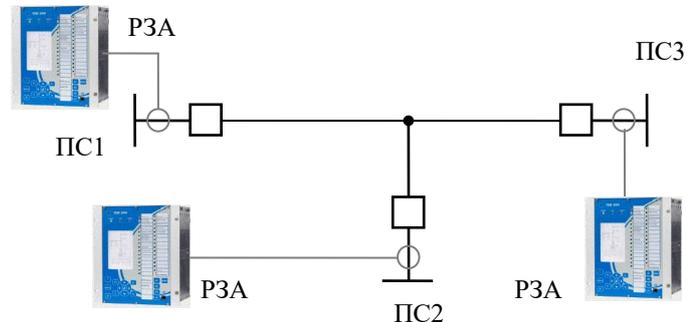


Рисунок 2.10 – Схема многоконцевой линии электропередачи

Схема связи полукомплектов ДЗЛ во многом зависит от заложенного в устройстве РЗА алгоритма функционирования. Можно выделить защиты с централизованным принятием решения, в которых вся информация собирается в одном вычислительном блоке, а результат работы измерительных органов рассылается в терминалы всех концов линии [213]. Другая группа защит собирает информацию и производит эквивалентный расчет величины дифференциальных токов и работы измерительных органов в каждом терминале ДЗЛ. По способу передачи информации различают терминалы с ретрансляцией информации между портами связи и с обменом «точка-точка». В дальнейшем сосредоточим внимание на равноправных алгоритмах с эквивалентным расчетом и обменом информацией по схеме «точка-точка», реализованных в большинстве современных терминалов защиты ЛЭП, например, в [208]. Учтем, что устройство располагает двумя портами связи, которые могут функционировать в режиме резервирования, а синхронизация измерений выполняется «эхо»-методом с использованием каналов связи.

На практике связь осуществляется по прямому оптическому каналу (выделенные волокна) и мультиплексированным синхронным каналам, обеспечивающим быстрый и надежный обмен данными между устройствами

защиты. При этом информационный обмен между полукомплектами ДЗЛ и оборудованием связи выполняют по международному стандарту IEEE C37.94 [203]. Принято дублировать каналы связи и обеспечивать бесшовное переключение ДЗЛ на резервные маршруты передачи информации. Основные схемы связи полукомплектов – централизованные, кольцевые и децентрализованные. В литературе [204,213] описано применение отдельных видов схем и дана их характеристика. В последнее время с развитием технологий связи в энергетике спектр возможностей для использования в ДЗЛ значительно расширился. В работе рассмотрено применение схем связи для трехтерминальной дифференциальной защиты линии, уделено внимание настройке сетей связи и надежности их функционирования.

Централизованная схема связи предполагает подключение каждого из устройств релейной защиты (ДЗЛ) к центральному мультиплексу (MUX) по двум каналам связи с постоянным резервированием (рисунок 2.11). При резервировании центрального мультиплекса каждое из устройств релейной защиты подключается по одному каналу связи к первому мультиплексу, по другому каналу – ко второму (рисунок 2.12). Возможно как непосредственное подключение устройств релейной защиты к мультиплексорам, поддерживающим стандарт IEEE C37.94, так и использование дополнительных преобразователей протокола, например, в ITU-T G.703/G.704 2048 кбит/с (E1). В мультиплексе настраиваются пути передачи данных для каждого подключенного канала связи. Настройка оборудования выполняется с резервированием: каждый физический интерфейс (порт) терминала используется для связи с обоими удаленными полукомплектами. Мультиплексор играет роль единого источника тактирования связи и распределителя информации. Из пакетов данных, полученных от терминала, выделяются фрагменты для различных получателей. Фрагменты данных от различных источников объединяются в один пакет и отправляются в терминал по выбранному каналу связи

(рисунок 2.11). Здесь и далее на рисунках показан обмен данными только для расчета в одном терминале, тогда как симметрично выполняются связь и расчет на всех концах линии.

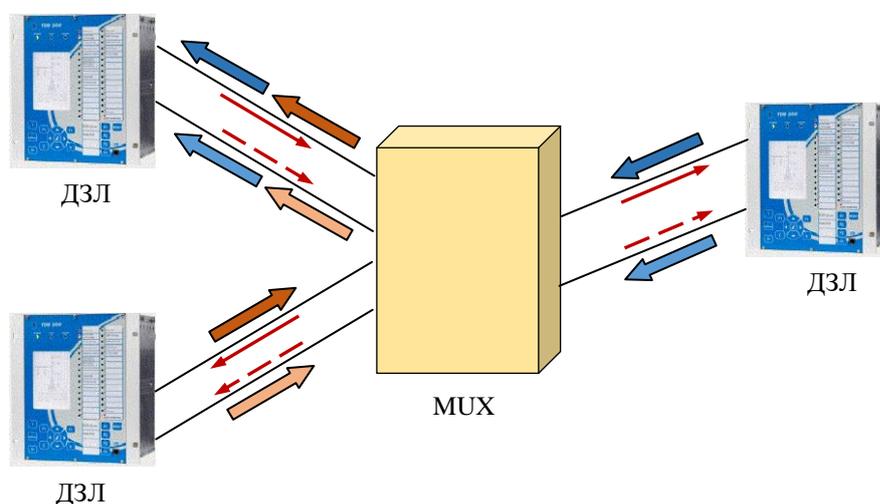


Рисунок 2.11 – Централизованная схема связи без резервирования центрального мультиплексора (Ц1)

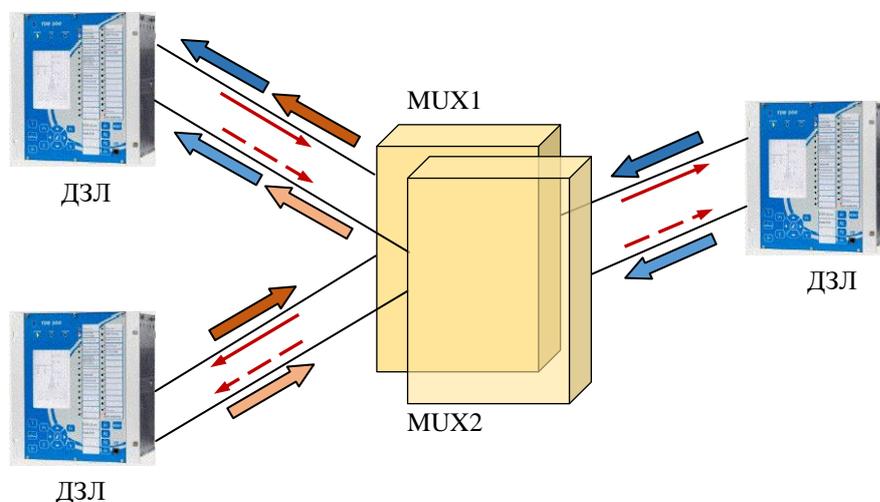


Рисунок 2.12 – Централизованная схема связи с резервированием центрального мультиплексора (Ц2)

При использовании фиксированных путей передачи данных централизованная схема разделяется на две сети обмена данными. На рисунках показан вариант, когда одна из сетей использует первый порт каждого терминала, другая – второй порт.

Централизованная схема сохраняет работоспособность при частичном

отказе одной из двух сетей обмена данными (от одного до трех поврежденных каналов), а также при отказе одного канала связи в каждой информационной сети.

Недостатками централизованной схемы являются сложность настройки центрального мультиплексора, использование выделенных каналов связи между каждым терминалом и мультиплексором (т.е. между подстанциями), высокие требования к отказоустойчивости центрального мультиплексора в варианте схемы без его резервирования. Кроме того, целесообразно оценить и процедуру последовательного ввода концов линии электропередачи (а значит, и комплектов защиты) в эксплуатацию. Централизованная схема будет требовать перенастройку таблицы маршрутизации мультиплексоров при вводе линии двумя, а затем и тремя концами.

Для отказа от выделенных каналов связи между подстанциями применяют кольцевую схему. Мультиплексоры, расположенные на разных подстанциях, объединяют в кольцо и настраивают ретрансляцию необходимых данных. Каждое устройство релейной защиты подключается к своему мультиплексору по двум каналам связи с постоянным резервированием (рисунок 2.13). Для дополнительного резервирования сети передачи данных используются два независимых кольца мультиплексоров, каждое из устройств релейной защиты подключается по одному каналу связи к первому мультиплексору, по другому каналу – ко второму (рисунок 2.14). Эта схема позволяет реализовать различные маршруты передачи данных разных каналов. Тем не менее, автоматическое переключение маршрутов в мультиплексорах для каналов РЗА нежелательно по причине нарушения условий синхронизации и снижения коэффициента готовности защиты [204].

Устойчивость кольцевой схемы к отказам во многом соответствует централизованной схеме. Кольцевая схема также сохраняет работоспособность при отказе одного канала связи между мультиплексорами

в варианте схемы без их резервирования.

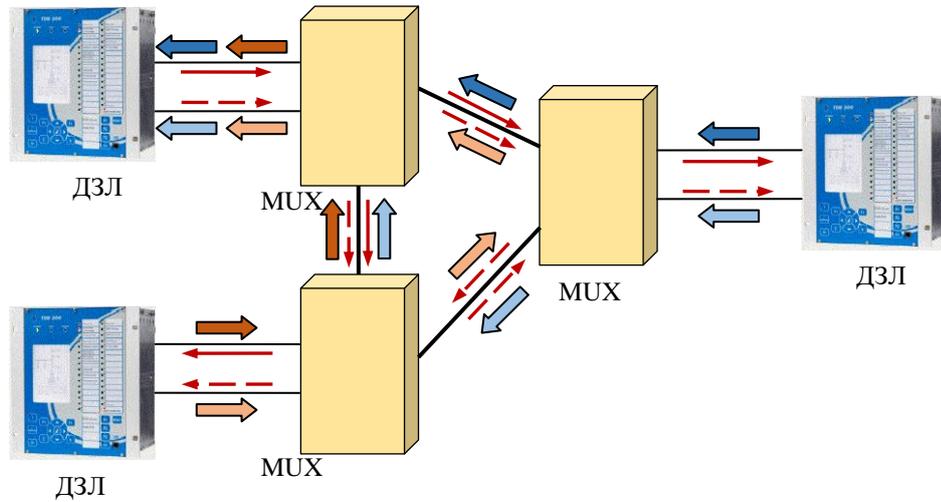


Рисунок 2.13 – Кольцевая схема связи без резервирования мультиплексов (K1)

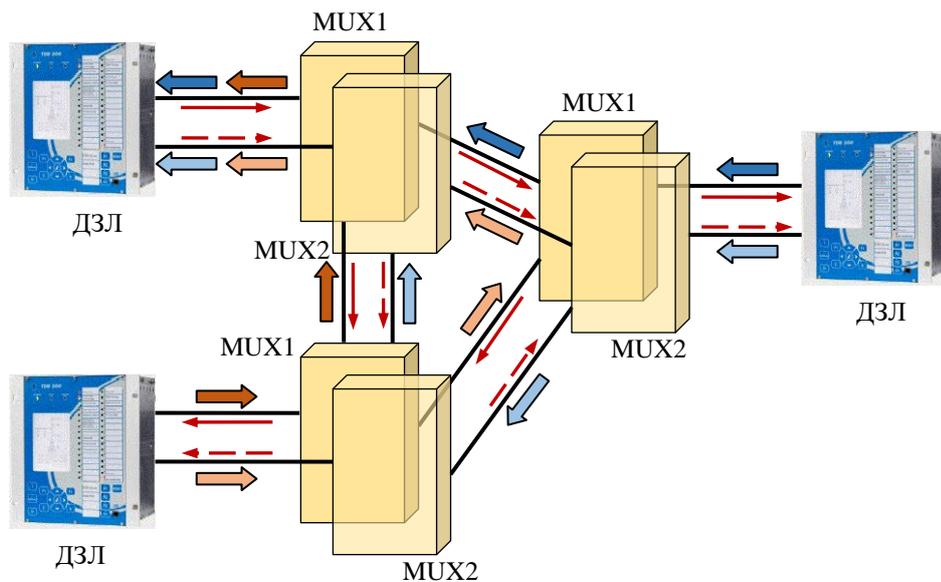


Рисунок 2.14 – Кольцевая схема связи с резервированием сети передачи данных (K2)

Недостатками кольцевой схемы являются сложность настройки мультиплексов, высокие требования к отказоустойчивости мультиплексов в варианте схемы без их резервирования.

Линейная схема связи предполагает последовательное соединение мультиплексов, к каждому из которых подключено устройство ДЗЛ

(рисунок 2.15). В проектах используется линейная схема без резервирования: каждый физический интерфейс (порт) терминала предназначен для связи с одним из удаленных полукомплектов.

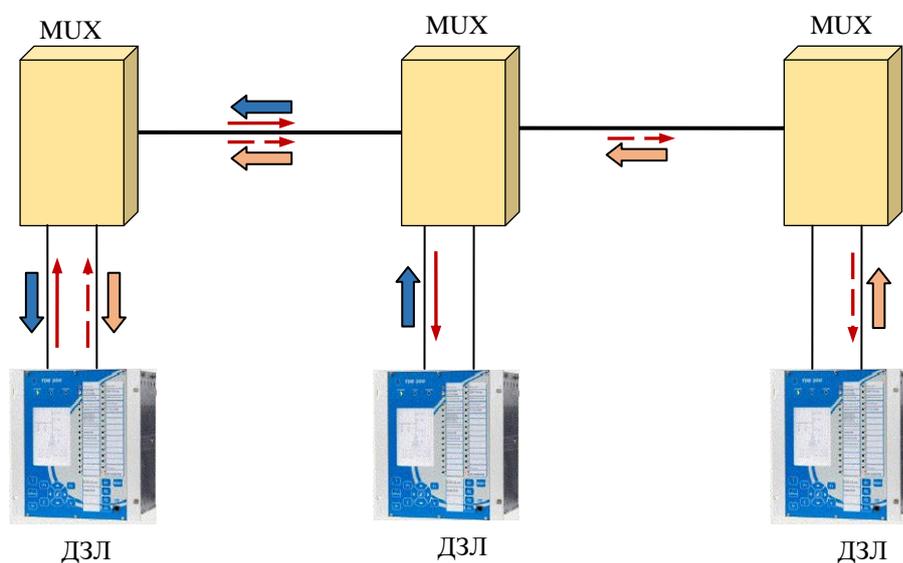


Рисунок 2.15 – Линейная схема связи (Л)

Линейная схема сохраняет работоспособность при отказе одного канала связи между терминалом и мультиплексором, однако не обеспечивает живучесть ни при отказе мультиплексоров, ни при обрыве каналов связи между ними. Таким образом, недостатком линейной схемы является низкая отказоустойчивость.

Рекомендуется преобразование линейной схемы связи в кольцевую путем соединения крайних мультиплексоров дополнительным каналом связи и соответствующей настройкой оборудования.

Децентрализованная схема предполагает соединение каждой пары устройств релейной защиты «точка-точка» по выделенным оптическим линиям (рисунок 2.16). Для связи с каждым удаленным полукомплектом используется один из двух портов устройства. Эта схема не обеспечивает резервирование каналов связи, но сохраняет работоспособность при отказе одного канала связи за счет эквивалентного расчета в каждом

полукомплекте.

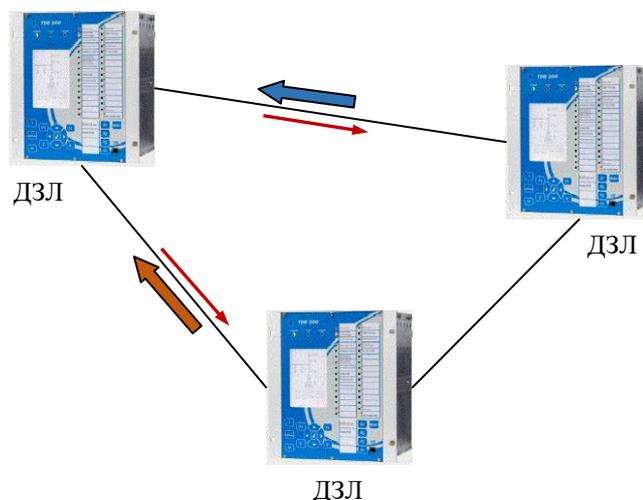


Рисунок 2.16 – Децентрализованная схема связи (Д)

Недостатком децентрализованной схемы является использование выделенных каналов связи между каждой парой терминалов. Данная схема использует минимальное количество оборудования и максимально упрощает наладку связи между каждой парой терминалов.

Для проверки изложенных свойств схем связи собран лабораторный стенд с использованием разработанных при участии автора терминалов дифференциальной защиты ЛЭП типа ТОР 300 ДЗЛ, выпускаемых серийно в ООО «Релематика» (ранее ООО «Исследовательский центр «Бреслер», г.Чебоксары). Используются серийные модели мультиплексоров. Получено, что минимальные задержки в каналах связи обеспечивает децентрализованная схема, максимальные – кольцевая схема, соответственно увеличиваются и времена срабатывания ДЗЛ. Устойчивость схем к отказам элементов сети связи каждого типа показана в таблице 2.7 в виде двух чисел x/y , где x – число однотипных элементов, одновременный отказ которых не приводит к отказу ДЗЛ, а y – общее число элементов данного типа в сети связи.

В схемах с использованием мультиплексоров (централизованная,

кольцевая и линейная) контролировать асимметрию времени передачи данных между терминалами в прямом и обратном направлениях затруднительно, что приводит к фактическому увеличению измеряемых дифференциальных токов. Поэтому в указанных схемах уставку минимального дифференциального тока срабатывания ДЗЛ увеличивают.

Таблица 2.7 – Устойчивость схем связи к отказам элементов сети

Вид неисправности	Схема					
	Ц1	Ц2	К1	К2	Л	Д
Связь между подстанциями	2/4	2/4	1/3	3/6	0/2	1/3
Связь терминала с мультиплексором на одной подстанции	1/2	1/2	3/6	3/6	1/6	0/0
Мультиплексор	0/1	1/2	0/3	3/6	0/3	0/0

Таким образом, в результате анализа и испытания схем связи полукомплектов дифференциальной защиты подтверждено, что независимая реализация каналов связи в устройствах и мультиплексорах обеспечивает наивысшую надежность защиты.

2.4 Выводы

1. В условиях распространения цифровых технологий в комплексах ЛЭП и электрических подстанций возникает необходимость достоверизации входной информации устройств РЗА. Поставлена задача пространственно-временной обработки измерений.

2. Изложены методы, позволяющие выявлять и устранять ошибку в измерениях на цифровой подстанции. Предложенный метод эффективно связывает измерения токов, напряжений и дискретную информацию о

положении коммутационных аппаратов для автоматизации анализа качества входной информации РЗА. Метод позволяет выявлять состояние ошибки измерения, идентифицировать ошибочную информацию и восстанавливать потерянные данные. Показано, как различное использование информации о дублировании измерений влияет на распознающую способность методов. На этой основе производится оптимизация инфраструктуры цифровой подстанции, в отдельных схемах обеспечивая экономию измерительных преобразователей до 30-50%.

3. Исследован и предложен инструментарий для передачи данных РЗА между подстанциями, обеспечивающий независимость от глобальных спутниковых систем синхронизации времени и надежность передачи информации при повреждении отдельных элементов связи. Лабораторные испытания дифференциальной защиты многоконцевых ЛЭП выявили наиболее отказоустойчивые схемы РЗА и связи.

Глава 3 Исследование и разработка схем защиты и автоматики линий электропередачи в аварийных и нестационарных режимах

3.1 Новые подходы к автоматике ликвидации асинхронного режима на основе алгоритмической модели в мгновенных значениях

3.1.1 Разработка каскадной алгоритмической модели линии электропередачи

Ранее отмечена важность преобразования входных данных для распознавания режимов наблюдаемого объекта. Цифровые устройства РЗА ЛЭП получают информацию о токах и напряжениях в виде множества мгновенных значений, квантованных во времени с заданной частотой дискретизации. В модулях аналогово-цифрового преобразования производится квантование значений электрических величин и по уровню. В результате входную информацию можно рассматривать как ряд отсчетов токов и напряжений, накапливаемых устройством РЗА. Наиболее распространены алгоритмы обработки информации с выделением составляющих основной гармоники [214-216], однако они имеют существенную задержку в обработке информации [217]. Ортогональные составляющие основной частоты могут использоваться совместно с алгоритмическими моделями [218-221], которые выделяют факт значимых структурных изменений в объекте, что может являться признаком повреждения. Аналогичные модели использованы и в [222] для выявления асинхронного режима, сопровождающегося определенными соотношениями величин на концах контролируемого участка электропередачи.

ЛЭП является стационарным объектом, однако РЗА, устанавливаемая

на ЛЭП, должна учитывать и особенности функционирования примыкающих к ЛЭП частей энергосистемы. Изменение режимных параметров во времени ограничивает применение частотных методов расчета схем замещения и, соответственно, характеристики преобразования входных данных в пространство замеров РЗА.

В настоящей работе предложена реализация пространственно-временной обработки сигналов применительно к измерительным органам АЛАР, построенным на алгоритмической модели объекта в базисе мгновенных величин.

Алгоритмическое моделирование предполагает расчет электрических величин в заданной точке сети на основе определенного набора измерений. Так, для RL-модели ЛЭП, представленной на рисунке 3.1, известны уравнения для величин в дискретном времени k :

$$\begin{cases} u_2(k) = u_1(k) - i_1(k) \cdot R - Li_1'(k); \\ i_2(k) = i_1(k). \end{cases} \quad (3.1)$$

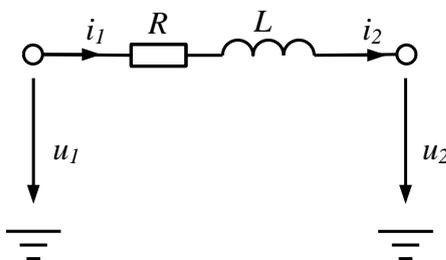


Рисунок 3.1 – RL-модель линии электропередачи

Уравнения (3.1) могут быть использованы для вычисления напряжения u_2 и тока i_2 по известным значениям напряжения u_1 , тока i_1 и производной тока i_1' . Известные способы расчета цепи на основе разностных уравнений [223,224] связывают шаг расчета с временем пробега волны по участку ЛЭП. Это приводит к неоправданно высокой частоте дискретизации входных сигналов для ЛЭП 110-220 кВ, разделенных на участки

однородности. Один из способов расчета производной тока по времени i_1' связан с численным дифференцированием. Производную тока будем определять с применением разностных уравнений [225]. Выбор порядка разностного уравнения определяется балансом между необходимой точностью оценки производной и возможной задержкой расчета. Чем выше порядок производной (и больше ширина окна расчета), тем меньше погрешность расчета. Например, используем центральное разностное уравнение функции $i(t)$ порядка $N = 2$ с шириной окна в 3 отсчета

$$i'(t_0) \approx \frac{i(t_0 + h) - i(t_0 - h)}{2h}, \quad (3.2)$$

где h – величина шага дискретизации.

На точность определения производной влияет наличие таких факторов, как шумы, изменение структуры сигнала (и режимов электрической сети), выбросы и дискретность аналогово-цифрового преобразования. Исследования показали, что наиболее чувствительны к наличию шумов разностные уравнения вида

$$i_1'(k) = f(i_1(k), i_1(k-1) \dots i_1(k-N)), \quad (3.3)$$

в которых производится оценка отсчета k со смещением относительно центра окна наблюдения. Для применения выбраны центральные разностные уравнения типа

$$i_1'(k) = f(i_1(k + N/2), \dots, i_1(k+1), i_1(k), i_1(k-1), \dots, i_1(k - N/2))). \quad (3.4)$$

Однако уравнения вида (3.4) задерживают расчет на $N/2$ шагов дискретизации. Поэтому при выборе типа разностного уравнения необходимо учитывать допустимую задержку на расчет и точность расчета, а также режимы, в которых будет производиться моделирование.

Непосредственную формулу расчета производной определяют с использованием формул Гаусса, Бесселя, Стирлинга и других [225]. На

рисунке 3.2 показана зависимость погрешности оценки напряжения u_2 по уравнениям (3.1)(1.1) от порядка N . При использовании производной порядка m ее в общем случае определяют порядком правильности конечных разностей, находя минимальное m , удовлетворяющее неравенству при заданной погрешности ε [226]:

$$h^{m+1}M_{m+1} \leq \varepsilon; M_v = \max |i^{(v)}(t)|, t \in [t(k); t(k+N)]. \quad (3.5)$$

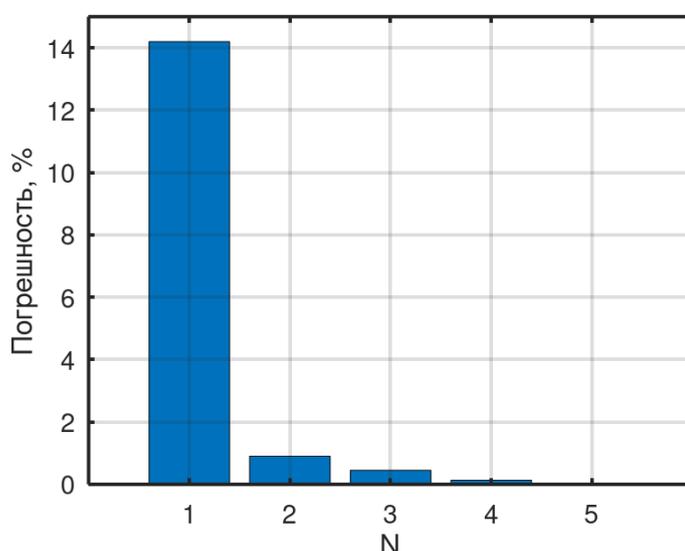


Рисунок 3.2 – Относительная погрешность оценки напряжения

Для центральной производной при $N = 4$ оценка погрешности пропорциональна пятой производной исходной функции [225]:

$$R = \frac{h^4}{30} M^V, \quad (3.6)$$

что подтверждают результаты моделирования на рисунке 3.2.

Если ЛЭП имеет значительную протяженность, в модели необходимо учесть поперечную емкостную проводимость. На рисунке 3.3 представлена П-образная (RLC) модель линии.

Добавление в схему элементов емкости означает отбор тока, вычисление которого основано на производной напряжения в

соответствующем узле по времени:

$$i_C(k) = Cu'(k). \quad (3.7)$$

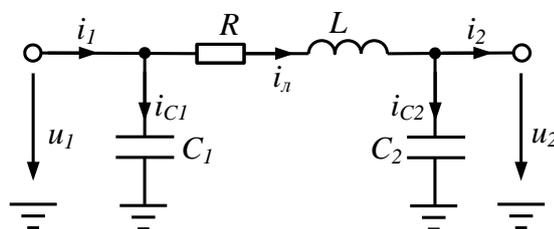


Рисунок 3.3 – RLC-модель линии электропередачи

Таким образом, с применением численной производной уравнения (3.1) и (3.7) приводят к системе линейных уравнений, что дает возможность применять их в алгоритмах реального времени устройств РЗА.

Модель элементарного звена представляет собой четырехполюсник, описываемый матричным уравнением в форме \mathbf{B} , связывающим величины места наблюдения момента времени $t(l)$ и величины точки расчета момента времени $t(k)$:

$$\begin{bmatrix} u_2(k) \\ i_2(k) \end{bmatrix} = \mathbf{B}_{12} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{U}_1(l) \\ \mathbf{I}_1(l) \end{bmatrix}. \quad (3.8)$$

В качестве примера продемонстрируем элементы уравнения (3.8):

$$\begin{bmatrix} u_2(k) \\ i_2(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_{12,11} & \mathbf{B}_{12,12} \\ \mathbf{B}_{12,21} & \mathbf{B}_{12,22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{U}_1(k) \\ \mathbf{I}_1(k) \end{bmatrix}, \quad (3.9)$$

где векторы напряжений и токов

$$\mathbf{U}_1(k) = \begin{bmatrix} u_1(k+1) \\ u_1(k) \\ u_1(k-1) \end{bmatrix}; \quad \mathbf{I}_1(k) = \begin{bmatrix} i_1(k+1) \\ i_1(k) \\ i_1(k-1) \end{bmatrix}.$$

Если ЛЭП неоднородная, то в расчетах она разбивается на отдельные однородные участки (рисунок 3.4). Модель каждого участка выполняется по описанному выше алгоритму. В работе предложен метод каскадных

алгоритмических моделей. Особенностью метода является представление сегмента электрической сети в виде каскадного соединения более простых звеньев – многополюсников (рисунок 3.5).

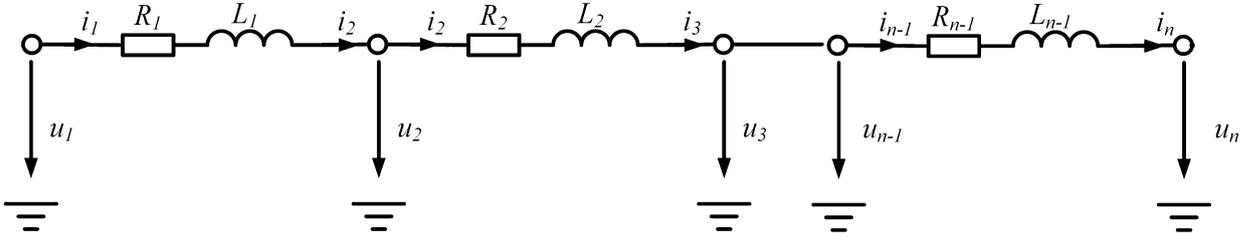


Рисунок 3.4 – Модель неоднородной ЛЭП

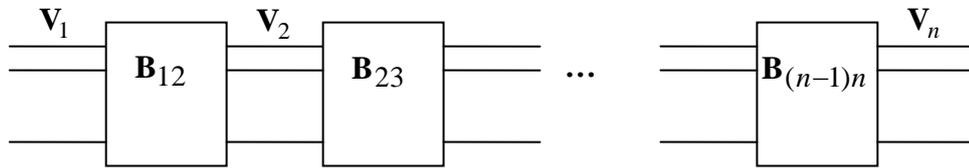


Рисунок 3.5 – Каскадное соединение многополюсников

Отдельные отсчеты напряжений и токов на выводах многополюсника объединим в обобщенный вектор $\mathbf{V}(k)$. Как видно из (3.8), результат расчета $\mathbf{V}_2(k)$ на участке \mathbf{B}_{12} не соответствует $\mathbf{V}_2(k)$, необходимому для расчета $\mathbf{V}_3(k)$ с использованием \mathbf{B}_{23} . Поэтому векторы формируются по рекуррентному алгоритму при переходе через каждый элементарный многополюсник:

$$\mathbf{V}_1^{(n)}(k) = [\mathbf{V}_1^{(n-1)}(k+d), \dots, \mathbf{V}_1^{(n-1)}(k+d-m)]^T, \quad (3.10)$$

где d и m – смещения, определяющие охват выборки для операции численного дифференцирования.

При этом $\mathbf{V}_1^{(0)}(k) = \mathbf{V}_1(k)$. В рассматриваемом примере $d=1$; $m=1$.

Тогда становится возможным сопряжение соседних многополюсников по входам и выходам:

$$\mathbf{V}_1^{(n)}(k) = \mathbf{V}_1^{(n-1)}(l). \quad (3.11)$$

Соответственно формируется и матрица передачи цепи из $(n-1)$ многополюсников:

$$\mathbf{B}_{1(n)} = \mathbf{B}_{(n-1)n} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{B}_{1(n-1)} & 0 & \vdots & 0 \\ 0 & \mathbf{B}_{1(n-1)} & \vdots & 0 \\ \dots & \dots & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mathbf{B}_{1(n-1)} \end{bmatrix}, \quad (3.12)$$

где $\mathbf{B}_{(n-1)n}$ – матрица, описывающая уравнения передачи многополюсника с номером $(n-1)$, находящегося между узлами $(n-1)$ и n .

В результате каскадная модель принимает вид

$$\mathbf{V}_n(k) = \mathbf{B}_{1(n)} \cdot \mathbf{V}_1^{(n)}(l), \quad (3.13)$$

где $\mathbf{V}_1^{(n)}(l)$ и $\mathbf{V}_n(k)$ – векторы мгновенных значений напряжений и токов на входе многополюсника 1 и выходе многополюсника $(n-1)$ соответственно.

Как следствие, величины в оцениваемой точке сети определяются выражением относительно векторов отдельных величин $\mathbf{V}_{1(q)}$ (тока или напряжения), измеренных в точке наблюдения:

$$\mathbf{V}_n(k) = \begin{bmatrix} u_n(k) \\ i_n(k) \end{bmatrix} = \sum_q \mathbf{A}_q^T \mathbf{V}_{1(q)}(k), \quad (3.14)$$

что соответствует линейной реакции модели на каждую из подаваемых в нее величин в виде источников тока и напряжения.

3.1.2 Результаты испытаний каскадных алгоритмических моделей в режиме асинхронного хода

П-образная модель ЛЭП на рисунке 3.3 представляется соединением трех элементарных звеньев, так как содержит три реактивных элемента. Последовательно от «входа» модели к ее «выходу» необходимо решить три дифференциальных уравнения для каждого реактивного элемента. На каждом этапе решения точка замера «сдвигается» на один реактивный элемент ближе к «выходу» модели. Число таких этапов определяет порядок модели. Таким образом, П-образная модель линии электропередачи имеет третий порядок. Аналогично может быть получено описание Т-образной модели ЛЭП.

Выполнен анализ возможностей моделирования сегмента электрической сети на основе измерений с низкой частотой дискретизации от 1 до 4 кГц, характерной для большинства устройств РЗА. Расчеты показали, что П-образная модель обеспечивает самую высокую точность в сравнении с аналогичными как по току δ_{i2} , так и по напряжению δ_{u2} . В таблице 3.1 приведены относительные погрешности моделирования ЛЭП 500 кВ длиной 300 км в стационарном режиме. Результаты получены сравнением с результатами расчета модели линии с распределенными параметрами.

Таблица 3.1 – Сравнение моделей ЛЭП

Тип модели	RL	T	П
$\delta_{i2}, \%$	43,3	0,22	0,036
$\delta_{u2}, \%$	4,9	0,11	0,145

На рисунке 3.6 приведено сравнение осциллограмм асинхронного режима на ЛЭП 500 кВ для моделей различной степени сложности.

Относительная приведенная погрешность получена по выражению:

$$\Delta(a_2) = \frac{|\hat{a}_2 - a_2|}{A_{\text{НОМ}}} \cdot 100\%,$$

где $A_{\text{НОМ}}$ – номинальная амплитудная величина тока или напряжения соответственно;

a_2 – мгновенное значение величины, измеренное в имитационной модели;

\hat{a}_2 – мгновенное значение оценки величины при помощи алгоритмической модели.

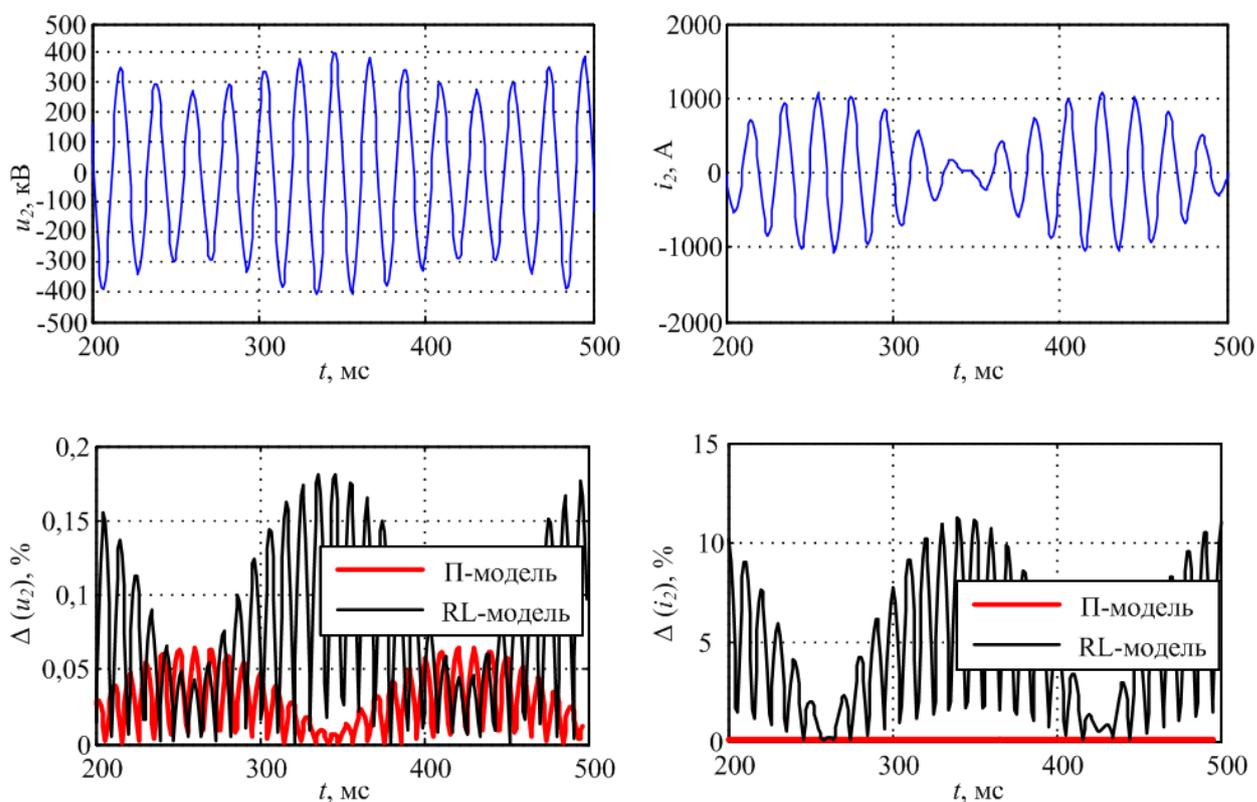


Рисунок 3.6 – Сравнение моделей в базисе мгновенных значений

Осциллограммы погрешностей $\Delta(u_2)$ и $\Delta(i_2)$ подчеркивают преимущества П-модели, особенно в части определения тока i_2 . Погрешности в асинхронных режимах имеют один порядок с погрешностями, наблюдаемыми в нагрузочном (стационарном) режиме, и составляют менее 0,2% по каждой величине. Накопленное запаздывание в

многоступенчатой модели не превышает 2 мс, что значительно ниже запаздывания модели, построенной на основе выделения ортогональных составляющих фильтром Фурье, оцениваемого по результатам численных экспериментов в 16 мс. Угловая погрешность комплексной модели может достигать 12° , что на два порядка больше погрешности разработанной модели.

В соответствии с [227], устройства АЛАР могут устанавливаться и на ЛЭП с промежуточными ответвительными подстанциями. Предложена схема включения ответвления в каскадную алгоритмическую модель. Для этого проводят эквивалентные преобразования параметров нагрузки из последовательной (рисунок 3.7а) в параллельную схему (рисунок 3.7б), а затем заменяют индуктивность эквивалентным элементом с дифференцированием напряжения в соответствии с (3.7) [228]. Такая модель демонстрирует малую погрешность в стационарных режимах на номинальной частоте. При отклонении частоты погрешность возрастает, однако алгоритм сохраняет достаточную точность оценки напряжения u_2 .

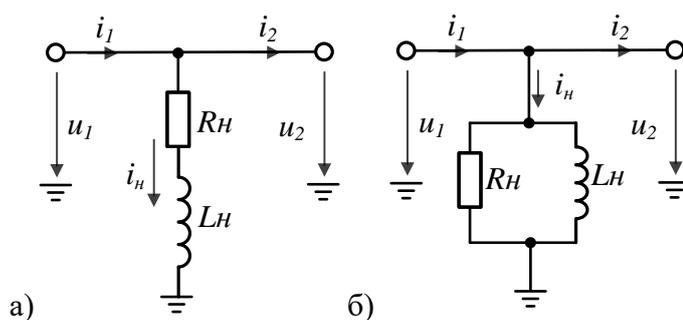


Рисунок 3.7 – Модели ответвления: последовательная (а) и параллельная (б)

Таким образом, модель успешно использована для оценки величин напряжения u_2 и тока i_2 ненаблюдаемого конца ЛЭП для целей АЛАР. Продемонстрированное быстроедействие модели востребовано в связи с изменением структуры электрических сетей и внедрением генерирующих установок малой мощности [229].

Высокие точность и быстродействие модели могут быть использованы и для локализации зоны и места повреждения ЛЭП. Предлагается использовать критерий резистивности повреждения и контролировать его на скользящем временном окне шириной $(2s + 1)$ отсчетов величин u_2 и i_2 в месте предполагаемого повреждения:

$$S(k) = \begin{vmatrix} u_2(k) & i_2(k) & 1 \\ u_2(k-s) & i_2(k-s) & 1 \\ u_2(k-2s) & i_2(k-2s) & 1 \end{vmatrix} \rightarrow \min. \quad (3.15)$$

Формула (3.15) получена на основе анализа годографа обобщенного вектора $[u_2(k), i_2(k)]^T$. Оптимизация $S(k)$ выполняется только по координате повреждения.

3.2 Исследование пусковых органов защиты и автоматики линии электропередачи и разработка методики их настройки

3.2.1 Анализ и эквивалентные преобразования структуры пускового органа по приращению токов

В отечественной практике проектирования дистанционной защиты ЛЭП устоялось использование токовых пусковых органов [2]. В структурной схеме защиты они разрешают действие дистанционного органа в режимах сильных возмущений в энергосистеме. Причем наибольшую эффективность демонстрируют измерительные органы, основанные на приращении прямой и обратной последовательностей токов. Эта схема оказывается чувствительной ко всем видам коротких замыканий, хорошо отстроена от нестационарных режимов (синхронных качаний и асинхронного режима), имеет высокое быстродействие. Сам пусковой орган получил название блокировки при качаниях, хотя фактически выполняет именно разрешающую функцию.

Минимальная величина уставки пускового органа ограничивается небалансом рабочей величины, наблюдаемым в режимах асинхронного хода, синхронных качаний и отклонения частоты сети от номинальной [230,231]. В сетях с ограниченными токами КЗ требуется возможно меньшее значение уставки измерительного органа. Напротив, в сетях сверхвысокого напряжения наблюдается его излишняя чувствительность к внешним КЗ и коммутациям, а значит, уставка может быть повышена. Несмотря на то, что исторически выработанные рекомендации по расчету уставок пускового органа [232,233] применимы к большинству устройств, реализующих алгоритм контроля приращения токов, следует обратить внимание и на алгоритмические отличия [234,235].

Аналогичные измерительные органы нашли применение и в устройствах АЛАР в качестве блокировки при коротких замыканиях. Здесь также наблюдается противостояние нестационарных режимов и короткого замыкания, а срабатывание приводит к прерыванию схемы отслеживания цикла асинхронного режима.

Исследована работа многофазного измерительного органа на основе приращения тока обратной последовательности, реализованного в устройствах серии TOP 300 [235], в условиях электромагнитных и электромеханических переходных процессов на ЛЭП. Для этого решаются задачи описания переходных процессов на входе пускового органа, определения характеристик фильтров, анализа поведения рабочей величины и выработки инженерной методики оценки чувствительности пускового органа. Методические основы решения задачи для однофазных фильтров, представленные в [233,234], обобщены на основе методов пространственно-временной обработки сигналов.

Отслеживаемым режимом (α) измерительного органа является коммутация, а альтернативными (β) являются стационарные режимы и режимы с изменением частоты и фазы источников схемы электропередачи.

При КЗ в электрической системе возникает электромагнитный переходный процесс, сопровождаемый резким изменением принужденной периодической составляющей токов. Одновременно наблюдаются затухающие свободные составляющие переходного процесса. В этих условиях токи фаз представляются моделью, учитывающей наиболее значимые компоненты сигналов:

$$i_v(t) = \sqrt{2}A_{Sv} \sin(\omega t + \varphi_v) + A_{Ev} e^{-t/\tau_v}, \quad (3.16)$$

где A_S – действующее значение периодической составляющей;

ω – частота периодической составляющей;

φ – начальная фаза периодической составляющей;

A_E – амплитуда свободной составляющей;

τ – постоянная времени свободной составляющей;

v – обозначение фазы.

Примем допущение, что предшествующий коммутации режим был синусоидальным, а частота сети постоянна все время наблюдения в начале переходного процесса.

Рассматриваемый пусковой орган [235] рассчитывает приращение тока обратной последовательности с применением фильтра ортогональных составляющих (ФОС), фильтра симметричных составляющих (ФСС) и фильтра аварийных составляющих (ФАС) к дискретным отсчетам измеренных токов фаз ЛЭП $i_v, v = A, B, C$. Структура пускового органа представлена на рисунке 3.8а. Пороговый элемент (ПЭ) сравнивает модуль $|dI_2|$ с уставкой и формирует сигнал пуска.

В рамках обозначенной на рисунке 3.8а схемы фильтры реализуют линейные преобразования входных сигналов в выходные. ФОС и ФАС – нерекурсивные фильтры, а ФСС – безынерционная линейная комбинация входов. Поэтому для удобства оценки свойств измерительного органа

изменим порядок преобразований в соответствии с рисунке 3.8б.

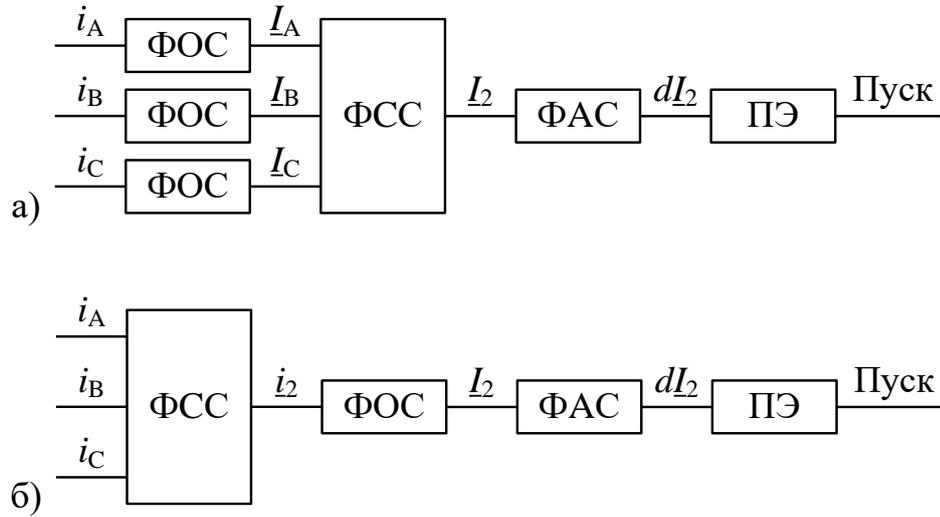


Рисунок 3.8 – Структура пускового органа (а) и его эквивалента (б)

Это соответствует эквивалентным преобразованиям над векторами отсчетов фазных токов \mathbf{i}_A , \mathbf{i}_B , \mathbf{i}_C в рамках окна наблюдения относительно тока I_2 [236] (все фильтры представлены своими векторами коэффициентов):

$$\underline{I}_2 = \underline{\mathbf{M}}_2 \left(\begin{bmatrix} \mathbf{i}_A \\ \mathbf{i}_B \\ \mathbf{i}_C \end{bmatrix} \underline{\mathbf{F}} \right) = \left(\underline{\mathbf{M}}_2 \begin{bmatrix} \mathbf{i}_A \\ \mathbf{i}_B \\ \mathbf{i}_C \end{bmatrix} \right) \underline{\mathbf{F}} = \underline{\mathbf{i}}_2 \underline{\mathbf{F}}, \quad (3.17)$$

где $\underline{\mathbf{M}}_2$ – вектор-строка коэффициентов матрицы Фортескью для обратной последовательности;

$\underline{\mathbf{F}}$ – вектор-столбец коэффициентов фильтра ФОС.

Представим каждый фазный ток суммой векторов на окне фильтра

$$\mathbf{i}_v = \mathbf{i}_{Sv} + \mathbf{i}_{Ev}, \quad (3.18)$$

где \mathbf{i}_{Sv} – отсчеты окна синусоидальной компоненты;

\mathbf{i}_{Ev} – отсчеты окна аperiodической составляющей.

Из (3.17) и (3.18) можно получить

$$\underline{I}_2 = \underline{M}_2 \begin{bmatrix} \mathbf{i}_{SA} + \mathbf{i}_{EA} \\ \mathbf{i}_{SB} + \mathbf{i}_{EB} \\ \mathbf{i}_{SC} + \mathbf{i}_{EC} \end{bmatrix} \underline{\mathbf{F}} = \underline{I}_{S2} + \mathbf{i}_{E2} \underline{\mathbf{F}}. \quad (3.19)$$

Это означает, что измеренное значение складывается из истинной компоненты обратной последовательности \underline{I}_{S2} и компоненты $\mathbf{i}_{E2} \underline{\mathbf{F}}$, связанной с фильтрацией экспоненты в фазных токах. Первая составляющая относится к установившимся режимам электрических цепей и оценивается в процессе расчета уставок. Вклад второй составляющей является предметом дальнейшего исследования.

Можно показать, что каждый отсчет с индексом j вектора \mathbf{i}_{E2} подчиняется неравенству:

$$|\mathbf{i}_{E2j}| \leq \frac{2}{3} \max(|\mathbf{i}_{EAj}|, |\mathbf{i}_{EBj}|, |\mathbf{i}_{ECj}|). \quad (3.20)$$

Доказательство (3.20) сводится к анализу на экстремум функции действительных аргументов a, b, c :

$$f(a, b, c) = a^2 + b^2 + c^2 - ab - bc - ac. \quad (3.21)$$

Величина \mathbf{i}_{E2} зависит от апериодической составляющей в начальный момент времени после коммутации A_{Ev} , которая нуждается в оценке. В соответствии с законами коммутации,

$$|A_{Ev}| \leq \sqrt{2} |\Delta \underline{I}_v|, \quad (3.22)$$

где $\Delta \underline{I}_v = \underline{I}_{\text{TKV}} - \underline{I}_{\text{ПДV}}$ – приращение вектора тока фазы v при переходе от предшествующего режима (индекс «пд») к текущему (индекс «тк») (в действующих значениях).

Также известно, что A_{Ev} зависит от фазы коммутации. Используем тот факт, что модуль тока обратной последовательности \underline{I}_{S2} меньше

максимального фазного тока при всех видах КЗ:

$$|\underline{I}_{S2}| \leq \frac{1}{\sqrt{3}} |\underline{I}_{TKV}|. \quad (3.23)$$

Таким образом, максимальную величину $|A_{E_V}|$ для оценки реакции пускового органа можно принять равной амплитуде периодической составляющей обратной последовательности:

$$A_{E_{\max}} = \sqrt{2} |\underline{I}_{S2}|. \quad (3.24)$$

При различных видах повреждений ЛЭП из (3.22), (3.23) и (3.24) следует, что последующее применение ФОС и ФАС к сигналу i_{E2} можно оценить по характеристикам однофазного сигнала вида (3.16). Аналогичные рассуждения справедливы и для фильтра прямой последовательности в силу симметрии коэффициентов матрицы Фортескью.

3.2.2 Исследование характеристик пускового органа в условиях электромагнитного переходного процесса

Представление системы фильтров ФОС и ФАС на рисунке 3.8а в виде однофазного фильтра относительно тока i_V дает возможность исследования передаточных свойств каскада. Для используемых цифровых фильтров определена амплитудно-частотная характеристика каскада:

$$A(q) = \frac{32 \cos^4(\pi q / 2) |\sin(\pi q / 2)|}{N} \left| \frac{1}{\sin(\pi(1-q)/N)} \pm \frac{1}{\sin(\pi(1+q)/N)} \right|,$$

где $q = f / f_{\text{НОМ}}$;

$N = f_d / f_{\text{НОМ}}$ – число отсчетов входного сигнала, измеренных с частотой дискретизации f_d , на период номинальной частоты, принимаемой, например, $f_{\text{НОМ}} = 50 \text{ Гц}$.

На рисунке 3.9 представлена амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) системы ФОС и ФАС. Для токов и напряжений асинхронного режима и режима синхронных качаний характерны частотные компоненты вблизи номинальной частоты и в области малых частот. Так, при постоянных частотах f_1 и f_2 двух частей энергосистемы наблюдаются сигналы напряжения с частотой $(f_1 + f_2)/2$, модулированные огибающей с частотой $(f_1 - f_2)/2$ [237]. Как видно, система фильтров значительно подавляет компоненты нестационарных режимов в широком диапазоне частот.

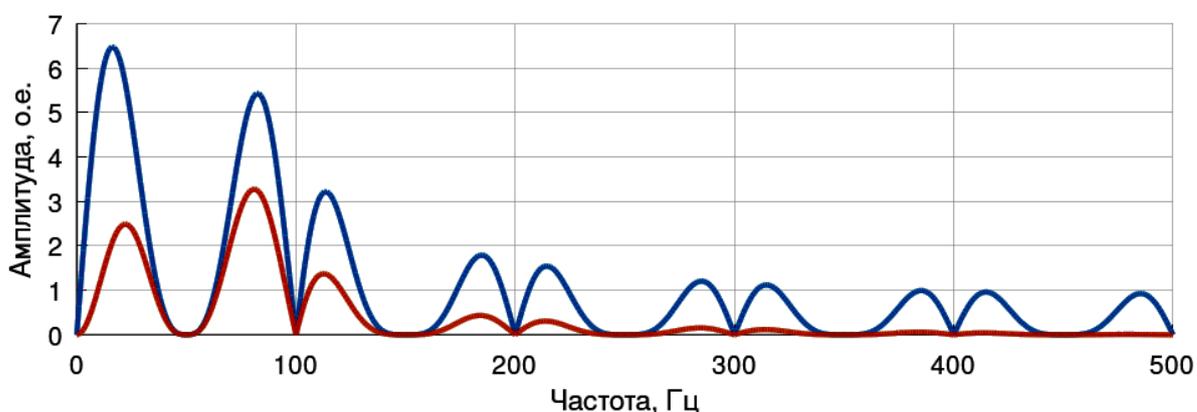


Рисунок 3.9 – АЧХ системы фильтров

АЧХ также показывает, что на некоторых частотах, например, вблизи 25 Гц, система фильтров значительно усиливает входной сигнал, что и придает пусковому органу требуемые свойства чувствительности к изменению режима электрической сети при коммутации. Максимальное усиление фильтров составляет 6,5 о.е.

Представленная кривой 1 на рисунке 3.10 переходная характеристика системы фильтров также демонстрирует значительное усиление входного ступенчатого сигнала: через время 0,020 с достигается максимальное значение 2,712 о.е.

В дальнейшем анализе будет использована характеристика коэффициента передачи системы фильтров, полученная на экспоненциально

убывающем с постоянной времени τ от 0,001 до 0,300 с сигнале (рисунок 3.11). Видно, что максимум около 1,2 о.е. достигается при $\tau = 0,020$ с. При больших τ значение коэффициента передачи монотонно убывает до нуля, что соответствует назначению ФАС, выполняющего операцию дифференцирования сигнала по времени. Значения на рисунке 3.11 приведены к максимальному значению входного сигнала в окне системы фильтров.

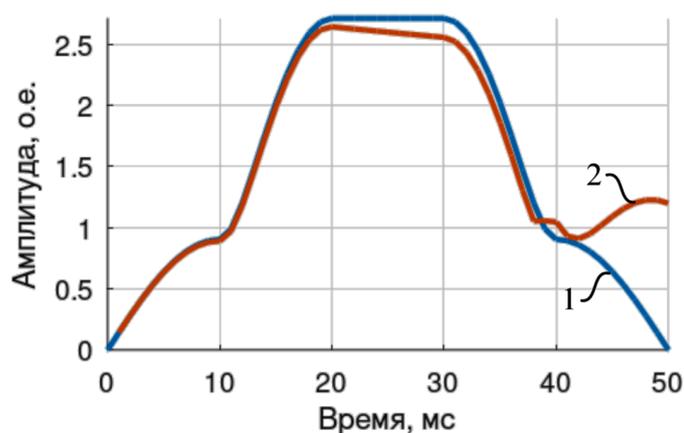


Рисунок 3.10 – Переходная характеристика системы фильтров (кривая 1) и отклик на экспоненциальный сигнал (кривая 2)

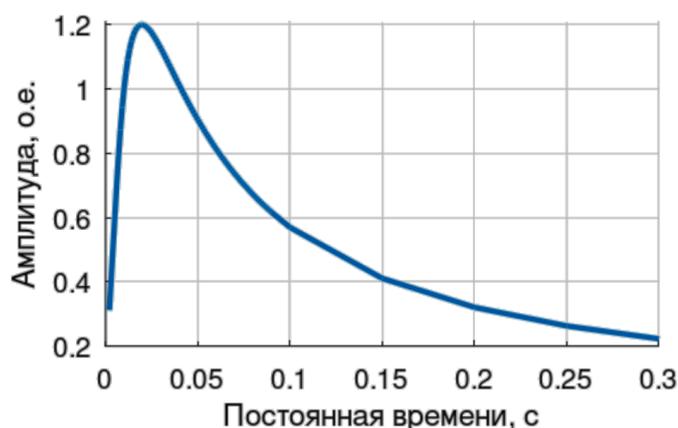


Рисунок 3.11 – Коэффициент передачи системы фильтров для экспоненциального сигнала

Семейство кривых на рисунке 3.12 представляет реакцию системы фильтров на подачу экспоненциального сигнала во времени при вариации параметра τ от 0,001 до 0,300 с. Кривая 2 на рисунке 3.10 показывает

максимальное достигаемое значение в заданный момент времени. Максимум этой функции 2,65 о.е. также достигается через 0,020 с после коммутации. Интерес представляет зависимость этого максимума от величины постоянной времени τ , иллюстрируемая кривой 1 на рисунке 3.13.

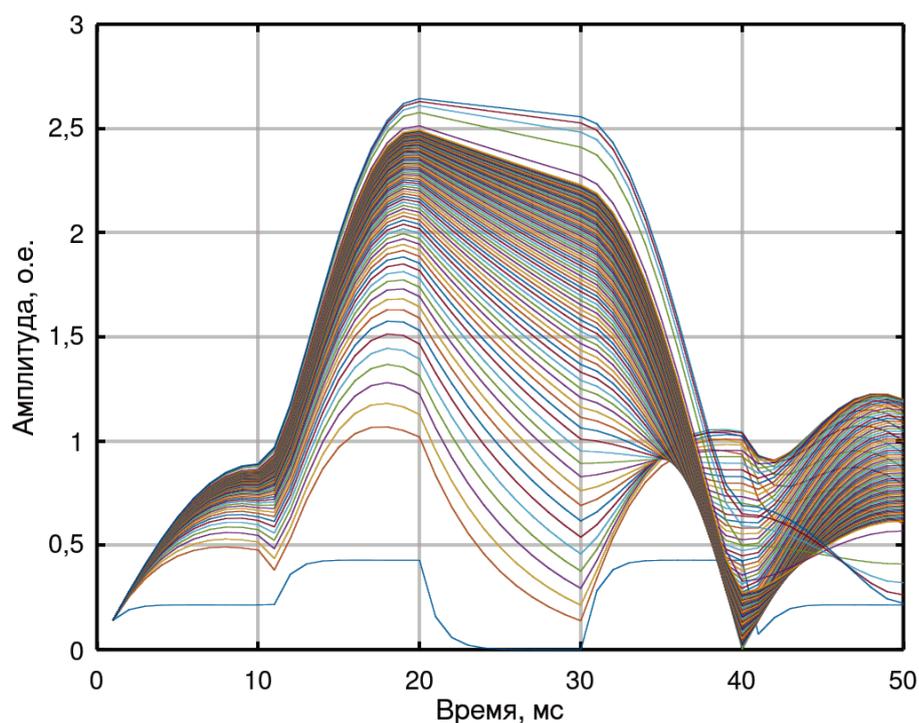


Рисунок 3.12 – Коэффициент передачи системы фильтров для экспоненциального сигнала

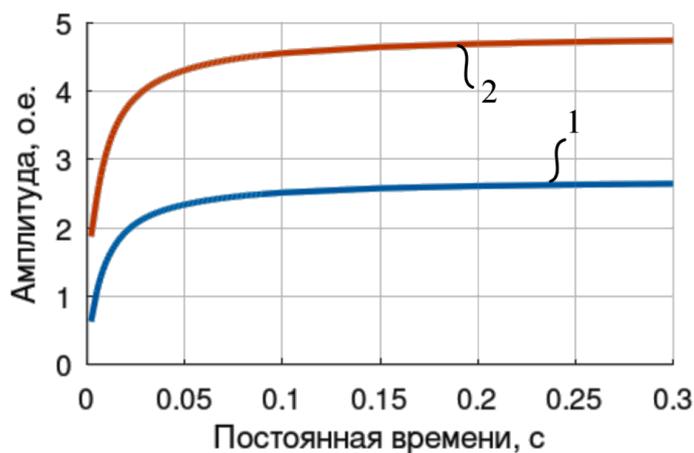


Рисунок 3.13 – Зависимость максимального отклика системы фильтров на экспоненциальный (кривая 1) и комбинированный (кривая 2) сигналы от величины постоянной времени

Асимптотой графика является максимум переходной характеристики. С увеличением τ кривая 2 на рисунке 3.10 стремится к кривой 1 на интервале от 0 до 35 мс. При $\tau < 0,01$ с максимум не превышает 1,52 о.е., а спустя время $0,050$ с $> 5\tau$ экспонента (передается с коэффициентом менее 1,0 о.е. по рисунку 3.11) и вовсе убывает до пренебрежимо малой величины.

Синусоидальный входной сигнал попадает в систему фильтров ФОС и ФАС в виде взвешенной суммы фазных сигналов, как это показано в (3.17). Известна «треугольная» переходная характеристика этого преобразования в случае, если периодически изменяющиеся фазные сигналы образуют обратную последовательность, однако практический интерес представляет и однофазная подача синусоидального тока. Реакция системы фильтров на синусоидальный сигнал номинальной частоты с действующим значением 1 о.е. изображена на рисунке 3.14.

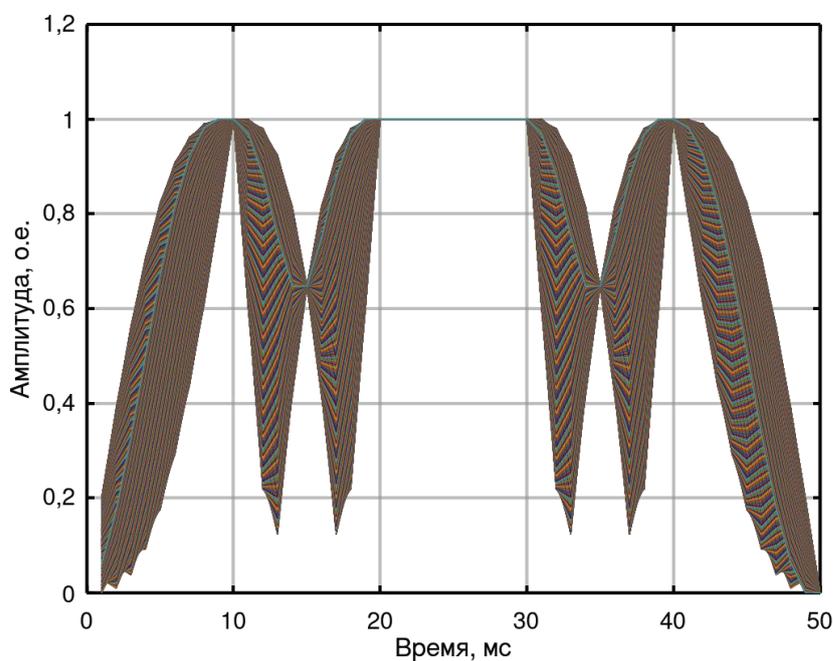


Рисунок 3.14 – Семейство кривых отклика системы фильтров на синусоидальный сигнал

Кривая на рисунке 3.15 охватывает все возможные комбинации синусоидальных трехфазных сигналов обратной последовательности.

Показано максимальное значение, достигаемое на выходе фильтров в заданный момент времени при вариации начальной фазы φ_v периодической составляющей. При любой начальной фазе сигнала обнаруживаются максимумы в районе 0,010 с, от 0,020 до 0,030 с и в районе 0,040 с. ФАС настроен на расчет приращения комплексного входного сигнала с коэффициентом передачи 1,0 о.е.

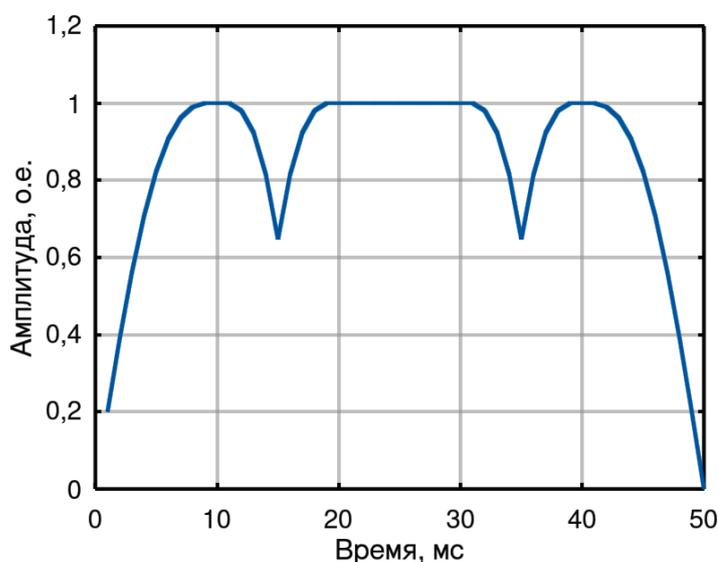


Рисунок 3.15 – Максимальный отклик системы фильтров на синусоидальный сигнал

Таким образом, кривые на рисунках 3.10 и 3.15 позволяют оценить максимальную величину коэффициента передачи системы фильтров ФОС и ФАС при подаче синусоиды и равновеликой экспоненты:

$$1 + 2,712\sqrt{2} \approx 4,8 \text{ о.е.} \quad (3.25)$$

Этот расчет подтверждается кривой 1 на рисунке 3.16, где показана максимальная реакция системы фильтров в каждый момент времени на сигнал (3.16) с $A_S = 1 \text{ о.е.}$ и $A_E = \sqrt{2}A_S$. Варьировались начальная фаза периодической составляющей φ_v и постоянная времени τ . Кривая 2 на рисунке 3.13 показывает зависимость максимума этой реакции от постоянной времени τ . Большим значениям τ соответствует большее усиление в

переходном процессе. Максимум (3.25) достигается при $\tau \rightarrow \infty$. Важно, что апериодическая составляющая во входном сигнале не снижает чувствительность пускового органа.

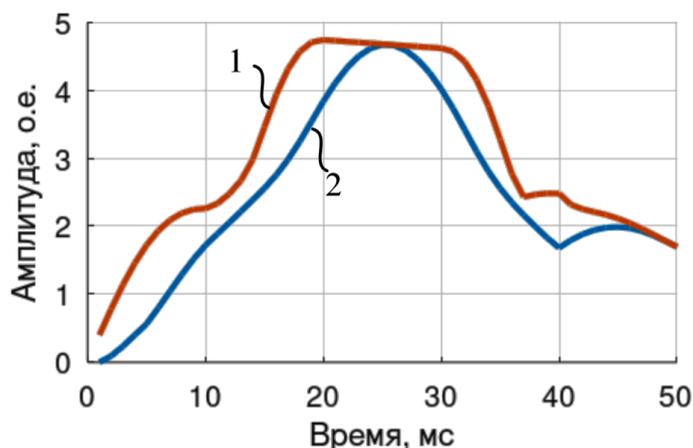


Рисунок 3.16 – Отклик системы фильтров на комбинированный сигнал без ограничений (кривая 1) и с ограничением (кривая 2)

Условия построения кривой 1 на рисунке 3.16 значительно расширяют нормальные диапазоны вариации параметров электрических схем, в которой наблюдается переходный процесс. Наиболее подходящим было бы ограничение в виде $i_v(0) = 0$, которое устанавливает рамки вариации величины A_E . В этом случае может быть получена реакция системы фильтров, изображенная кривой 2 на рисунке 3.16. Она показывает смещение максимума в 25 мс, но само значение максимума кривых 1 и 2 отличается незначительно: при малых $\tau < 0,007$ с отличие от кривой 2 на рисунке 3.13 может составлять более 50%, однако при $\tau > 0,020$ с отличие составляет менее 20% и убывает с ростом τ . Таким образом, максимальная реакция системы фильтров может быть определена по кривой 2 на рисунке 3.13 для заданного значения τ . В практических расчетах τ принимается максимальным возможным в данной электрической сети.

Работу пускового органа в условиях процессов, зарегистрированных в реальной электрической сети, иллюстрирует рисунок 3.17, представленный

во вторичных величинах. Преобладает ток прямой последовательности, в каждом фазном токе наблюдается аperiodическая составляющая.

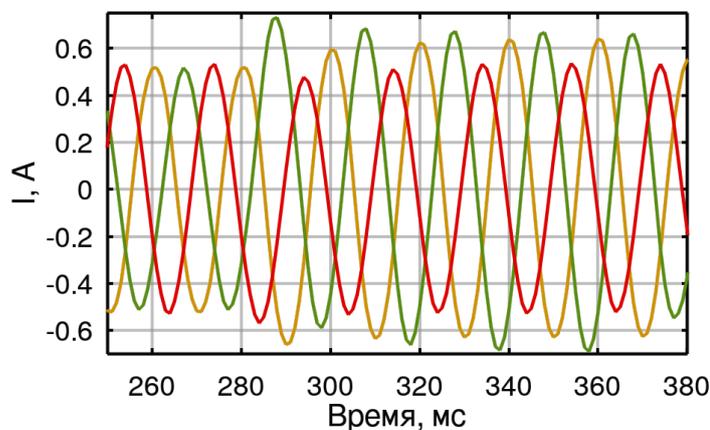


Рисунок 3.17 – Осциллограмма фазных токов при трехфазном КЗ

Из отклика фильтров на рисунке 3.18 видно, что приращение тока обратной последовательности, измеренное по периодической составляющей, равно 0,066 А.

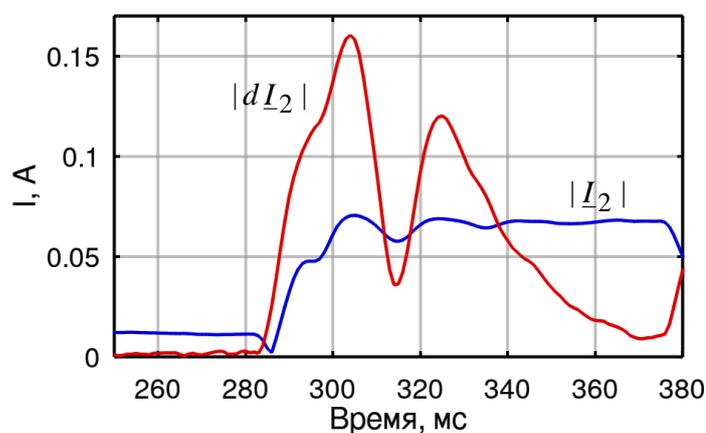


Рисунок 3.18 – Отклик системы фильтров на трехфазное КЗ

Максимальная амплитуда аperiodической составляющей в фазных токах составила 0,16 А при оцениваемой постоянной времени от 0,015 до 0,020 с, однако система фильтров измерительного органа, как видно, значительно ослабила ее влияние на расчет приращения токов обратной последовательности. Измерительный орган обнаруживает повышенную

чувствительность к этому режиму и использует значение рабочей величины до 0,160 А, то есть в 2,4 раза выше, а потому может срабатывать и при значениях уставки выше 0,066 А, вплоть до 0,160 А. Значение рабочей величины меньше максимальной возможной в этих условиях кратности 3,74 о.е., оцениваемой по рисунку 3.13.

Таким образом, пусковой орган по приращению тока обратной последовательности, используемый в модуле блокировки при качаниях микропроцессорного терминала дистанционной защиты [235], обнаруживает повышенную чувствительность в условиях электромагнитных переходных процессов, обусловленных коммутациями в электрической системе. При этом пусковой орган с высокой надежностью отстроен от срабатывания в режимах асинхронного хода и синхронных качаний.

3.3 Разработка принципов расчета параметров срабатывания измерительных органов автоматики ликвидации асинхронного режима

3.3.1 Практические аспекты настройки токовых пусковых органов защиты и автоматики

3.3.1.1 Основы методологии расчета уставок пусковых органов

На основе исследования характеристик токового пускового органа разработана методика расчета уставок для функции АЛАР в терминалах серии ТОР 300 ПА.

Функция блокировки при КЗ (БКЗ) предназначена для предотвращения срабатывания АЛАР в условиях переходного процесса, вызванного повреждением ЛЭП и в энергосистеме, когда изменение величин токов и напряжений может привести к срабатыванию выявительного измерительного органа АЛАР. Аналогичная опция предусмотрена в

дистанционной защите с противопоставлением режимов КЗ и нестационарных режимов. При этом стандартами [238] предусмотрена структура измерительных органов функции блокировки при качаниях (БК):

- $dI_2/dt_{\text{груб}}$ – приращение тока обратной последовательности грубого органа;

- $dI_2/dt_{\text{чув}}$ – приращение тока обратной последовательности чувствительного органа;

- $dI_1/dt_{\text{груб}}$ – приращение тока прямой последовательности грубого органа;

- $dI_1/dt_{\text{чув}}$ – приращение тока прямой последовательности чувствительного органа.

В модуле БКЗ функции АЛАР предусмотрена лишь одна ступень срабатывания по току каждой последовательности: $БКЗdI_1$ и $БКЗdI_2$.

Ниже рассмотрены основные положения инженерной методики выбора уставок этих измерительных органов.

В асинхронном режиме на входе измерительных органов $БКЗdI_1$ и $БКЗdI_2$ возникают небалансы, вызванные биением частот f_1 и f_2 ЭДС $e_1(t)$ и $e_2(t)$ по концам ЛЭП, отличных от 50 Гц. Небалансы на выходе фильтра $БКЗdI_2$ вызываются в нестационарных режимах еще и несимметрией нагрузки и фаз ЛЭП из-за возможной неполной транспозиции фаз. Минимальные возможные уставки БКЗ должны быть отстроены от этих небалансов с коэффициентом отстройки $K_{\text{отс}}$ во избежание ложной блокировки АЛАР со стороны БКЗ на первом цикле асинхронного режима.

В расчетах минимальных допустимых уставок БКЗ по условиям отстройки от небалансов приняты следующие обозначения:

$$K_{\text{п11}} = \frac{I_{\text{вх1}}}{I_{\text{вых БКЗdI}_1}} - \text{коэффициент подавления } БКЗdI_1 \text{ тока прямой}$$

последовательности на входе блока по отношению к току на выходе фильтра измерительного органа аварийной составляющей блока при заданных частотах f_1 и f_2 ;

$$K_{\Pi 12} = \frac{I_{\text{ВХ1}}}{I_{\text{ВЫХ БКЗdl}_2}} - \text{коэффициент подавления БКЗdl}_2 \text{ тока прямой}$$

последовательности на входе блока по отношению к току на выходе фильтра измерительного органа аварийной составляющей блока при заданных частотах f_1 и f_2 ;

$$K_{\Pi 22} = \frac{I_{\text{ВХ2}}}{I_{\text{ВЫХ БКЗdl}_2}} - \text{коэффициент подавления БКЗdl}_2 \text{ тока обратной}$$

последовательности на входе блока по отношению к току на выходе фильтра измерительного органа аварийной составляющей блока при заданных частотах f_1 и f_2 ;

$$K_{\text{АР}} = \frac{I_{\text{АР макс.}}}{I_{\text{НОМ}}} - \text{максимальная кратность тока асинхронного}$$

режима по отношению к номинальному току ЛЭП $I_{\text{НОМ}}$;

$$I_{*2\text{нагр}} = \frac{I_{2\text{нагр. макс}}}{I_{\text{НОМ}}} - \text{относительный максимальный ток обратной}$$

последовательности в нагрузочном режиме по отношению к номинальному току, вызванный несимметрией нагрузки;

$$I_{*2\text{ВЛ}} = \frac{I_{2\text{ВЛ}}}{I_{\text{НОМ}}} - \text{относительный ток обратной последовательности по}$$

отношению к номинальному току, вызванный несимметрией сопротивлений фаз ЛЭП из-за их неполной транспозиции. В большинстве расчетов рекомендуется принимать $I_{*2\text{ВЛ}} = 0,05 \text{ о.е.}$

Минимальная допустимая уставка по условиям отстройки от небалансов для БКЗdl₁ рассчитывается по формуле:

$$I_{*уст1} \geq \frac{K_{AP}}{K_{п11}} K_{отс}, \quad (3.26)$$

где $K_{отс} \geq 2$ – коэффициент отстройки.

Выбранная уставка должна проверяться по условиям обеспечения чувствительности не менее 2 при трехфазных КЗ на защищаемой ЛЭП при минимальных режимах работы электростанций (с учетом динамических свойств фильтров БКЗ):

$$K_{чув}^{(3)} = \frac{I_{*КЗ}^{(3)} - I_{*нагр}}{I_{*уст1}}, \quad (3.27)$$

где $I_{*КЗ}^{(3)}$ и $I_{*нагр}$ – кратность трехфазного тока КЗ в минимальном режиме и максимальный ток нагрузки ЛЭП по отношению к номинальному току.

Предложено определять коэффициент подавления $K_{п11}$ с использованием метода наложения при поочередном воздействии эквивалентных ЭДС \underline{E}_1 и \underline{E}_2 по конца ЛЭП:

$$K_{п11} = \frac{E_{*1} + E_{*2}}{\frac{E_{*1}}{K_{п11}f_1} + \frac{E_{*2}}{K_{п11}f_2}}, \quad (3.28)$$

где E_{*1} и E_{*2} – модули ЭДС, отнесенные к номинальному (базисному) значению напряжения и изменяющиеся в пределах от 0,9 до 1,1;

$K_{п11}f_1$, $K_{п11}f_2$ – коэффициенты подавления в БКЗ dI_1 токов прямой последовательности на соответствующих частотах f_1 и f_2 . Результирующее значение коэффициента $K_{п11}$ оказывается несколько больше необходимого.

Частоты рассчитывают для наихудших условий асинхронного режима

на данной ЛЭП с максимальным отклонением f_1 и f_2 от 50 Гц. В первом цикле асинхронного режима максимальная разность частот (частота скольжения) $f_s = f_1 - f_2$ может составить до 8 Гц [239]. При этом минимальное значение частоты может составить 42 Гц, а максимальное – 53 Гц, ограниченное автоматикой электростанций [240].

Коэффициенты подавления токов $BK3dI_1$ и $BK3dI_2$, полученные по АЧХ фильтров модуля БКЗ, на частотах диапазона приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Коэффициенты подавления $BK3dI_1$ и $BK3dI_2$

f , Гц	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53
$K_{п11}$, о.е.	8,5	12,5	20	33	64	150	500	$5 \cdot 10^5$	10^5	$5 \cdot 10^3$	500	150
$K_{п12}$, о.е.	90	150	250	500	$1,4 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^3$	10^4	10^5	10^5	10^5	10^4	$5 \cdot 10^3$

Минимальная допустимая уставка по условиям отстройки от небалансов для $BK3dI_2$ рассчитывается по формуле:

$$I_{*уст2} \geq \left[\frac{K_{AP}}{K_{п12}} + \frac{(I_{*2ВЛ} \cdot K_{AP} + I_{*2нагр})}{K_{п22}} \right] K_{отс}, \quad (3.29)$$

где можно принять $K_{п22} = K_{п11}$ по причине линейности и симметрии преобразований при определении токов прямой и обратной последовательности. Для расчета $K_{п22}$ формулу (3.28) можно упростить, поскольку в данном случае играет роль не соотношение модулей ЭДС, а параметры продольной несимметрии фаз ВЛ и несимметрия нагрузки по фазам при принятом номинальном напряжении нагрузки в условиях асинхронного режима:

$$K_{п22} = \frac{2}{\frac{1}{K_{п22}f_1} + \frac{1}{K_{п22}f_2}}. \quad (3.30)$$

Принимают $K_{п22}f_1 = K_{п11}f_1$, $K_{п22}f_2 = K_{п11}f_2$.

Коэффициенты подавления $K_{п12}$ определяют по формуле:

$$K_{п12} = \frac{E_{*1} + E_{*2}}{\frac{E_{*1}}{K_{п12}f_1} + \frac{E_{*2}}{K_{п12}f_2}}. \quad (3.31)$$

Коэффициенты $K_{п12}f_1$ и $K_{п12}f_2$ определяют по данным таблицы 3.2.

Выбранные уставки БКЗ dI_2 проверяются по условиям обеспечения чувствительности не менее 2 при двухфазных КЗ и двойных замыканиях на землю в минимальных режимах работы электростанции:

$$K_{чув}^{(2)} = \frac{I_{*КЗ}^{(2)} - I_{*нагр.макс}}{I_{*уст2}}; \quad (3.32)$$

$$K_{чув}^{(1,1)} = \frac{I_{*КЗ}^{(1,1)} - I_{*нагр.макс}}{I_{*уст2}}, \quad (3.33)$$

где $I_{*2КЗ}^{(2)}$ и $I_{*КЗ}^{(1,1)}$ – относительные токи соответственно междуфазного КЗ и двухфазного КЗ на землю в конце защищаемой ЛЭП в минимальном режиме работы электростанций.

Для чувствительного органа блокировки при качаниях дистанционной защиты предложено выбирать уставки по упрощенным выражениям:

$$I_{*уст1} = \frac{k_3 k_{1\phi}}{k_B} K_{AP}, \quad (3.34)$$

$$I_{*уст2} = \frac{k_3 k_{2\phi}}{k_B} K_{AP}, \quad (3.35)$$

где k_3 – коэффициент запаса, учитывающий погрешности ИП, ошибки расчета и необходимый запас, изменяемый в диапазоне от 1,2 до 1,5 о.е;

$k_B = 0,9$ о.е. – коэффициент возврата токовых реле;

$k_{1ф}$, $k_{2ф}$ – коэффициенты фильтров по току прямой и обратной последовательности соответственно, значения которых приведены в таблице 3.3 в зависимости от максимальной частоты скольжения с учетом меньшего диапазона вариации режимов для дистанционной защиты.

Таблица 3.3 – Коэффициенты фильтров блокировки при качаниях

f_s , Гц	1	2	3	4	5
$k_{1ф}$, о.е.	0,00125	0,010	0,035	0,080	0,155
$k_{2ф}$, о.е.	0,000013	0,00022	0,0011	0,0040	0,0085

3.3.1.2 Оценка чувствительности пусковых органов при повреждениях линии электропередачи

Следующий расчет демонстрирует свойства измерительных органов на примере типичной ЛЭП 220 кВ [241]. Величины уставок и сопутствующие расчетные величины сведены в таблицу 3.4. Обращает на себя внимание десятикратная разница в коэффициентах подавления $k_{п}$. Чувствительность пусковых органов к КЗ в конце ЛЭП оценена коэффициентами чувствительности $K_{чув}$. Видно, что чувствительность БКЗД₂ к замыканиям в конце ЛЭП значительно выше.

Расчет уставок БК дистанционной защиты отличается коэффициентами отстройки и возврата, а потому получаются близкие значения: $I_{*уст1} = 1,41$ о.е.; $I_{*уст2} = 0,13$ о.е.

Оценены уставки измерительных органов БК по сопротивлению.

Рассчитывают величину двух характеристик: внешней и внутренней [235]: $R_{out} = 120 \text{ Ом}$; $R_{in} = 70 \text{ Ом}$. Они выбраны с учетом скорости изменения сопротивления и времени фиксации асинхронного режима – 35 мс [242]. Фрагмент характеристики срабатывания БК показан на рисунке 3.19.

Таблица 3.4 – Расчет уставок БКЗdI₁ и БКЗdI₂

Параметр	$I_{*уст}$, о.е.	$k_{п}$, о.е.	$K_{чув}$, о.е.
БКЗdI ₁	0,98	17	4,7
БКЗdI ₂	0,13	180	17,3

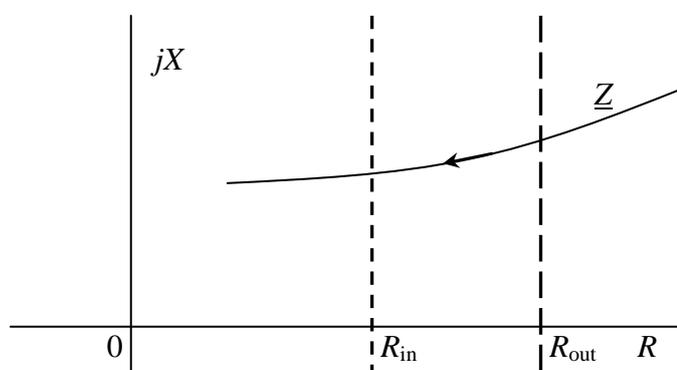


Рисунок 3.19 – Фрагмент характеристики измерительного органа БК по сопротивлению

Графики объектных характеристик на рисунке 3.20 показывают максимальное переходное сопротивление КЗ, при котором возможна работа ИО по приращениям токов БК и БКЗ. Как видно, чувствительность к несимметричным КЗ значительно выше, что связано с большей информационной ценностью тока обратной последовательности. Симметричные трехфазные замыкания определяются измерительными органами по приращению тока прямой последовательности.

Величина характеристики БК по сопротивлению ограничивает чувствительность дистанционных органов дистанционной защиты [243], так как последние должны располагаться внутри характеристики БК. Поэтому проверяется чувствительность дистанционной защиты к КЗ при условии, что

характеристика срабатывания вписана в расчетные уставочные характеристики БК. Показанные на рисунке 3.21 объектные характеристики значительно ниже аналогичных характеристик измерительных органов по приращениям токов, что говорит о пониженной чувствительности измерительных органов.

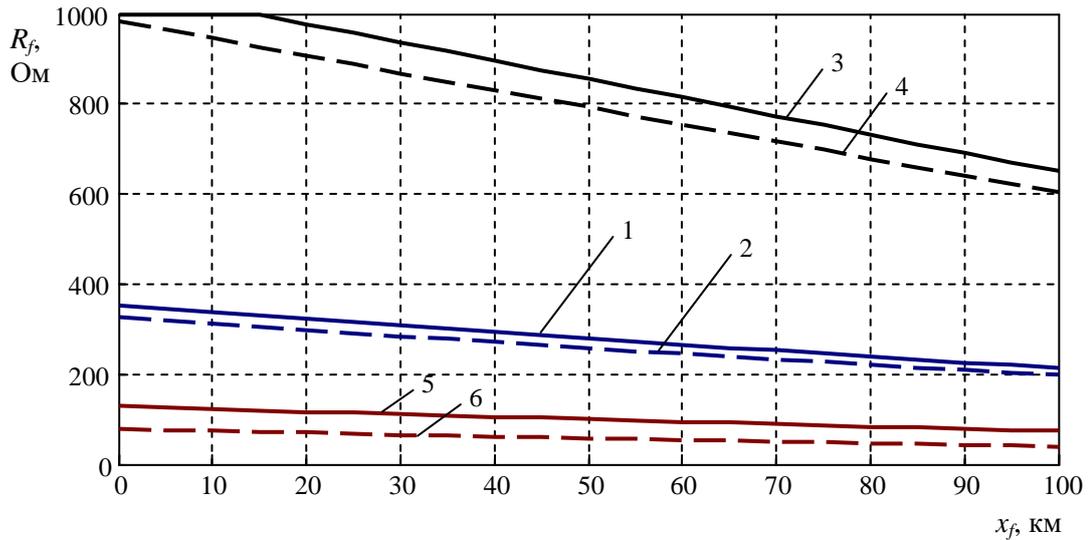


Рисунок 3.20 – Чувствительность БКЗ (кривые 1, 3, 5) и БК (кривые 2, 4, 6) к КЗ на линии: кривые 1, 2 – однофазное КЗ; кривые 3, 4 – междуфазное КЗ; кривые 5, 6 – трехфазное КЗ

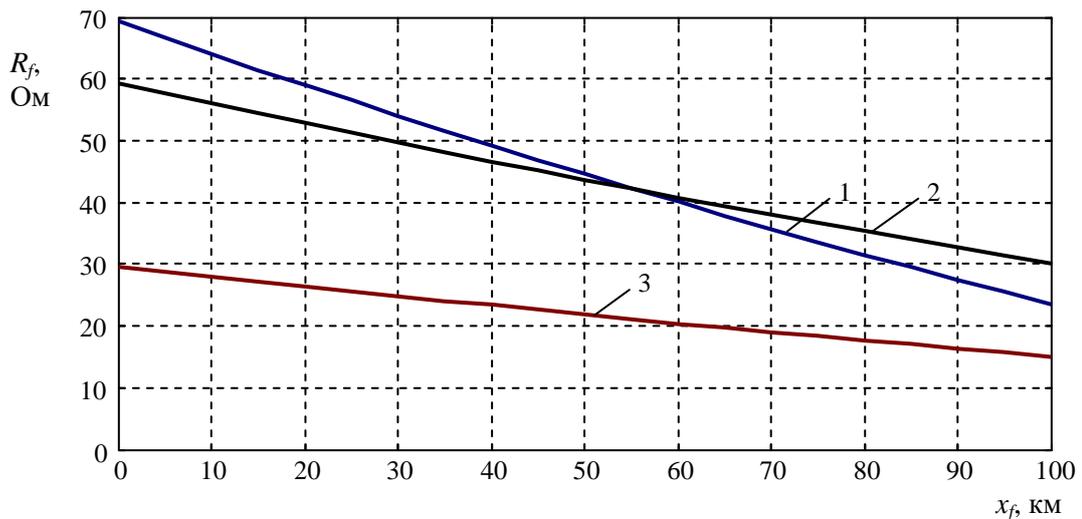


Рисунок 3.21 – Чувствительность дистанционных органов по сопротивлению к КЗ на линии: кривая 1 – однофазное КЗ, кривая 2 – междуфазное КЗ, кривая 3 – трехфазное КЗ

В начальной фазе КЗ на фоне качаний ожидается срабатывание как БК по приращениям токов, так и БКЗ: ДЗ должна быть разрешена для возможной работы при КЗ в зоне; АЛАР может срабатывать неправильно в режиме КЗ и должна блокироваться.

Моделирование показало, что чувствительность этих пусковых органов оказывается ниже, чем при КЗ на фоне нагрузочного режима, так как приращение тока прямой последовательности в этом режиме меньше. Величина приращения тока обратной последовательности в целом сохраняется. Чувствительность измерительного органа зависит от угла включения на КЗ по отношению к фазе асинхронного режима (углу между векторами эквивалентных ЭДС), от величины скольжения. Чем больше абсолютная величина угла между эквивалентными ЭДС, тем хуже условия для распознавания КЗ (любыми дистанционными методами) и ниже чувствительность измерительных органов БК и БКЗ к коротким замыканиям. Это является следствием того, что источник аварийных составляющих – напряжение в месте КЗ в предшествующем режиме – получает меньшую величину ЭДС, чем при работе на угле нагрузки.

3.3.2 Особенности настройки пусковых органов сопротивления на линиях электропередачи с ответвлениями

Основное действие устройства АЛАР должно осуществляться на первом цикле асинхронного режима с контролем изменения знака активной мощности, выявлением местоположения электрического центра качаний (ЭЦК) [244]. Резервное действие устройства АЛАР должно выполняться по принципу отсчета определенного числа циклов асинхронного режима.

Наибольшее число устройств АЛАР устанавливается на ЛЭП 110–220 кВ, причем значительное количество этих ЛЭП имеет промежуточный отбор мощности (ПОМ) в виде проходных и ответвительных подстанций.

Типовые устройства АЛАР были разработаны в ОАО «Институт Энергосетьпроект» на базе электромеханических реле сопротивления и реле максимальной мощности. Устройства типа ЭПО предназначены для выявления двухчастотного асинхронного режима в схеме с двумя электростанциями, эквивалентируемой двумя генераторами и связывающей их электропередачей (рисунок 3.22), и используют косвенные признаки наличия асинхронного режима по переходу угла сдвига фаз δ между ЭДС эквивалентных генераторов через 180° с помощью выявительного органа путем фиксации перехода комплексной мощности из одной полуплоскости значений $P + jQ$ в другую полуплоскость в моменты $\delta \approx 0^\circ$ и $\delta \approx 180^\circ$. Селективное выявление асинхронного режима осуществляет пусковой орган минимального сопротивления, состоящий из чувствительного (ИО_{чув}) и грубого (ИО_{гр}) измерительных органов, по разности времен срабатывания которых при вхождении годографа сопротивления \underline{Z} (на их зажимах) в зону действия определяется отличие КЗ от синхронных качаний или асинхронного режима. Совокупность пускового и выявительного органов обычно называется выявителем асинхронного режима (рисунок 3.23).

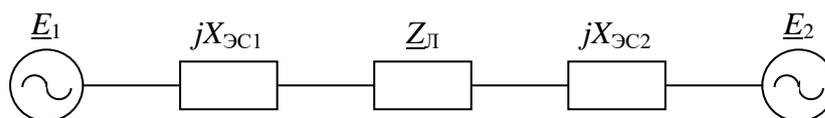


Рисунок 3.22 – Расчетная схема для выявления двухчастотного асинхронного режима

Здесь \underline{E}_1 и \underline{E}_2 – ЭДС электростанций 1 и 2; $jX_{эс1}$ и $jX_{эс2}$ – внутреннее индуктивное сопротивление электростанций 1 и 2; $\underline{Z}_л$ – эквивалентное комплексное сопротивление ЛЭП.

Задача оптимального выбора характеристик ИО устройств АЛАР и упрощения выбора их уставок в условиях промежуточного отбора мощности (ПОМ) на ЛЭП может быть решена на основе исследования диапазонов

изменения параметров четырехполюсника, эквивалентирующего электропередачу.

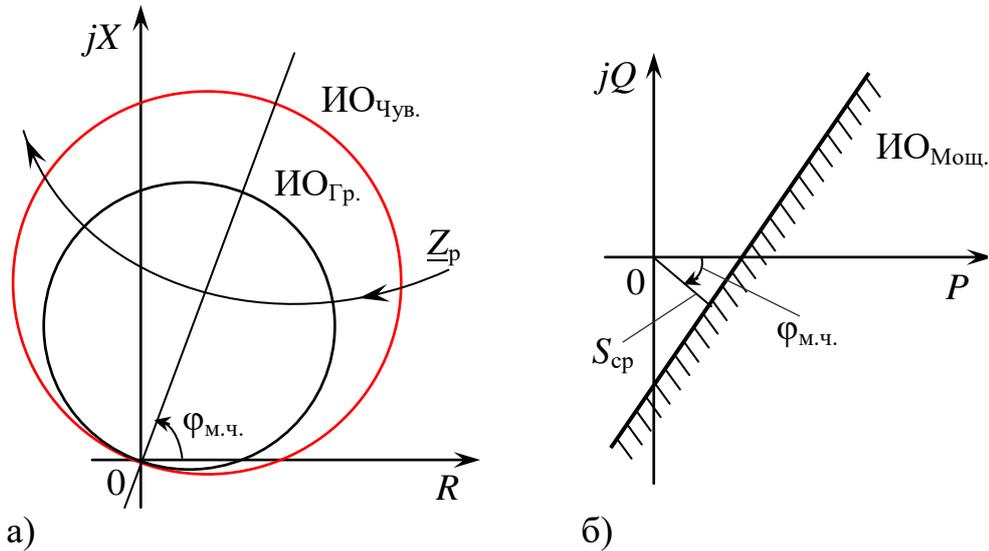


Рисунок 3.23 – Характеристики срабатывания измерительных органов устройства АЛАР по сопротивлению (а) и по мощности (б)

Действительно, расчетная схема электропередачи с ПОМ в виде сопротивления \underline{Z}_H , связывающая два источника ЭДС, может быть представлена в виде Т-образного четырехполюсника, к зажимам которого подключены источники ЭДС (рисунок 3.24). Последовательные сопротивления систем и линии до точки отбора мощности объединены в \underline{Z}_1 и \underline{Z}_2 .

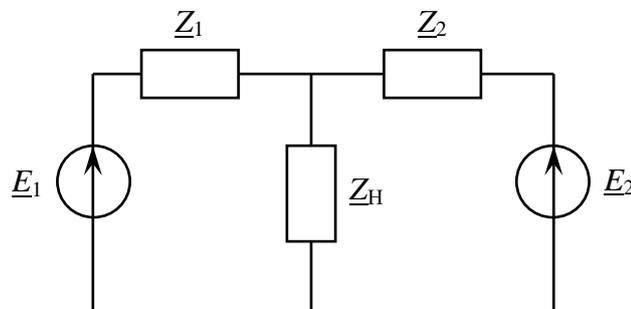


Рисунок 3.24 – Эквивалентная схема электропередачи с промежуточным отбором мощности

Тогда можно определить собственное сопротивление

четырёхполюсника со стороны системы 1

$$\underline{Z}_{11} = \underline{Z}_1 + \frac{\underline{Z}_2 \underline{Z}_H}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_H}, \quad (3.36)$$

собственное сопротивление четырёхполюсника со стороны системы 2

$$\underline{Z}_{22} = \underline{Z}_2 + \frac{\underline{Z}_1 \underline{Z}_H}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_H}, \quad (3.37)$$

взаимные сопротивления четырёхполюсника

$$\underline{Z}_{12} = \underline{Z}_{21} = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \frac{\underline{Z}_1 \underline{Z}_2}{\underline{Z}_H}. \quad (3.38)$$

Примем $\underline{Z}_{11} = Z_{11} \angle \varphi_{11}$, $\underline{Z}_{22} = Z_{22} \angle \varphi_{22}$, $\underline{Z}_{12} = Z_{12} \angle \varphi_{12}$.

В [245] показано, что максимальное значение модуля сопротивления на зажимах ЭДС 1 достигается при условии

$$\delta = \varphi_{11} - \varphi_{12}, \quad (3.39)$$

минимальное значение – при условии

$$\delta = 180^\circ + \varphi_{11} - \varphi_{12}. \quad (3.40)$$

Таким образом, годографы комплексного сопротивления в асинхронном режиме совершают круговые движения, центры которых находятся на прямой, совпадающей с вектором виртуального собственного сопротивления четырёхполюсника \underline{Z}_{11} . Точки, соответствующие электрическим центрам качаний при различных соотношениях модулей ЭДС примыкающих электростанций, находятся на векторе собственного сопротивления четырёхполюсника.

На рисунке 3.25 показано графическое построение эквивалентного сопротивления электропередачи $\underline{Z}_{\text{ЭК}}$ в отсутствие ПОМ. При перемещении точки ПОМ с фиксированным сопротивлением от начала ЛЭП (точка 2 на рисунке 3.25) к концу (точка 3 на рисунке 3.25) изменяются параметры собственного сопротивления электропередачи \underline{Z}_{11} .

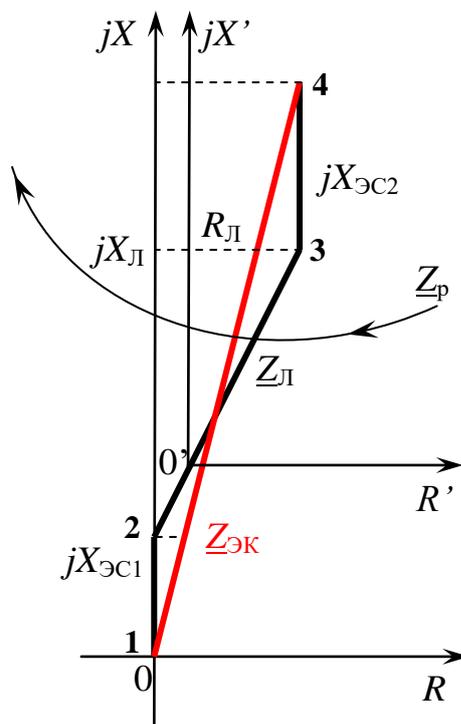


Рисунок 3.25 – Эквивалентное комплексное сопротивление электропередачи

Получено, что при этом максимальная разность углов между линией φ_{11} и линией $\varphi_{ЭК}$ в комплексной плоскости сопротивлений монотонно уменьшается от приблизительно 13° до 2° . При изменении промежуточного отбора мощности от максимального значения до нуля и фиксированном положении точки отбора мощности на ЛЭП $\varphi_{11} \rightarrow \varphi_{ЭК}$.

Таким образом, $\varphi_{11} \in [\varphi_{11\text{мин}}; \varphi_{ЭК}]$ (закрашенная область на рисунке 3.26).

Модуль собственного сопротивления электропередачи \underline{Z}_{11} при изменении величины отбора мощности в начале и в конце ЛЭП от нуля до максимального принятого значения изменяется от значения $Z_{ЭК}$ до примерно $0,96Z_{ЭК}$ и $0,99Z_{ЭК}$ соответственно. Это позволяет применить упрощенные методы эквивалентирования влияния нескольких точек ПОМ на изменение параметров \underline{Z}_{11} [245].

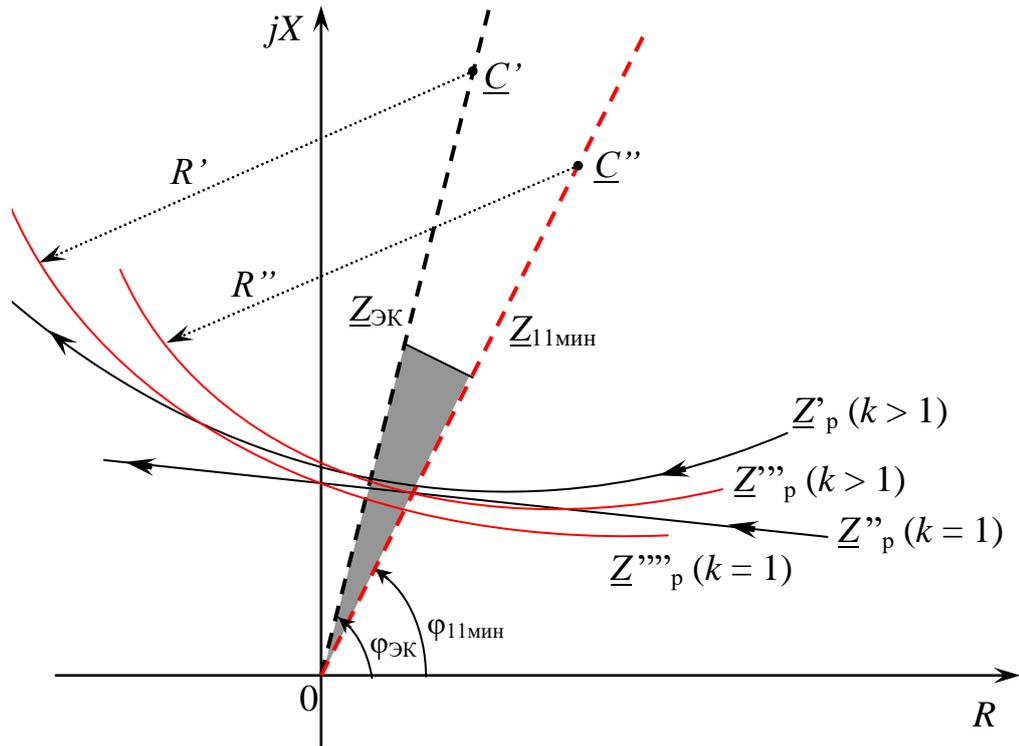


Рисунок 3.26 – Область изменения положения вектора собственного сопротивления четырехполюсника \underline{Z}_{11}

Так, принимается средневзвешенное положение места l отбора суммарной мощности на проходных ПС на электропередаче. Эквивалентное место отбора мощности для расчета \underline{Z}_{11} определяется, исходя из соотношения:

$$l = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (1 - l_i) P_i}{\sum_{i=1}^n P_i}, \quad (3.41)$$

где n – число мест промежуточного отбора мощности;

P_i, l_i – мощность отбора на проходной ПС i и ее относительное расстояние от начала ЛЭП со стороны системы 1.

Показано, что замер сопротивления, наблюдаемый на зажимах реле сопротивления в точке j , смещен относительно замера, наблюдаемого на

зажимах ЭДС системы 1, на величину сопротивления участка ЛЭП до точки j (система координат R', O', jX' на рисунке 3.25). Таким образом, проведенный расчет оказывается применим к любой промежуточной точке замера, расположенной на электропередаче.

На основе приведенных соотношений для ЛЭП с промежуточными отборами мощности предложено выбирать единые опорные точки для характеристик срабатывания измерительных органов сопротивления пусковых органов устройств АЛАР, устанавливаемых на всех участках данной электропередачи, по концам вектора эквивалентного сопротивления электропередачи $Z_{ЭК}$, а сами характеристики срабатывания выполнять эллипсоидными (в виде области пересечения двух окружностей) (рисунок 3.27).

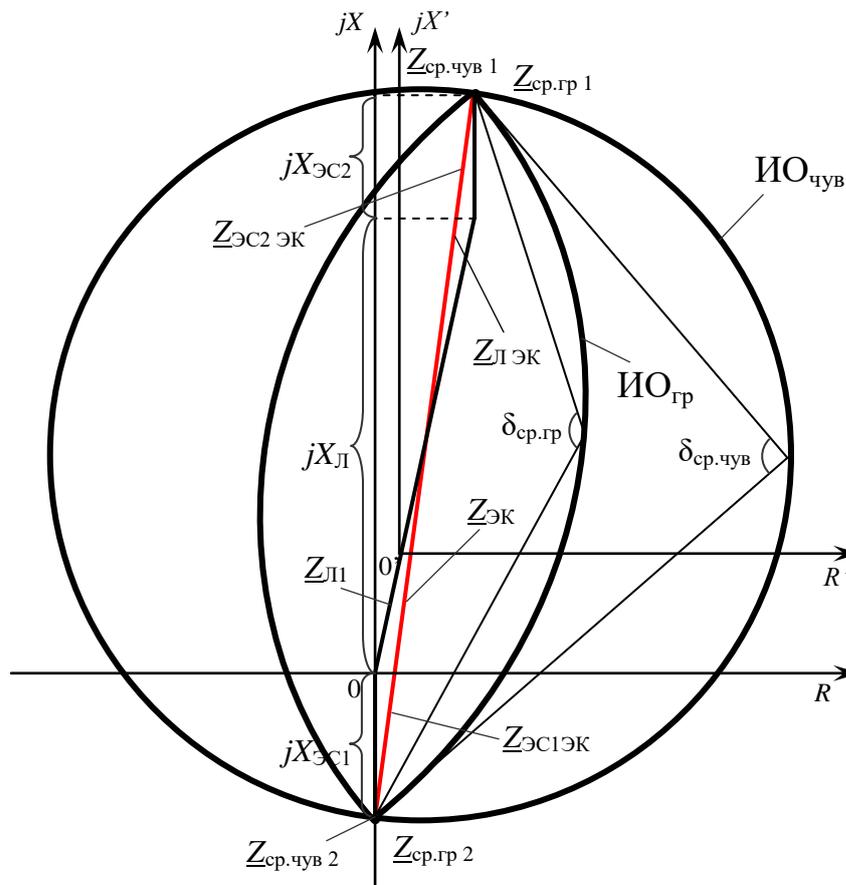


Рисунок 3.27 – Характеристики срабатывания измерительных органов: чувствительного ($ИО_{чув.}$) и грубого ($ИО_{гр.}$)

Эти опорные точки являются общими для всех участков электропередачи, и не требуется расчет уставок $ИО_{\text{чув}}$ и $ИО_{\text{гр}}$ для каждого участка ЛЭП между проходными ПС при ПОМ вне зависимости от соотношений ЭДС примыкающих систем и изменения внутреннего сопротивления систем.

Характеристики срабатывания $ИО_{\text{чув}}$ и $ИО_{\text{гр}}$ определяются опорным углом $\delta_{\text{ср}}$. Исследования показали, что опорный угол приблизительно соответствует углу δ между ЭДС систем при вхождении годографа сопротивления в эллипсовидную характеристику. Предложены значения угла в зависимости от погрешности срабатывания измерительных органов устройства АЛАР.

В микропроцессорных устройствах АЛАР целесообразно использовать два измерительных органа направления мощности ($ИО_{\text{м}}$), характеристики срабатывания которых расположены в плоскости \underline{Z} максимально близко к точкам на годографах сопротивлений, соответствующих критическому углу $\delta = 180^\circ$: прямонаправленный $ИО_{\text{м1}}$ и обратнаправленный $ИО_{\text{м2}}$ с зоной действия в виде полуплоскости, соответствующей передаче активной мощности от ЭС1 к ЭС2 и от ЭС2 к ЭС1 соответственно.

На электропередаче без ПОМ область действия $ИО_{\text{м1}}$ и $ИО_{\text{м2}}$ совпадает с правой и левой полуплоскостью от $\underline{Z}_{\text{ЭК}}$. В асинхронном режиме моменту пересечения годографом сопротивления на зажимах АЛАР линии $\underline{Z}_{\text{ЭК}}$ соответствует изменение направления (реверс) активной мощности и прохождение угла δ через значение 180° .

При наличии ПОМ и $\delta = 180^\circ$ годографы $\underline{Z}_{\text{р}}$ в общем случае не находятся ни на $\underline{Z}_{\text{ЭК}}$, ни на \underline{Z}_{11} . Как показали расчеты для различных соотношений ЭДС, замер сопротивления, соответствующий $\delta = 180^\circ$, наиболее удален вправо от $\underline{Z}_{\text{ЭК}}$ по оси R при максимальном значении

$k = E_1 / E_2$, но это удаление не превышает 2,5% от $Z_{\text{ЭК}}$ для наиболее нагруженных и протяженных ЛЭП. Удаление соответствующей точки влево от $Z_{\text{ЭК}}$ при минимальном значении k незначительно.

Крайняя возможная характеристика срабатывания ИО_{М1}, проведенная через вышеуказанные две предельные точки годографов Z_p , при $\delta = 180^\circ$ может иметь максимальный наклон вправо от $Z_{\text{ЭК}}$ не более 3° . Характеристика срабатывания ИО_{М2} может иметь такой же предельный наклон влево от $Z_{\text{ЭК}}$ (от точки приложения ЭДС системы 2).

Поэтому наиболее целесообразно выбрать характеристики срабатывания ИО_{М1} и ИО_{М2}, расположенные параллельно $Z_{\text{ЭК}}$ и наиболее близко по отношению к этому вектору (рисунок 3.28).

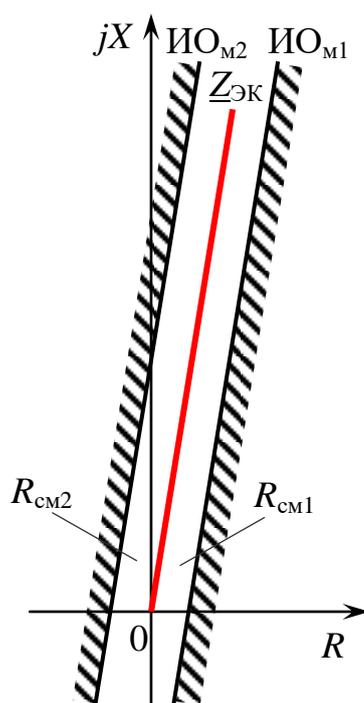


Рисунок 3.28 – Характеристики срабатывания измерительных органов направления мощности

Смещение характеристик срабатывания ИО_{М1} и ИО_{М2} по оси R соответственно вправо и влево от $Z_{\text{ЭК}}$ может составить, например, $R_{\text{см1}} = R_{\text{см2}} \approx 0,5 \text{ Ом}$. Характеристики возврата ИО_{М1} и ИО_{М2} должны

совпадать с $\underline{Z}_{ЭК}$ вне зависимости от места и количества точек ПОМ.

Предлагаемое расположение характеристик срабатывания ИО_{м1} и ИО_{м2} в плоскости \underline{Z} позволяет получить единую ось симметрии характеристик срабатывания пускового и выявительного органа асинхронного режима функции АЛАР, что упрощает выбор уставок всех измерительных органов устройства.

Расчет показал, что на ЛЭП 220 кВ ЭЦК может находиться на $\underline{Z}_{ЭК}$ в диапазоне от $0,45 Z_{ЭК}$ до $0,55 Z_{ЭК}$. На максимально протяженных нагруженных ЛЭП 220 кВ наличие максимального ПОМ в начале ЛЭП приводит к смещению зоны возможных положений ЭЦК до 6% от $Z_{ЭК}$ в сторону передающей ЭС, и диапазон возможных положений ЭЦК составит от $0,39 Z_{ЭК}$ до $0,55 Z_{ЭК}$.

Для устройства TOP 300 автором разработаны и обоснованы структура измерительного органа и методика выбора уставок для селективного измерительного органа. Подробное исследование изложено в [246]. Даны рекомендации по размещению комплектов АЛАР на транзитных ЛЭП, включающих несколько проходных подстанций.

3.4 Оптимизация испытаний защиты и автоматики в условиях нестационарных режимов с использованием низкочастотной имитационной модели

3.4.1 Разработка структуры модели электропередачи в нестационарных режимах

Испытания с использованием математических и физических моделей являются неотъемлемой частью разработки устройств РЗА [247]. При решении имитационной задачи к моделям предъявляются противоречивые

требования. С одной стороны, необходимо достаточно точное воспроизведение режимов, с другой стороны – удобство использования, возможности автоматизации и приемлемой вычислительной сложности. Кроме того, учитываются возможности быстрого создания и адаптации модели, а также охвата всех необходимых режимов. На практике модели оптимизируют с приоритетом определенных функциональных возможностей.

В части точности модели классифицируют в зависимости от их точности: модель переходных процессов высокой разрешающей способности (малый шаг моделирования, исчерпывающий набор гармоник переходного процесса), модель основных компонент переходного процесса, модели установившихся режимов, модель медленных динамических процессов, модели для исследования устойчивости электроэнергетической энергосистемы. Существует множество задач защиты и автоматики, в которых входная информация представлена составляющими основной гармоники сигналов токов и напряжений, например, в [242,248-250]. Большинство испытаний проводятся в установившихся режимах, хотя существует тенденция к использованию программно-аппаратных комплексов реального и отложенного времени для испытаний в динамических режимах, что нашло отражение и в отраслевых стандартах, например, [227,251,252]. Основные этапы обучения и испытания устройств РЗА проводятся в установившихся режимах, однако исследование динамического поведения также востребовано. В частности, это касается работы алгоритмов и устройств в режимах асинхронной работы отдельных электростанций с остальной энергосистемой.

Для всестороннего исследования измерительных органов дистанционной защиты и АЛАР в нестационарных режимах (в том числе асинхронных) разработан комбинированный метод имитационного моделирования ЛЭП, обладающий повышенной производительностью [253]. Как будет видно, область применения метода может быть расширена и на

режимы понижения и повышения частоты в энергосистеме.

Применяемое в отрасли техническое решение [227] имитационной задачи в указанных условиях основано на всестороннем моделировании в средах PS CAD, MatLab/Simulink, вычисления которых, однако, представляются избыточными, поскольку реализуют высокоточный расчет каждого отсчета электрических величин в условиях медленного изменения внутреннего состояния объекта. Это приводит к высоким требованиям к оборудованию для моделирования [254] или неоправданно большим затратам на испытания в полном объеме объектных параметров. Кроме того, приближенные к реальным объектам модели содержат много входных параметров, задание которых для целей проверки измерительных органов дистанционной защиты и АЛАР видится избыточным. Напротив, средства моделирования с использованием модели основной частоты [255] демонстрируют низкую адекватность. Предложенный метод основан на расчете установившихся режимов энергосистемы и способен правильно воспроизводить их относительно медленное изменение.

Известен частотный комплексный метод расчета [256], при котором синусоидальные сигналы представляются комплексными числами, модуль и аргумент которых эквивалентны амплитуде и фазе сигнала. Пассивным элементам схемы (резистивного, индуктивного, емкостного характера) ставят в соответствие комплексные сопротивления. Метод применим к линейным электрическим цепям, в которых все источники тока и напряжения имеют единую частоту. Если частоты источников не совпадают, имеется возможность расчета цепи на каждой частоте отдельно и определением режима по методу наложения. Пример для двух частот показан на рисунке 3.29. Сначала определяют реакцию (ток или напряжение) $v_1(t)$ имитационной модели объекта (ИМО) на первой частоте $f = f_1$ с привлечением соответствующих источников. Затем находят реакцию $v_2(t)$

на другую частоту $f = f_2$. Искомый сигнал получают как сумму: $v(t) = v_1(t) + v_2(t)$. В рамках испытательной системы этот сигнал подается на модели фильтры РЗА (Φ), результатом работы которых могут быть, например, ортогональные составляющие, представленные вектором во времени $\underline{V}(t)$. Пороговые элементы (ПЭ) измерительных органов РЗА определяют параметры режима, а их значения используются в логических схемах РЗА. Этот метод на основе комплексных моделей и обратного преобразования Фурье эффективен в условиях неизменной частоты источников.

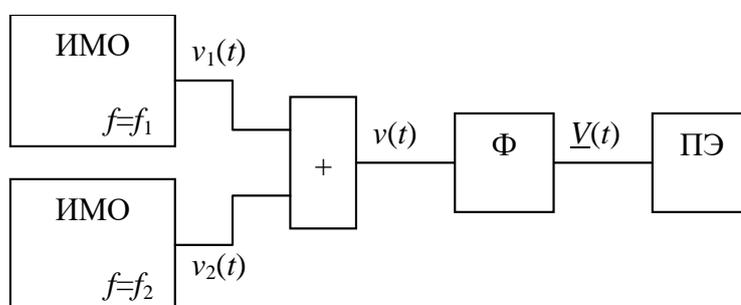


Рисунок 3.29 – Модель в базисе мгновенных величин

Однако некоторые нестационарные режимы, например, синхронные качания не могут быть получены в такой модели. Поэтому такие условия часто воспроизводят по схеме рисунка 3.30, где варьируют параметры одного или нескольких источников модели во времени. Здесь используется та же комплексная модель, однако фазовый угол изменяемых источников является функцией времени (t). Это обуславливает изменение векторов $\underline{V}(t)$. Такие векторы попадают в измерительные органы РЗА непосредственно в рамках модели.

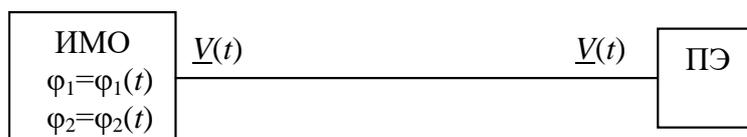


Рисунок 3.30 – Модель в базисе комплексных величин

Например, если моделируется режим синхронных качаний в электропередаче по рисунку 3.31, то аргумент источника напряжения $\underline{E}_1 = E_1 \angle \varphi_1$ может приближенно задаваться зависимостью $\varphi_1 = \varphi_{1\max} \sin(2\pi f_s t + \beta) + \varphi_{10}$, где $\varphi_{1\max}$ и φ_{10} – амплитуда колебаний и начальное значение угла электропередачи; f_s – частота качания; β – начальный угол колебаний. Напряжение \underline{E}_2 при этом может оставаться постоянным.

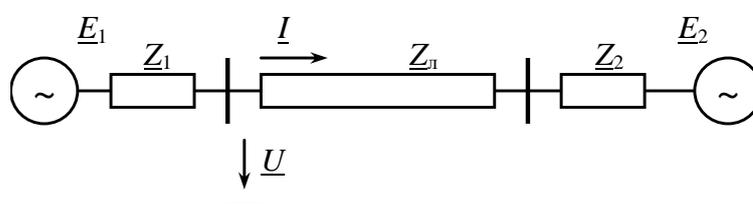


Рисунок 3.31 – Схема исследуемой электропередачи

Этот метод часто используется для аналитического исследования режимов [234] и демонстрирует приемлемые результаты в условиях малых отклонений частоты. Однако при больших отклонениях частоты соответствующие мгновенные сигналы токов и напряжений в более точных моделях показывают отклонение не только фазы и амплитуды, но и частоты. Эта модель ограничивает объем проверки, так как исключает из рассмотрения фильтрацию, выполняемую в устройстве РЗА. Поэтому поведение измерительных органов оценивать по реакции на расчетные векторы модели по рисунку 3.30 уже невозможно. Известно, что характеристики многих фильтров демонстрируют зависимость от частоты измеряемого сигнала [249].

Разработанный алгоритм представлен на рисунке 3.32. Он наследует положительные свойства двух указанных методов и может применяться для решения расширенного круга задач. Основные положения алгоритма:

- электропередачу моделируют с заданным шагом (чаще всего постоянным) во времени при помощи комплексной модели по рисунку 3.30;

- каждый источник модели варьируют по заданному закону в функции времени;

- мгновенные значения токов и напряжений текущего шага $v(t)$ получают обратным преобразованием Фурье (К-М) векторов токов и напряжений $\underline{V}(t)$.

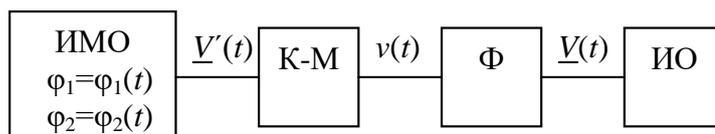


Рисунок 3.32 – Комбинированная модель

Преобразователь (К-М) определяет величину $v(t)$ во временной области для заданного момента времени $t_{\text{ТК}}$:

$$\underline{V}(t_{\text{ТК}}) = M \angle \alpha \rightarrow v(t_{\text{ТК}}) = M \sqrt{2} \sin(\omega t_{\text{ТК}} + \alpha).$$

Таким образом, частота и фаза системы остаются постоянными на протяжении каждого шага моделирования. Результат расчета представляет собой вектор наблюдаемых величин, определенный на заданном промежутке времени $[t_1; t_n]$, составленный из расчетов на отдельных промежутках: $[t_1; t_2)$, $[t_2; t_3)$, ..., $[t_{n-1}; t_n]$. При этом контроль корректности решения и применимости модели осуществляется по величине приращения $\|\mathbf{v}(t_i) - \mathbf{v}(t_i - dt)\|$, где dt – малая величина; $\mathbf{v}(t)$ – вектор всех искомых токов и напряжений.

3.4.2 Реализация комбинированной модели электропередачи и ее оценка при испытаниях модулей защиты

В целях ускорения расчета модель представляет все реактивные пассивные элементы в виде комплексных сопротивлений. Внутреннее состояние элементов от шага к шагу не сохраняется. Поэтому метод не

воспроизводит свободные составляющие электромагнитных переходных процессов в электрической схеме. Однако за счет этого в модели можно задавать шаг расчета в широких пределах без ущерба для точности результатов моделирования. Рисунок 3.33 иллюстрирует совпадение сигналов тока, рассчитанных с шагом 1 мс (жирные точки) и 0,1 мс (сплошная линия).

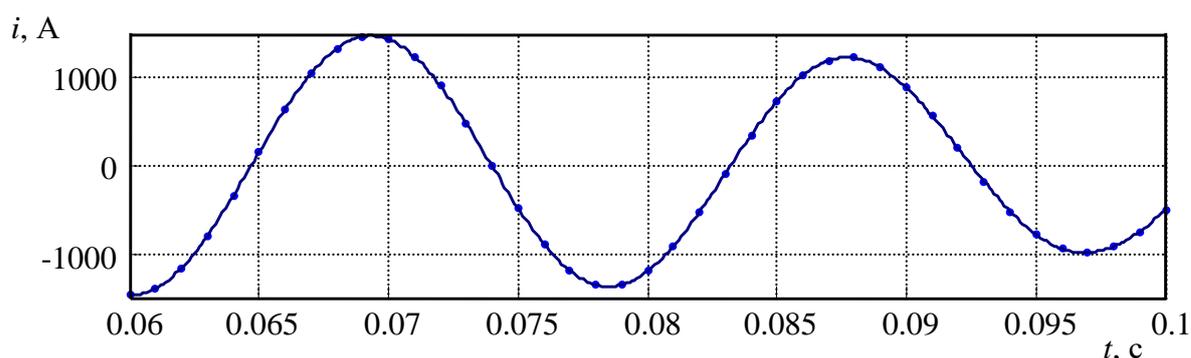


Рисунок 3.33 – Результаты расчета при разном шаге моделирования

Поэтому в отличие от других расчетных средств шаг моделирования выбирается на основе требований защиты к дискретизации входных сигналов. Модель также не нуждается в расчете начальных условий схемы, тогда как любой режим устанавливается в модели с первого шага моделирования. Это дополнительно сокращает вычислительные затраты.

Такая комплексная модель может рассчитываться любым известным методом и не требует разрешения обратных связей. Расчет модели может выполняться на любом заданном интервале $[t_1; t_2]$ и не требует результатов вычислений на предыдущем интервале $[t_0; t_1]$, а потому может быть реализован во многих, в том числе не специализированных программных продуктах. Автором разработана модель в MatLab/Simulink (рисунок 3.34), содержащая блок источников (S), имитационную модель объекта (PSM) и модель РЗА: фильтры ортогональных составляющих (FF), измерительные органы (ME) и логические элементы (L).

В модели может задаваться изменение аргумента или вариация частоты источников. Например, аргумент напряжения стационарного источника варьируется по следующему закону:

$$\varphi(t) = 2\pi \times 49.5 \times t + \pi/6.$$

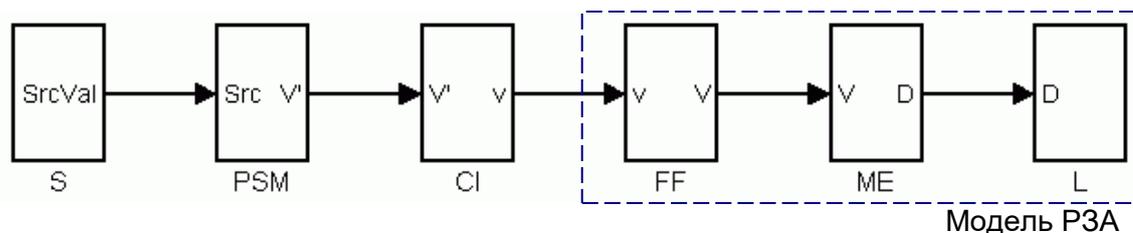


Рисунок 3.34 – Реализация модели в среде MatLab/Simulink

Модель не может быть использована для исследования устойчивости электропередачи, однако в сравнении с аналогами значительно оптимизирована по времени исполнения.

Рисунок 3.35 иллюстрирует работу модели в условиях установившегося нормального режима для электропередачи по рисунку 3.31.

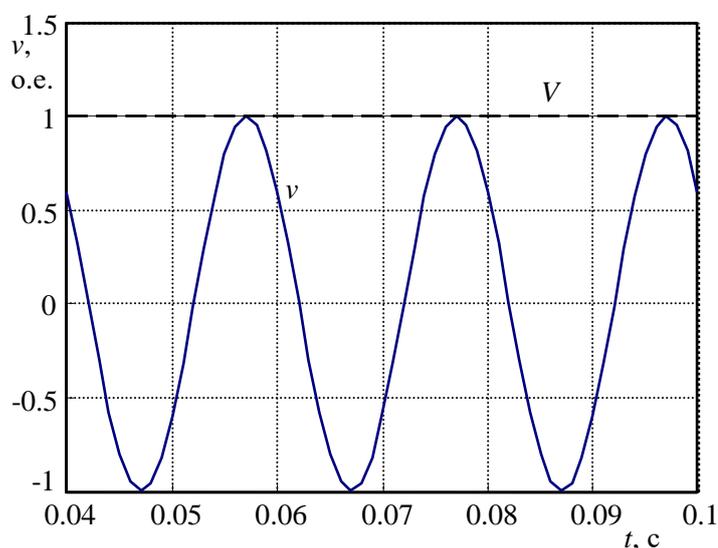


Рисунок 3.35 – Фильтрация сигнала установившегося режима $f = 50$ Гц

Частота сети 50 Гц, напряжение на номинальном уровне (1 о.е.). Отсчеты сигнала на выходе модели $v(t)$ получены на частоте дискретизации

1000 Гц. Ортогональные составляющие $\underline{V}(t)$ сигнала определены на окне шириной 20 мс с использованием фильтра Фурье [257]. Модуль сигнала $V(t) = |\underline{V}(t)|$ на рисунке 3.35 имеет постоянную величину.

Использованный в примере фильтр не имеет частотной компенсации, а потому при исполнении модели на частоте 48 Гц наблюдается периодическое отклонение модуля основной гармоники на рисунке 3.36. Эти примеры демонстрируют отличие моделей, построенных по схемам рисунков 3.30 и 3.32.

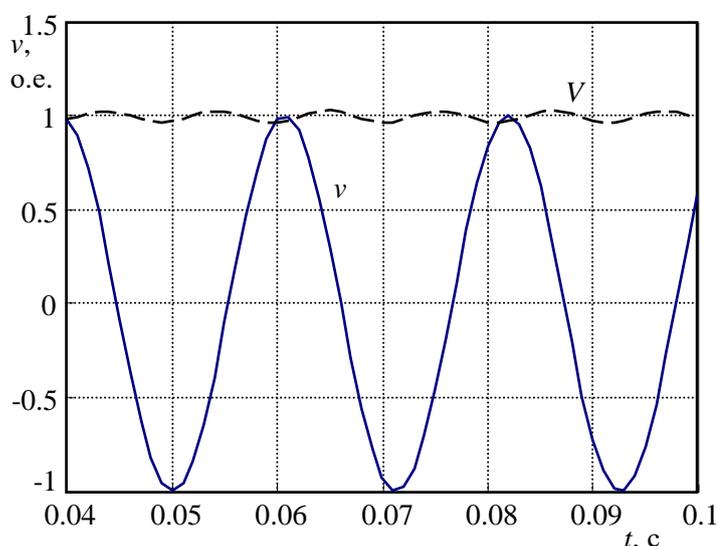


Рисунок 3.36 – Фильтрация сигнала установившегося режима $f = 48$ Гц

Исследовано поведение модели в различных режимах. Выполнено сравнение результатов моделирования с расчетами в программных комплексах PS CAD и MatLab/Simulink/PowerSystemBlockset на примере асинхронного режима электропередачи.

При верификации моделей учитывались следующие факторы [239,240]:

- Спектр сигналов модели ограничен из-за особенностей алгоритма.
- В сигналах модели важно правильное отражение основной частоты сигнала.

- Большинство устройств РЗА оперируют ортогональными составляющими основной гармонике сигналов.

- Годограф комплексного сопротивления как отношения комплексных напряжения и тока в месте установки РЗА является эффективным средством анализа нестационарных режимов [239].

Поэтому сравнение производилось на основе следующих критериев:

- разность мгновенных значений токов и напряжений,
- разность частот сигналов,
- разность ортогональных составляющих токов и напряжений,
- отличие годографов комплексного сопротивления во времени.

Рассмотрим пример асинхронного режима на ЛЭП по рисунку 3.31 со значительным замедлением одного из генераторов. Управляемые источники напряжения модели настроены в соответствии с таблицей 3.5.

Таблица 3.5 – Условия ускорения источника в модели

№	Интервал времени, с	Ускорение, Гц/с	Отклонение частоты к концу интервала времени, Гц	Функция вариации угла $\varphi(t)$, рад
1	0,00 – 0,12	-66,7	8	$2\pi(50t - 33,3t^2) + \varphi_0$
2	0,12 – 0,50	-10,5	12	$2\pi(42t - 10,5t^2) + \varphi_1$
3	0,50 – 0,52	0	12	$2\pi \times 38t + \varphi_2$
4	0,52 – 6,52	+1,3	4	$2\pi(38t + 1,3t^2) + \varphi_3$

Режимы проверки модели включали основные режимы РЗА: нормальный режим, аварийный режим, синхронные качания, асинхронный режим. Работа модели была признана удовлетворительной в диапазонах

вариации параметров в соответствии с таблицей 3.6.

Таблица 3.6 – Операционные диапазоны изменения параметров модели

Параметр	Значение
- минимальная частота источников, Гц	38
- максимальная частота источников, Гц	60
- максимальная разность частот источников, Гц	15
- максимальное ускорение/торможение источников, Гц/с	15

Наименьшая относительная погрешность моделирования наблюдается в частоте (не более 0,02 Гц) и в амплитуде напряжений (не более 1%). Величины токов варьируют в широком диапазоне, а потому в выбранной методике оценки могут иметь большое отклонение. В то же время годограф сопротивления имеет высокую сходимость в диапазонах работы РЗА.

На рисунках 3.37 и 3.38 показаны осциллограммы токов и напряжений, модуль величин на выходе фильтров ортогональных составляющих. Результаты расчета комплексного сопротивления $\underline{Z} = \underline{U} / \underline{I}$ иллюстрирует рисунок 3.39 при изменении параметра времени.

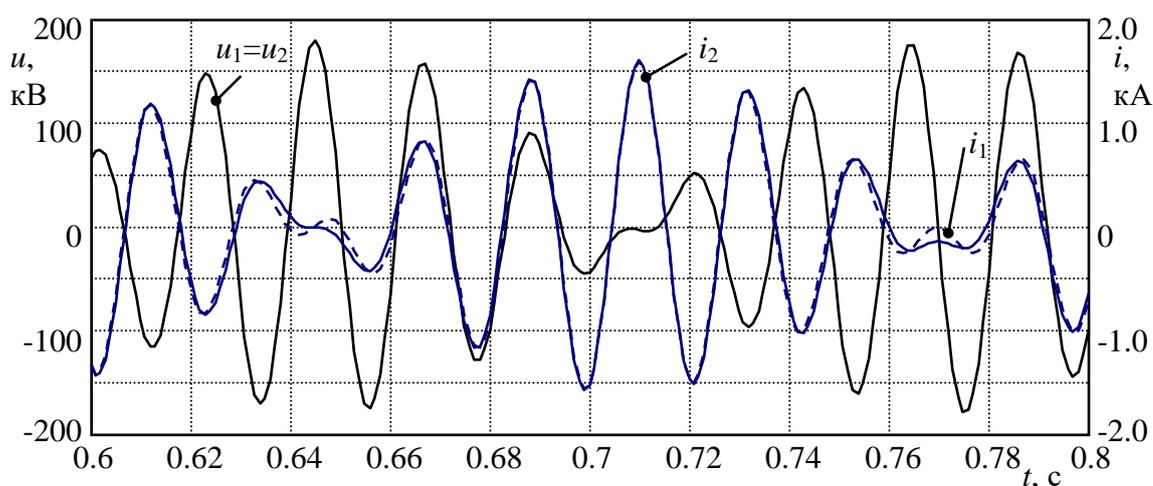


Рисунок 3.37 – Осциллограммы токов и напряжений в асинхронном режиме

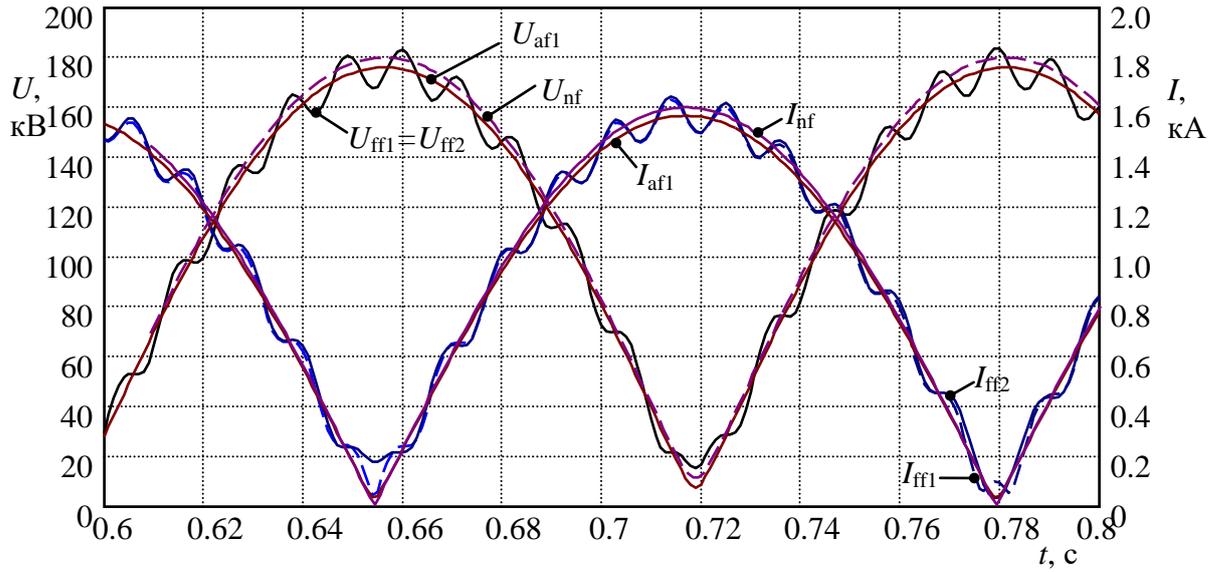


Рисунок 3.38 – Модуль основной гармоники токов и напряжений в асинхронном режиме

Использованы обозначения:

- \underline{Z}_{nf} , \underline{U}_{nf} , \underline{I}_{nf} – теоретически рассчитанные значения в комплексной модели;
- \underline{Z}_{ff} , \underline{U}_{ff} , \underline{I}_{ff} – значения величин с использованием фильтра Фурье;
- \underline{Z}_{af} , \underline{U}_{af} , \underline{I}_{af} – значения величин с использованием адаптивного (с частотной компенсацией) фильтра.

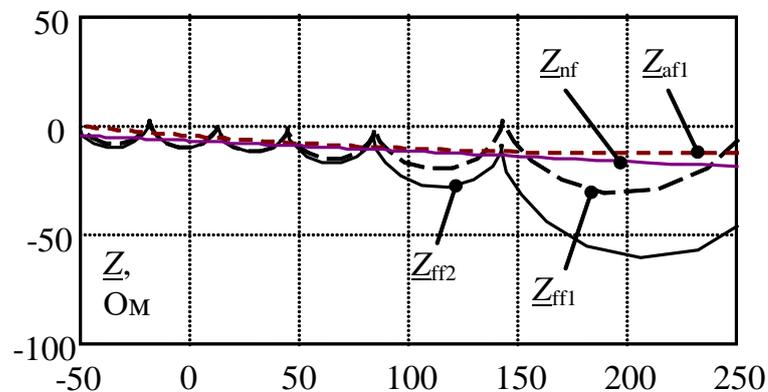


Рисунок 3.39 – Годограф сопротивления в асинхронном режиме

Индексы «1» и «2» относятся к предложенной модели и модели в

MatLab/Simulink/PowerSystemBlockset соответственно.

Годографы подтверждают удовлетворительный расчет в комбинированной модели для целей испытания устройств РЗА. Важно, что кривые токов и напряжений совпадают как в мгновенных (рисунок 3.37), так и в амплитудных значениях.

Погрешность моделирования напряжения не превышает 1% и является незначительной. Разность величин токов проявляется на тех стадиях асинхронного режима, когда действующее значение тока близко к нулю. Отличие мгновенных значений токов может достигать 10% от максимального значения в цикле асинхронного хода. Требования к срабатыванию РЗА в этих режимах отсутствуют.

Таким образом, предложенный комбинированный метод имитационного моделирования электропередачи показал достаточную точность для испытаний устройств и алгоритмов РЗА в нестационарных режимах. Модель подтвердила свою эффективность в настройке измерительных органов сопротивления и тока функции АЛАР и в обучении интеллектуальных систем РЗА. Вычислительные затраты разработанной модели снижены за счет использования комплексного метода и расчета с большим шагом моделирования (может быть равен частоте дискретизации сигналов устройства РЗА).

Результаты исследования использованы при проектировании типовых алгоритмов блокировки при качаниях дистанционной защиты и блокировки при коротких замыканиях АЛАР терминалов серии TOP 300, выпускаемых ООО «Релематика». Для разработанных измерительных органов с подведенными величинами тока исследование в нормальных и аварийных режимах было ускорено в 10 и более раз.

3.5 Анализ опыта испытаний устройств защиты и автоматики в нестационарных режимах

Под руководством и при участии автора разработано программное обеспечение терминалов серии TOP 300 и модификация TOP 300 ПА для исполнения функции АЛАР [258]. Работу алгоритмов можно наблюдать на серии испытаний, проведенных в соответствии с требованиями стандарта [227]. В программно-аппаратном комплексе реального времени RTDS создана модель энергосистемы с генераторами, промежуточным отбором мощности, комплексной нагрузкой (статической и двигательной), ЛЭП различной длины. Однолинейная схема тестовой модели представлена на рисунке 3.40 [227].

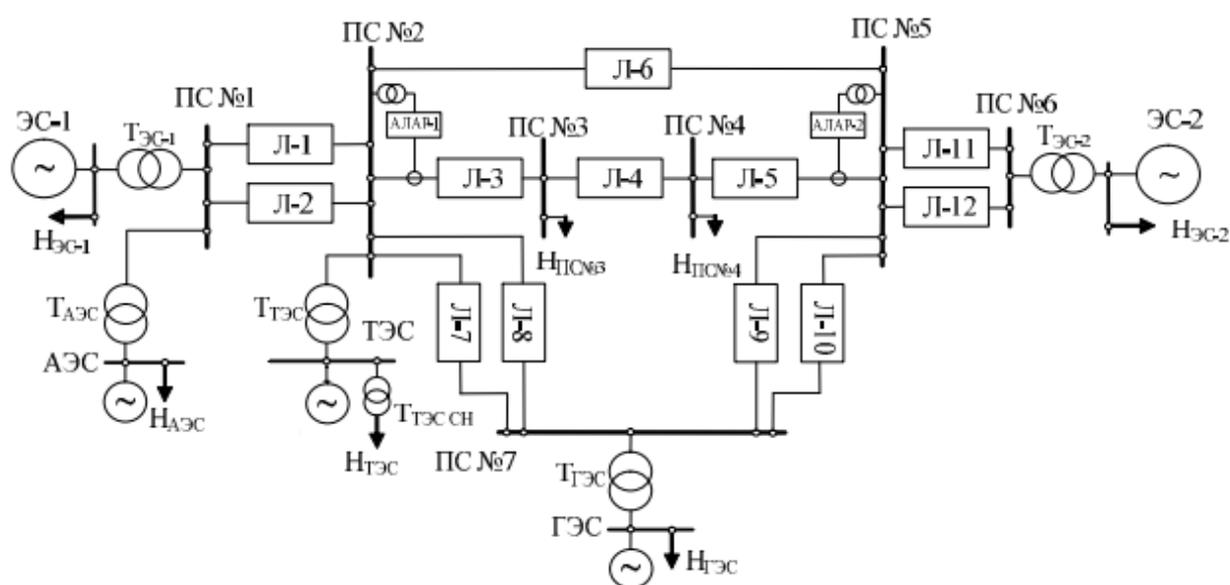


Рисунок 3.40 – Однолинейная схема испытаний функции АЛАР

Устройства АЛАР настроены на контроль транзита «Л-3 – Л-4 – Л-5» и получают информацию о токах и напряжениях на ПС №2 (АЛАР1) и ПС №5 (АЛАР2). Характеристики выявительных (чувствительный, грубый) и селективных измерительных органов комплектов представлены на рисунках 3.41а и 3.41б.

Первые ступени комплектов АЛАР запрограммированы на работу в первом цикле АР, а вторые ступени срабатывают в зависимости от числа циклов асинхронного режима:

- на втором цикле, если скольжение отрицательно;
- на третьем цикле, если скольжение положительно.

Проведены опыты в различных схемно-режимных ситуациях, приводящих к возникновению асинхронного режима. Скольжение в первом цикле асинхронного режима изменялось в широком диапазоне от 0,58 до 4,98 Гц.

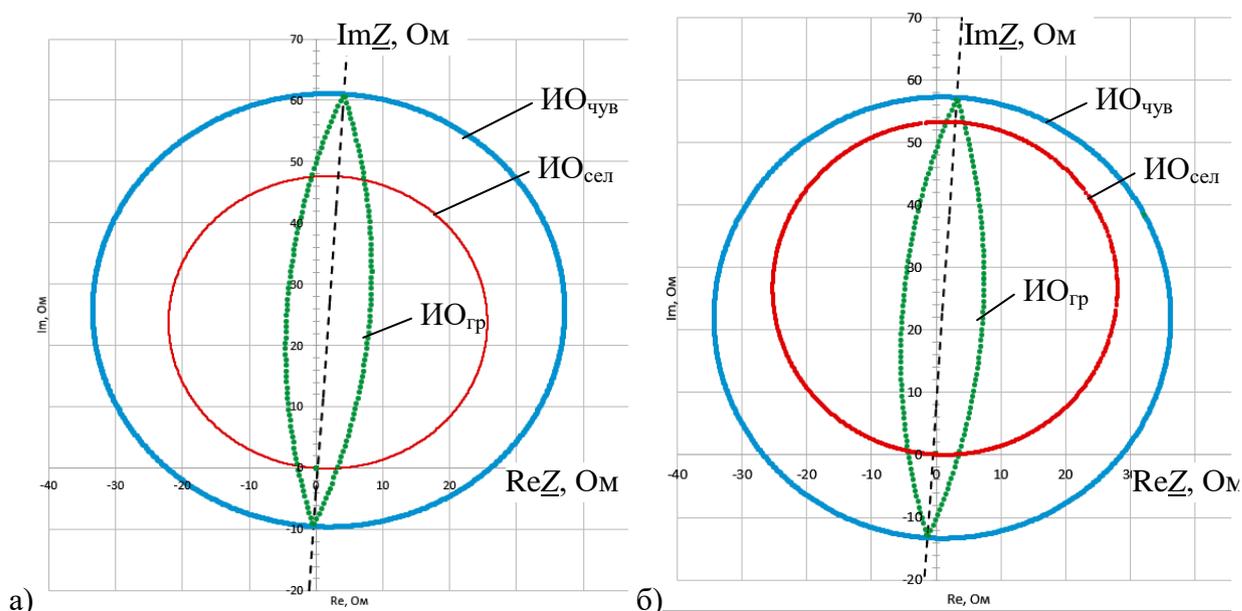


Рисунок 3.41 – Характеристики срабатывания функции АЛАР

На рисунке 3.42 представлена осциллограмма срабатывания функции АЛАР при максимальном скольжении. Она иллюстрирует правильное несрабатывание блокирующих органов, устойчивых к небалансу токов при быстром (с большим скольжением) асинхронном режиме, а также правильное срабатывание выявительного органа на основе реле сопротивления и отключение ЛЭП в начале первого цикла асинхронного режима. Годограф сопротивления фазы А (построен на основе фильтра Фурье, выделяющего

составляющую 50 Гц) показан на рисунках 3.43 и 3.44 в разных масштабах. Первая ступень АЛАР2 срабатывает в точке 1 на рисунке 3.43. Через 50 мс (соответствует точке 2) должна была отключиться Л-5. Однако если этого не произошло, в точке 2 должна сработать первая ступень АЛАР1, а в точке 3 должна быть отключена Л-3 со стороны ПС №2. Как видно из рисунка 3.43, это произойдет только ближе к концу первого цикла асинхронного режима (между отмеченными точками 50 мс).

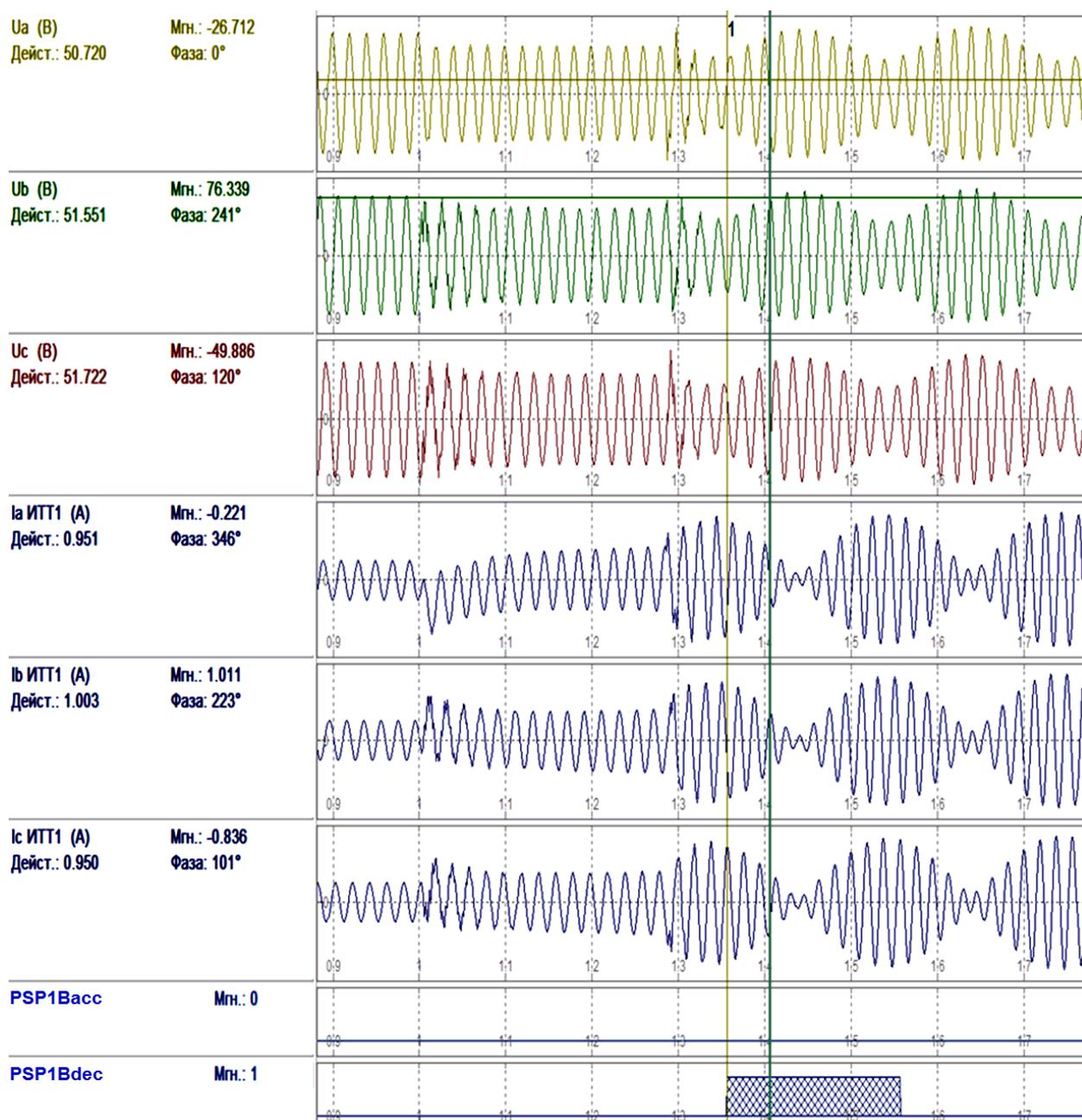


Рисунок 3.42 – Осциллограмма срабатывания первой ступени функции АЛАР

Пример действия вторых ступеней автоматики представлен на рисунке 3.45. Вторая ступень АЛАР2 срабатывает на втором цикле асинхронного режима, а вторая ступень АЛАР1 (в отсутствие разрыва электропередачи) – на третьем. Предложенная реализация управляющих воздействий вторых ступеней обеспечивает резервирование действия АЛАР и выключателей. Если асинхронный режим не отключен со стороны АЛАР2 на втором цикле, то это сделает АЛАР1 на третьем. Излишнее срабатывание функции блокировки при коротких замыканиях в режимах качаний и асинхронного хода не наблюдалось.

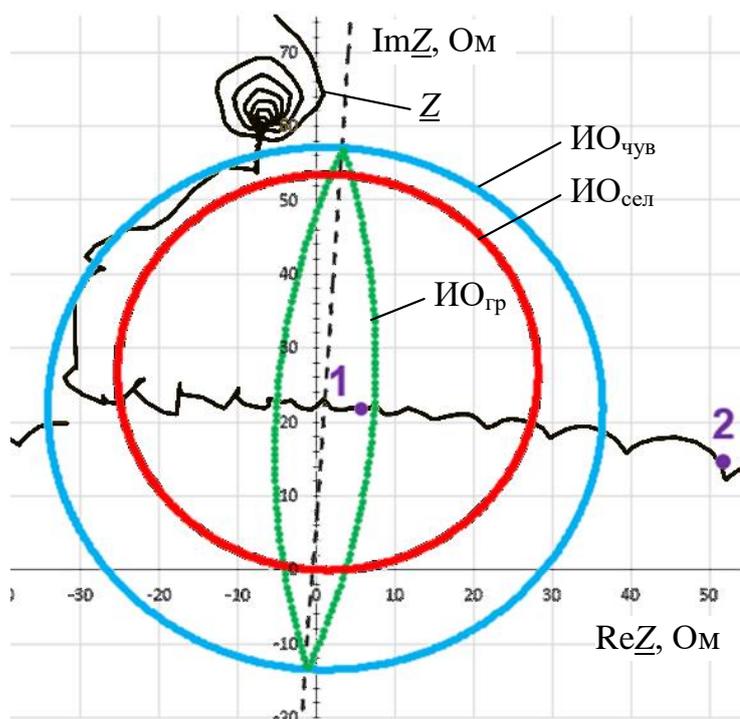


Рисунок 3.43 – Годограф сопротивления \underline{Z} в асинхронном режиме

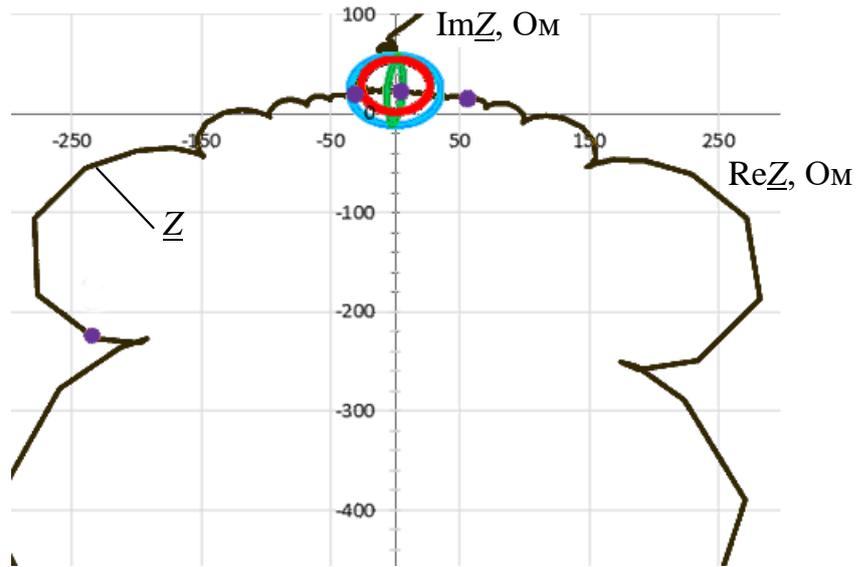


Рисунок 3.44 – Годограф сопротивления \underline{Z} в асинхронном режиме

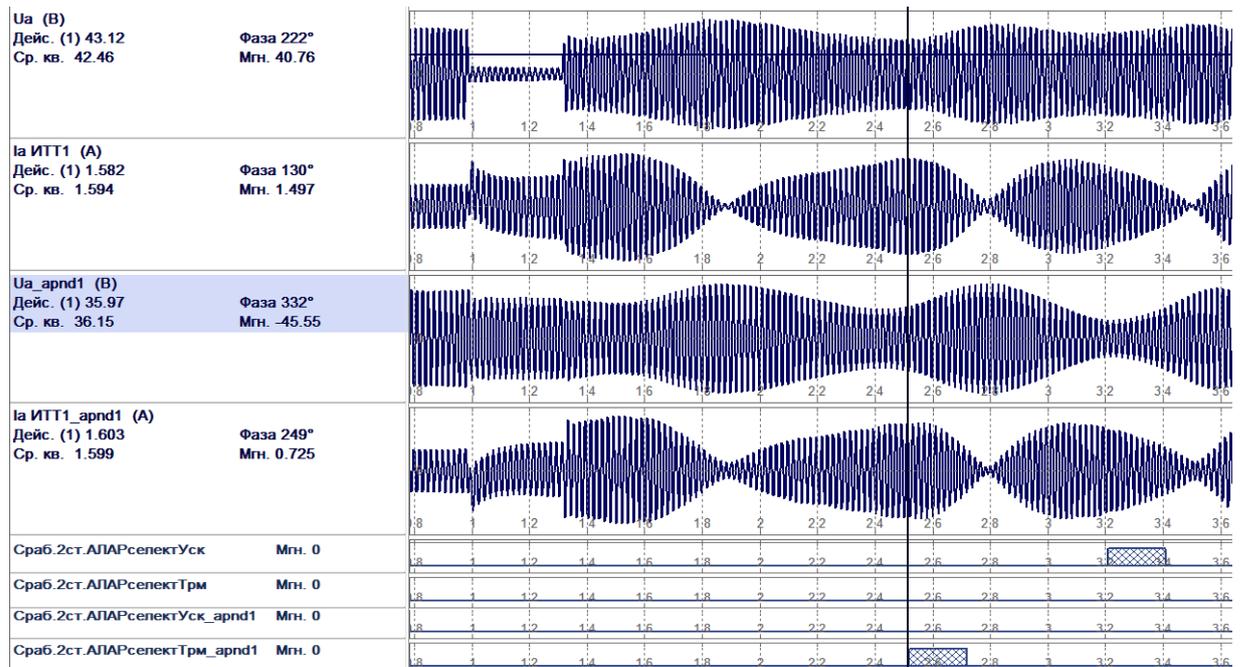


Рисунок 3.45 – Осциллограмма срабатывания второй ступени функции АЛАР

3.6 Выводы

1. Предложен вариант построения низкочастотной каскадной модели участка электрической сети с формированием мгновенных значений токов и напряжений в ее узлах для применения в алгоритмах РЗА. Показана эффективность использования модели в качестве алгоритмического

преобразования в задачах АЛАР, дистанционной защиты и ОМП за счет малой погрешности мгновенных значений и малой задержки расчета. Модель предъявляет малые требования к вычислительным ресурсам устройства РЗА и адаптирована к низкой частоте дискретизации входных токов и напряжений, что облегчает ее внедрение в современные микропроцессорные терминалы.

2. Разработаны и аналитически обоснованы алгоритмы выявления качаний и асинхронного режима в энергосистеме. Определены подходы к временному анализу поведения многофазных фильтров и чувствительности соответствующих токовых измерительных органов. Разработаны структура и методика настройки измерительных органов функции АЛАР для серийного устройства ТОР 300 ПА 5ХХ. Для повышения эффективности испытаний и расчета уставок предложены и использованы оптимизированные подходы к имитационному моделированию энергосистем в нестационарных режимах. Методы отличаются высокой точностью, вычислительной устойчивостью. Оптимизация времени исполнения моделей позволила ускорить функциональные испытания измерительных органов терминала в 10 и более раз.

3. Разработанные алгоритмы прошли апробацию в ходе сертификационных испытаний функции АЛАР. Подтверждена высокая устойчивость измерительных органов тока к нестационарным режимам и чувствительность к повреждениям.

4. Испытания подтвердили эффективность структуры измерительных органов сопротивления устройства АЛАР и методик их настройки.

Глава 4 Развитие средств определения места повреждения по параметрам аварийного режима на основе алгоритмов обработки сигналов токов и напряжений

4.1 Методология исследования явления распознаваемости в задаче определения места повреждения

Рассмотрим основы методологии исследования распознаваемости коротких замыканий в задаче ОМП ЛЭП по одностороннему наблюдению параметров аварийного режима.

Автоматизация процесса оценки расстояния до места повреждения выполняется с использованием специализированных терминалов ОМП, функций ОМП в рамках многофункциональных устройств релейной защиты и регистрации аварийных процессов, а также в программных комплексах на автоматизированных рабочих местах служб РЗА [259]. Наибольшее распространение получил метод ОМП по параметрам аварийного режима (ПАР), измеренным на основной гармонике токов и напряжений. Анализу практики использования различных дистанционных алгоритмов ОМП посвящено множество публикаций [38,146,260-262]. Выявлены основные факторы погрешностей [151], среди которых наиболее значимыми считаются ошибки измерения параметров аварийного режима, ошибки задания исходных данных о наблюдаемой ЛЭП, методическая погрешность использованных алгоритмов. Усиливают погрешность неблагоприятные режимные условия, параметры повреждения (удаленность повреждения от места измерения, переходное сопротивление) [37,263]. Разработаны методики компенсации отдельных видов погрешностей [25], созданы и использованы для целей ОМП измерительные преобразователи с новыми, улучшенными характеристиками [264]. Все вместе и по отдельности они

показывают положительные результаты в эксплуатации, однако в экстремальных условиях не достигают желаемой нулевой погрешности ОМП. Причина состоит в существовании физического предела распознавания места повреждения на ЛЭП [265]. Задача его исследования и описания является актуальной для правильной постановки задачи и оценки опыта ОМП в эксплуатации. Далее описано исследование эффектов нераспознаваемости КЗ на ЛЭП в задаче ОМП по ПАР.

4.1.1 Постановка задачи определения ограничений в распознавании коротких замыканий линий электропередачи

Проведены исследования нераспознаваемости КЗ на ЛЭП в рамках методологии информационного анализа [266], представленной в Главе 1. Явление нераспознаваемости возникает вследствие совпадения доступных устройству ОМП измерений, наблюдаемых при повреждениях в разных точках сети. Для математического описания этого явления необходимо задаться параметрами объекта \mathbf{x} и моделью объекта – преобразованием F . Тогда измеряемые параметры аварийного режима \mathbf{z} определяет процедура:

$$\mathbf{z} = F(\mathbf{x}).$$

Обобщенный вектор \mathbf{x} охватывает все значимые параметры модели, как аварийные, так и режимные. Режим КЗ характеризуется в первую очередь аварийными параметрами – координатой места замыкания x_f и переходным сопротивлением R_f . Параметр x_f имеет отношение к важнейшему показателю локатора – точности распознавания места КЗ, а параметр R_f – к чувствительности локатора к повреждениям электрической системы. Далее, говоря о режиме системы, будем иметь в виду вектор параметров имитационной модели

$$\mathbf{x} = [x_f, R_f, \mathbf{x}_{\text{norm}}]^T,$$

где \mathbf{x}_{norm} – подвектор нормальных параметров.

Обобщенный вектор \mathbf{z} охватывает измерения напряжений и токов трех фаз, используемых при одностороннем наблюдении ЛЭП, включая их модули и взаимные фазовые соотношения. Для наиболее полного распознавания аварийных режимов вектор \mathbf{z} содержит составляющие как текущего (аварийного), так и предшествующего режима. Это соответствует наиболее полной информации, доступной ОМП по параметрам аварийного режима. Для краткости будем использовать обозначение $\mathbf{z}(\mathbf{x})$.

Явление нераспознаваемости выражается в идентичности наблюдений в разных режимах объекта через функцию dist , применяемую в пространстве замеров и в пространстве объектных параметров:

$$\text{dist}(\mathbf{z}([x_{f1}, R_{f1}, \mathbf{x}_{\text{norm}1}]^T), \mathbf{z}([x_{f2}, R_{f2}, \mathbf{x}_{\text{norm}2}]^T)) = 0;$$

$$\text{dist}(x_{f1}, x_{f2}) > \varepsilon_x.$$

Более практичным для технических систем является контроль величины погрешности измерений:

$$\text{dist}(\mathbf{z}(\mathbf{x}_1), \mathbf{z}(\mathbf{x}_2)) < \varepsilon_z. \quad (4.1)$$

Для заданной точки \mathbf{x}_1 может быть определена область объектного пространства ΔG , все точки которой $\mathbf{x}_2 \in \Delta G$ удовлетворяют неравенству (4.1). В задаче ОМП важной является проекция этой объектной области на ось параметра x_f и ее границы:

$$\Delta \mathbf{X}_f = \text{Pr}_{x_f} \Delta G;$$

$$x_{f,\text{inf}} = \inf \Delta \mathbf{X}_f; \quad x_{f,\text{sup}} = \sup \Delta \mathbf{X}_f.$$

Эта область показывает размытие режима КЗ с координатой $x_f = x_{f1}$, $\mathbf{x}_1 = [x_{f1}, R_{f1}, \mathbf{x}_{\text{norm1}}]^T$ в преобразовании F при вариации объектных параметров в априорно известной области G . Здесь обнаруживается зависимость величины области ΔG от аварийного параметра R_{f1} , что отмечено также в [267,268].

При исследовании явления нераспознаваемости в главе 1, а также в более сложных моделях ЛЭП в [269] показано, что при увеличении R_{f1} достигается значение, когда интервал $[x_{f,\text{inf}}; x_{f,\text{sup}}]$ охватывает весь диапазон вариации параметра x_f от 0 до длины линии L . В настоящей работе вектор \mathbf{x}_1 варьируется в части области G с меньшими R_f , то есть в рамках объектной характеристики ЛЭП [151].

Рассматривается трехфазное КЗ на модели типовой одноцепной воздушной ЛЭП 110 кВ длиной 30 км. Аварийные параметры обозначены на рисунке 4.1. Нормальные параметры модели включают эквивалентные параметры энергосистем.

На рисунках 4.2-4.5 приведены минимальные значения целевой функции, используемой в (4.1) для поиска области смежных режимов $\mathbf{x}_2 = [x_f, R_f, \mathbf{x}_{\text{norm2}}]^T$ для заданного режима $\mathbf{x}_1 = [x_{f1}, R_{f1}, \mathbf{x}_{\text{norm1}}]^T$:

$$\sigma(x_f, R_f) = \min_{\mathbf{x}_{\text{norm2}}} \text{dist}(\mathbf{z}([x_{f1}, R_{f1}, \mathbf{x}_{\text{norm1}}]^T), \mathbf{z}([x_f, R_f, \mathbf{x}_{\text{norm2}}]^T)). \quad (4.2)$$

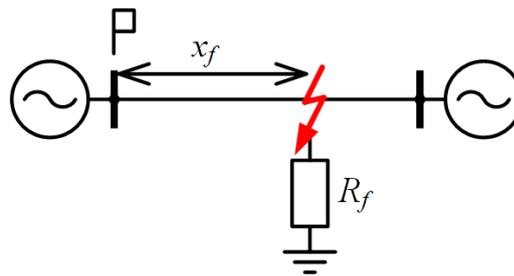


Рисунок 4.1 – Модель одноцепной ЛЭП

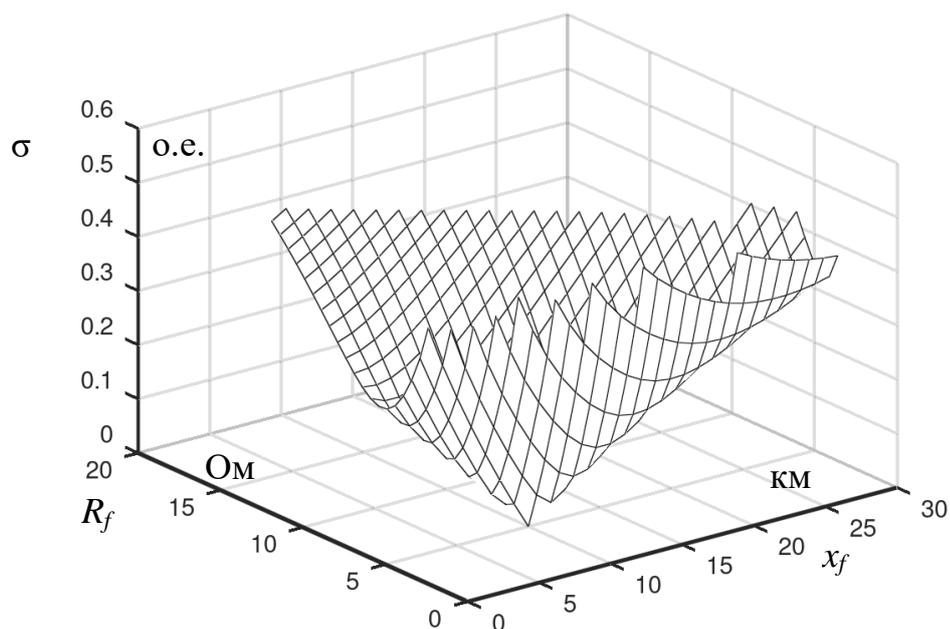


Рисунок 4.2 – Изометрический график целевой функции в зависимости от аварийных параметров

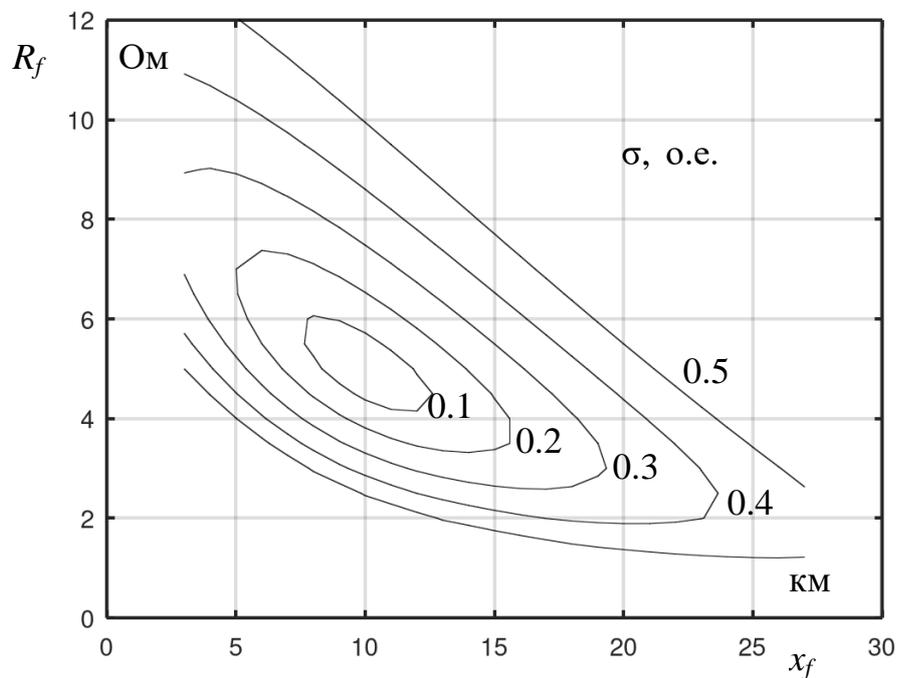


Рисунок 4.3 – Изолинии целевой функции в зависимости от аварийных параметров

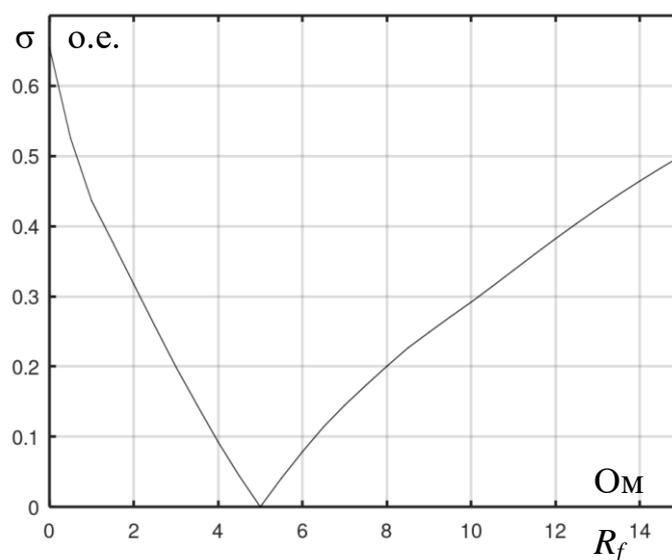


Рисунок 4.4 – Целевая функция как зависимость от аварийного параметра R_f

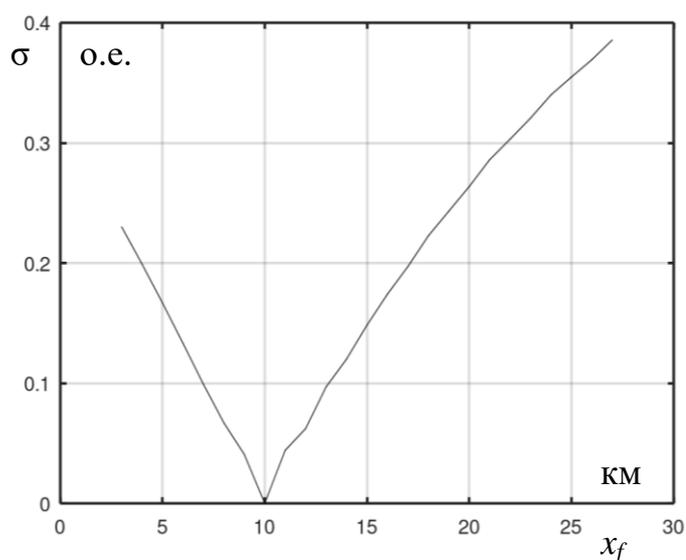


Рисунок 4.5 – Целевая функция как зависимость от аварийного параметра x_f

Здесь использована операция `dist` с нормированием отдельных компонент разностного вектора, а значения минимизированы по всем иным объектным параметрам. Функция σ изображена в эквиваленте евклидовой нормы. Из рисунков видно, что функция обладает благоприятными для оптимизации свойствами: единственный минимум в заданной точке (x_{f1}, R_{f1}) и гладкая форма в зависимости от аварийных параметров,

наблюдается излом в целевой точке. Однако нужно отметить, что функция пологая в масштабах ожидаемых погрешностей, что неминуемо приведет к возрастанию погрешности оценки x_f при повышении неопределенности измерений или объектных параметров. Из рисунка 4.2 видно, какие режимы могут иметь сходное наблюдение с заданным режимом: более удаленные с меньшим переходным сопротивлением и более близкие с большим переходным сопротивлением. При этом каждому такому режиму соответствует свое соотношение эквивалентных ЭДС на концах линии. Так, в принятой модели отличие угла передачи от заданного в \mathbf{x}_1 составляет от 1 до 3 градусов. Функция σ обнаруживает одинаковую чувствительность к изменению переходного сопротивления на 1 Ом и к изменению координаты повреждения на 3 км.

Несмотря на то, что крутизна целевой функции зависит от преобразования, применяемого к уставочному вектору \mathbf{z} , представленное исследование распознаваемости опирается на неравенство (4.1), которое оперирует только удаленностью входных замеров и не зависит от преобразований над замерами и алгоритма ОМП.

Целевая функция (4.1) обнаруживает различную чувствительность в зависимости от объектных параметров целевого режима. Оценка невязки по отношению к режиму \mathbf{x}_1 в заданной точке распознавания с координатой x_f :

$$\sigma_x(x_f) = \min_{R_f} \sigma(x_f, R_f).$$

На рисунке 4.6 изображены графики функции $\sigma_x(x_{f1} + \Delta x)$ (график $\sigma(x_{f1} - \Delta x)$ численно очень близок) в зависимости от координаты x_{f1} при $R_{f1} = 0$ Ом (кривые 4 и 3) и $R_{f1} = 5$ Ом (кривые 2 и 1). Отклонение координаты Δx принято 0,1 км (кривые 3 и 1) и 0,2 км (кривые 4 и 2). Как видно, в окрестности целевого режима наблюдается линейная зависимость

невязки от отклонения Δx вне зависимости от R_{f1} . Также очевидно, что при удалении места замыкания от места наблюдения невязка в окрестности целевого режима быстро снижается, что свидетельствует о сближении режимов в окрестности.

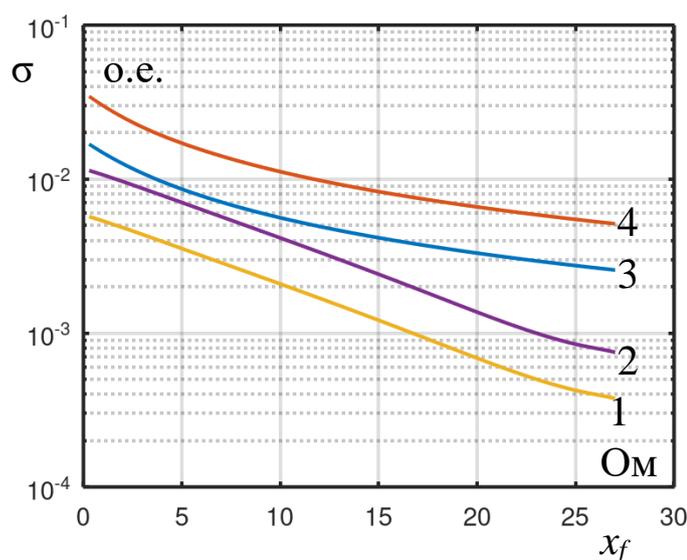


Рисунок 4.6 – Невязка в окрестности истинного места повреждения при одностороннем наблюдении.

4.1.2 Оценка методической погрешности средств определения места повреждения

Источником методической погрешности процедуры ОМП является несоответствие имитационной модели (реального объекта) $F(\mathbf{x})$ и алгоритмической модели $\Phi(\mathbf{x}')$. Функция алгоритмической модели (АМО) определена на множестве $\mathbf{x}' \in G'$, которое описывает явления этой модели и в общем случае не способно охватить все многообразие реального объекта и не совпадает с областью параметров реального объекта. Кроме того, собственно преобразование $\Phi(\mathbf{x}')$ может не учитывать все особенности наблюдаемых явлений. Действительно, равенство $F(\mathbf{x}) = \Phi(\mathbf{x}')$ не должно пониматься как тождество моделей и их параметров, но лишь как некоторое приближение

или отображение последних [270]. Анализ разных видов АМО выходит за рамки исследования нераспознаваемости. Определяется влияние других факторов.

Методы ОМП, основанные на одностороннем наблюдении, оказываются чувствительными к погрешности задания объектных параметров. Если для удельных параметров ЛЭП задана область определения, то распознавание приобретает относительную ошибку, приблизительно равную относительной погрешности объектного параметра; то есть абсолютная погрешность ОМП линейно возрастает с увеличением расстояния до места замыкания и не зависит от переходного сопротивления.

Модель ЛЭП по рисунку 4.1 имеет однозначное теоретическое решение относительно x_f при $\varepsilon_z \rightarrow 0$ в области, ограниченной объектной характеристикой, при условии, что варьируется малое число объектных параметров. Оценим методическую погрешность зависимостями величин $\max(\Delta x_f)$, $\min(\Delta x_f)$ от расстояния до КЗ x_{f0} , ограничив R_{f0} пределами объектной характеристики ЛЭП и варьируя нормальные параметры обоих режимов во всем допустимом диапазоне:

$$\Delta x_f = x_{f2} - x_{f0};$$

$$\text{dist}(\mathbf{z}([x_{f0}, R_{f0}, \mathbf{x}_{\text{norm}0}], \mathbf{z}([x_{f2}, R_{f2}, \mathbf{x}_{\text{norm}2}]))) < \varepsilon_z.$$

Например, если сопротивление удаленной системы может изменяться в некотором диапазоне, то возможна погрешность $\max(\Delta x_f)$, изображенная на рисунках 4.7 и 4.8 (в положительную и отрицательную стороны). Близкие низкоомные замыкания имеют высокую устойчивость к погрешности задания объектных параметров. По графику видно, что при удаленных металлических КЗ погрешность может превысить 0,3 км (составляет более 0,1% длины ЛЭП).

По рисунку 4.8 также показано стрелкой основное направление

возрастания погрешности, по которому в дальнейшем будем оценивать различные условия функционирования локатора. Так, кривая 1 на рисунке 4.9 показывает значения этой функции в проекции на ось параметра x_f .

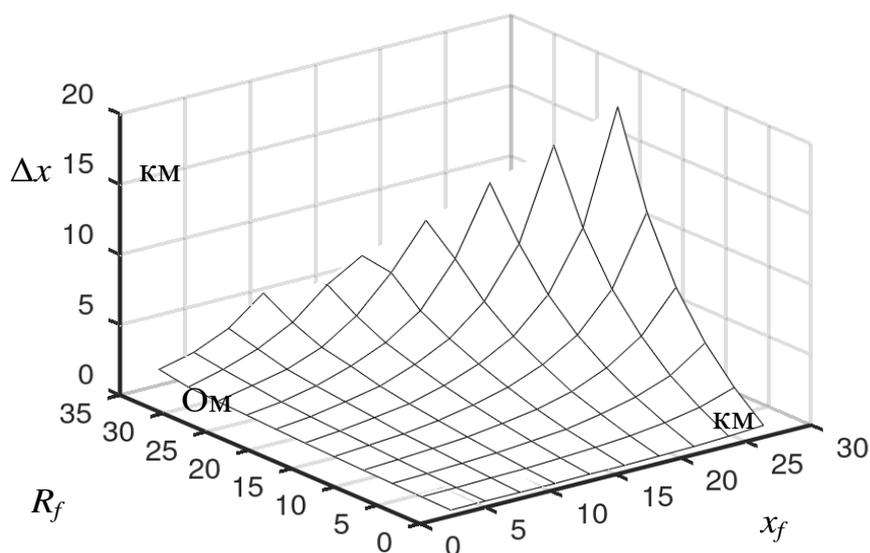


Рисунок 4.7 – Изометрический график методической погрешности одностороннего ОМП по ПАР при вариации сопротивления удаленной системы

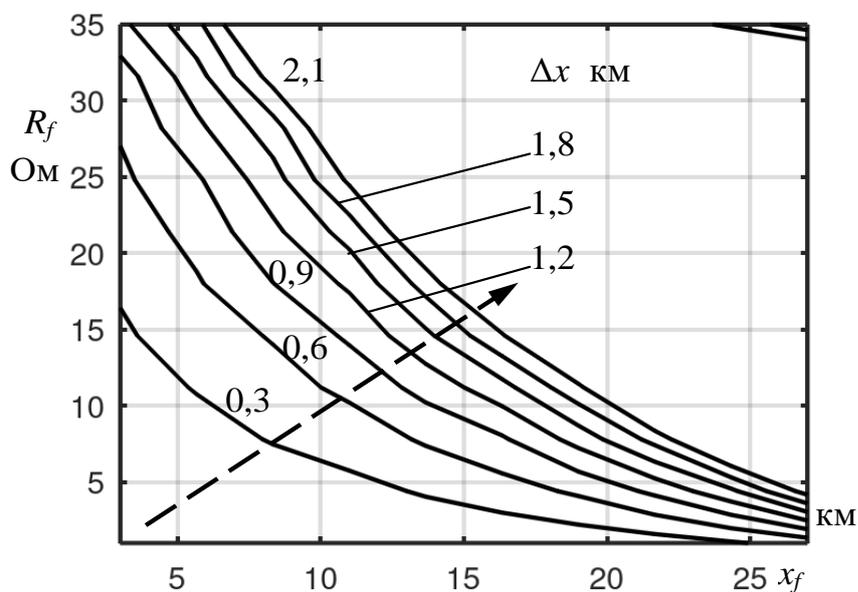


Рисунок 4.8 – Изолинии методической погрешности одностороннего ОМП по ПАР при вариации сопротивления удаленной системы

К неизбежной методической погрешности одностороннего метода

ОМП по ПАР можно отнести режимы, отвечающие условию (4.1) в некоторой окрестности истинного места КЗ, то есть точки с малым значением градиента функции $\sigma(x_f, R_f)$. Кривая 2 на рисунке 4.9 является графиком функции $\max(\Delta x_f)$ (график $\min(\Delta x_f)$ симметричен) при значениях ε_z , эквивалентных относительной погрешности замера 0,1%. Как видно, максимальная погрешность возросла примерно в 1,5 раза относительно кривой без погрешности измерения.

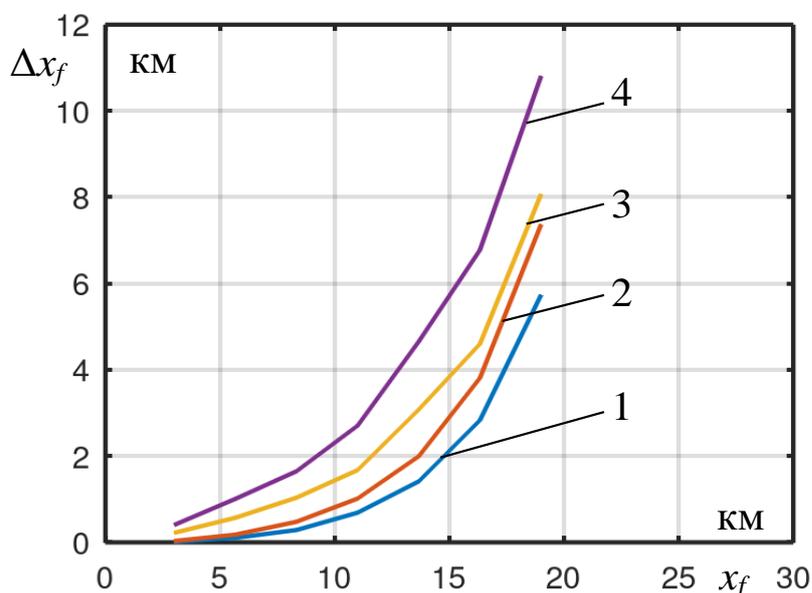


Рисунок 4.9 – Погрешность одностороннего ОМП по ПАР при значительной погрешности в токах

4.1.3 Оценка погрешности средств определения места повреждения в условиях ограниченной точности измерений

Наиболее важным и очевидным фактором погрешности является ограниченная точность измерений, доступных локатору. Источники измерительных погрешностей для средства ОМП связаны с измерительными преобразователями тока и напряжения, измерительными преобразователями в устройстве регистрации режима для целей ОМП, способами выделения

ортогональных составляющих. В случае лабораторных испытаний дополнительным источником погрешности служат имитационная модель и программно-аппаратные средства моделирования электрических процессов в реальном времени.

В эксперименте принималось, что измерение истинных значений ортогональных составляющих основной частоты производится с полной погрешностью не более 1% в напряжениях и не более 10% в токах. Рассчитаны зависимости $\max(\Delta x_f)$ по линии максимального нарастания погрешности: погрешность измерения тока 5% (кривая 3 на рисунке 4.9) и 10% (кривая 4 на рисунке 4.9), погрешность измерения напряжения 0,5% (кривая 1 на рисунке 4.10) и 1,0% (кривая 2 на рисунке 4.10).

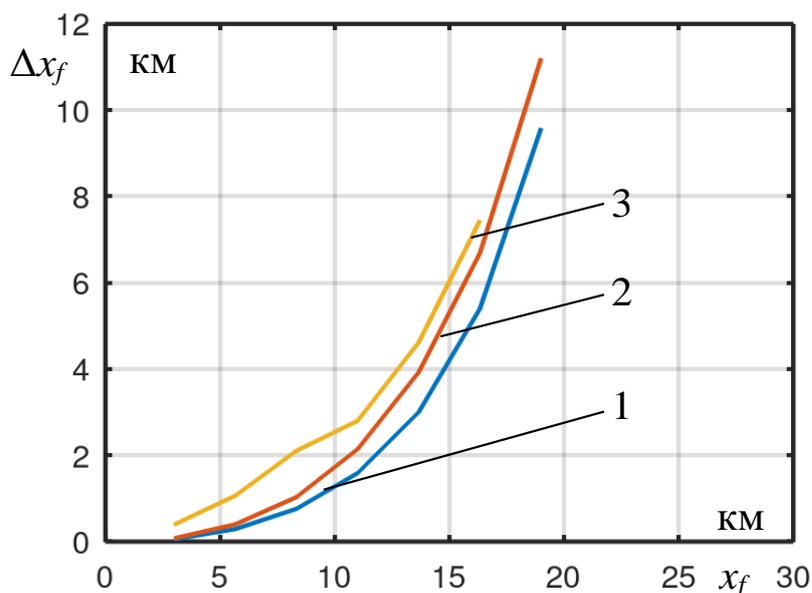


Рисунок 4.10 – Погрешность одностороннего ОМП по ПАР при значительной погрешности в напряжениях

Кривая 3 на рисунке 4.10 показывает совместный эффект, оказываемый максимальными погрешностями измерения тока и напряжения. Как и в предыдущих экспериментах, погрешность $\max(\Delta x_f)$ возрастает по

мере увеличении x_f и R_f , пока не достигается эффект абсолютной нераспознаваемости. В поле этих параметров погрешность ОМП может быть оценена с использованием рисунка 4.8. Для этого уровни погрешностей на изолиниях подстраивают под значения кривых на рисунках 4.9 и 4.10 в соответствии с заданной погрешностью. Чувствительность к погрешности в напряжениях du значительно выше, чем к погрешности в токах di . Используем линейную модель погрешности для каждой точки x_f и определим ее параметры:

$$du \cdot k_u + di \cdot k_i + k_0 = \Delta x_f .$$

На рисунке 4.11 можно видеть, что в диапазоне от 5 до 20 км отношение k_u/k_i составляет от 2 до 7, причем с удалением точки КЗ и возрастанием переходного сопротивления отношение растет.

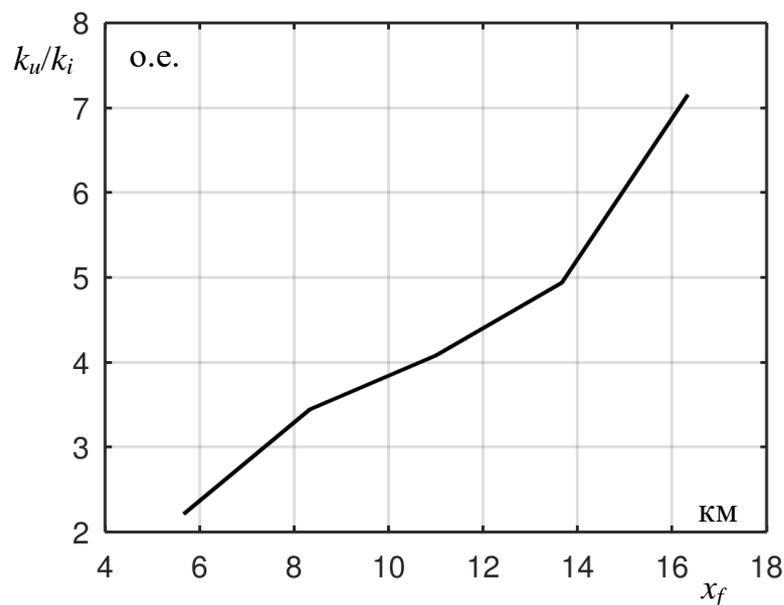


Рисунок 4.11 – Соотношение чувствительности к погрешности в напряжениях k_u и чувствительности к погрешности в токах k_i в зависимости от расстояния

Полученные результаты являются основой методики оценки потенциальной погрешности одностороннего метода ОМП по ПАР [271]. Для

этого выявляют погрешность Δx_f для заданной ошибки в измерениях, а затем описывают зависимость $\Delta x_f(du, di)$, используя графики на рисунках 4.7, 4.8 и 4.11. Результаты расчета могут быть использованы для выбора наиболее эффективного места установки устройства ОМП и обоснования необходимости применения алгоритмов с двухсторонним измерением, то есть с расширенной по сравнению с односторонним методом информационной базой. Результаты также полезны для оценки опыта эксплуатации средств ОМП и для определения обоснованных требований к точности средств ОМП.

Исследование показало, что на ЛЭП может наблюдаться целый ряд режимов с сильными информационными признаками повреждения, в которых слабо сказываются явления неопределенности и нераспознаваемости. К таким режимам относятся повреждения ближе к началу наблюдаемой ЛЭП через малое переходное сопротивление. Для успешной работы ОМП в таких режимах допустимо использовать измерительные преобразователи с низкой точностью. В других режимах – повреждения вблизи удаленной системы через переходное сопротивление – наблюдается широкий интервал неопределенности координаты места повреждения, в пределе переходящий в неотличимость повреждений по всей длине ЛЭП. Полученные характеристики показывают минимально достижимую погрешность, тогда как диапазоны погрешности практических реализаций методов ОМП могут только увеличиваться согласно их чувствительности к погрешности.

4.2 Иллюстрация метода интервальной локации повреждений однородной линии электропередачи

Задаются имитационная модель электропередачи и объектная область изменения ее параметров G . Координата места повреждения – одна из

координат объектного вектора: $x_1 \in (0, l)$, где l – длина линии (рисунок 4.12). Локатор предстает в виде алгоритмической модели, преобразующей наблюдаемые величины в значения $x_f = F(\mathbf{x})$, где F – оператор преобразования фиксированного m -мерного вектора $\mathbf{x} = [x_1, x_2 \dots x_m]^T$, принадлежащего области G объектного пространства, в число на оси x_f одномерного в данном случае уставочного (алгоритмического) пространства.

Если ситуация меняется и теперь фиксируется только координата $x_1 = x_{11}$, а все прочие параметры количеством в $m-1$ свободно варьируются в своих пределах, то вектор \mathbf{x} принадлежит уже не всей области G а только ее подобласти G_1 (поверхности) (рисунок 4.13), и отображается не на всю ось x_f , а только на ее отрезок $\Delta x_{f1} = F(G_1)$, заключенный между крайними значениями $x_{f1,inf}$ и $x_{f1,sup}$ (рисунок 4.13). В лучшем случае истинная координата x_{11} располагается посередине отрезка Δx_{f1} , но скорее всего она будет смещаться в ту или другую сторону, а в худшем случае вообще уходит за его пределы.

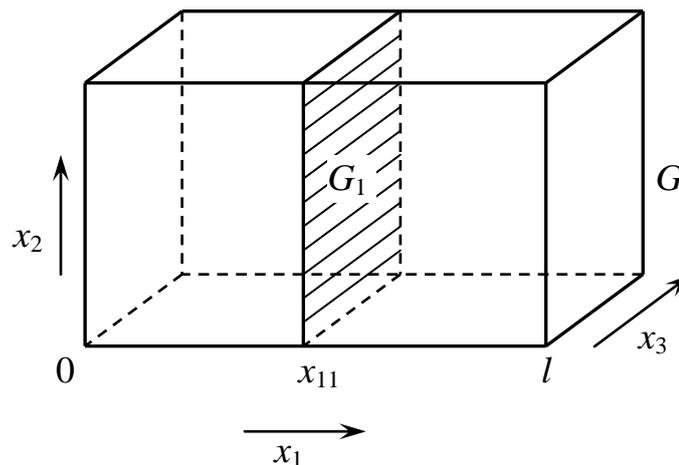


Рисунок 4.12 – Объектная область G в трехмерном пространстве

На первый взгляд, протяженность отрезка Δx_{f1} и положение в нем

или относительно него координаты x_{11} вполне свидетельствует о точности локатора повреждений. Однако на практике локатор оценивает значение x_f , а истинная координата места повреждения неизвестна, и в такой ситуации судить о точности значения x_f невозможно.

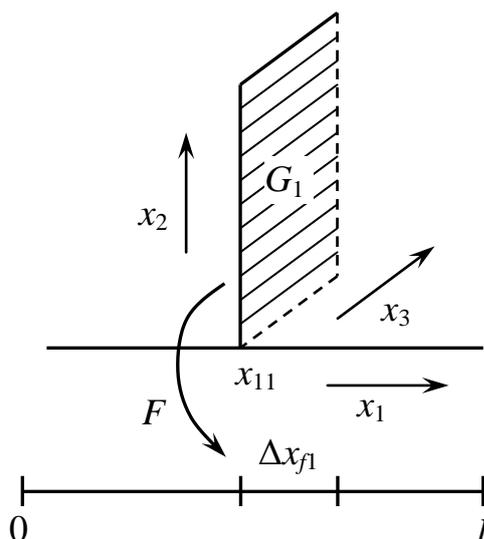


Рисунок 4.13 – Отображение объектной подобласти на уставочную ось

Противоречие преодолевается интервальным подходом к оцениванию координаты места повреждения. Интервальный подход изменяет постановку задачи с прямой на обратную. Прямая задача построена на переходе из объектного пространства в уставочное. Обратная задача ставится в предположении, что для известного значения x_f требуется определить интервал возможных объектных значений координаты $x_1 \in (x_{11,\text{inf}}, x_{11,\text{sup}})$, непременно заключающий в себе истинное значение x_{11} так, что $x_{11,\text{inf}} < x_{11} < x_{11,\text{sup}}$.

Интервальный локатор действует по следующему алгоритму. Обратное преобразование F^{-1} ведет от известного значения x_f к имитационной модели, к подобласти объектного пространства

$G_{1f} = F^{-1}(x_f)$ (рисунок 4.14), заведомо включающей в себя подобласть $G_1 \subset G_{1f}$. Затем подобласть G_{1f} проецируется на ось x_1 , что определит искомый интервал $\Delta x_{11} = \text{Pr}_{x_1} G_{1f}$.

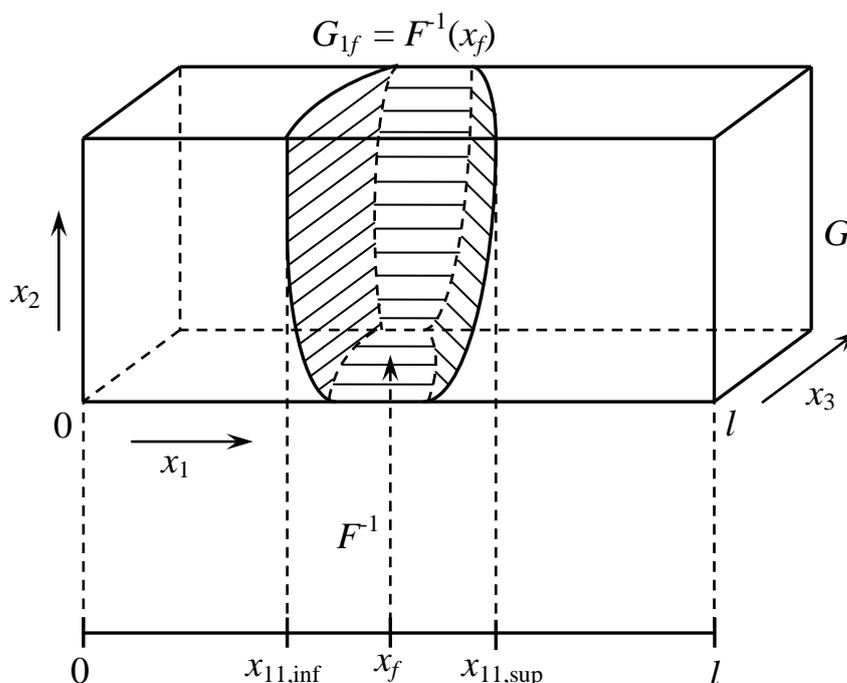


Рисунок 4.14 – Алгоритм интервальной фильтрации

Таким образом, прямая процедура оценивания координаты места повреждения не дает достоверной информации о точности локации. От этого недостатка избавлен интервальный локатор, выдающий гарантированный интервал, заключающий в себе истинную координату повреждения.

На следующем этапе исследования рассмотрим потоки мощности в моделях поврежденной электропередачи. Локация повреждений в линиях электропередачи выполняется на основе алгоритмических моделей. Точное место повреждения x_f задается в имитационной модели (рисунок 4.15а); алгоритмической модели оно неизвестно, вследствие чего она оперирует понятием о месте предполагаемого повреждения (рисунок 4.15б и в), а также критерием распознавания повреждения, например, критерия резистивности.

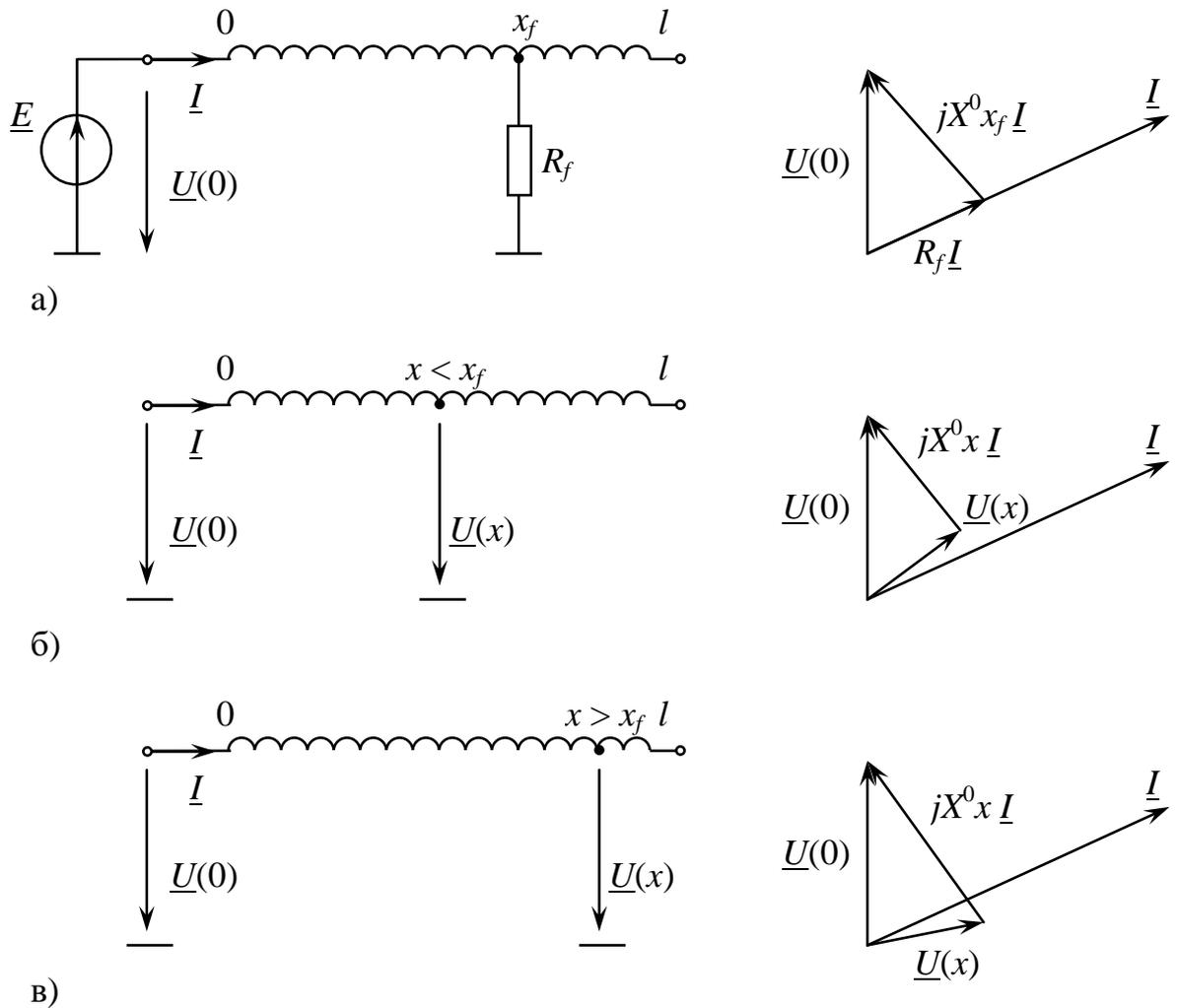


Рисунок 4.15 – Модели установившегося замыкания в ненагруженной электропередаче: имитационная модель (а); алгоритмические модели с предполагаемым местом повреждения в точке x (б, в)

Наиболее общая интерпретация критерия резистивности дается в базисе мощностей – комплексной, активной, реактивной, мгновенной. Так, на примере простейших моделей по рисунку 4.15 можно сформулировать следующее условие: переход места предполагаемого повреждения x через истинное значение x_f сопровождается изменением направления передачи реактивной мощности.

Пока $x < x_f$, в место предполагаемого повреждения поступает реактивная мощность. При $x > x_f$ реактивная мощность, наоборот,

генерируется в месте предполагаемого повреждения. И лишь при равенстве $x = x_f$ реактивная мощность в месте предполагаемого повреждения спадает до нуля, в то время как активная мощность остается, и только при металлическом замыкании также снижается до нуля.

Закономерности передачи мгновенной мощности обнаруживают некоторые черты, родственные тем, что были выявлены для реактивной мощности. Мгновенная мощность $p(t) = u(t)i(t)$ потребляется, если $\text{sign } u = \text{sign } i$ и генерируется при $\text{sign } u \neq \text{sign } i$, однако интервалы несовпадения знаков Δt_H , представляющие собой интерес для локации повреждений, бывают двух типов. Интервалы первого типа Δt_{H1} заключаются между нулем напряжения и нулем тока, а интервалы второго типа Δt_{H2} – наоборот, между нулем тока и нулем напряжения. В простейшей имитационной модели по рисунку 4.16, где предполагается условие $X^0 x_f \gg R_f$ (X^0 – удельное индуктивное сопротивление линии), а напряжение изменяется по закону $u(0,t) = U_m \sin(\omega t)$, процесс в токе (рисунок 4.17)

$$i(t) = -\frac{U_m}{X^0 x_f} (\cos(\omega t) - 1).$$

В алгоритмических моделях при определении напряжений $u(x,t)$ к малому напряжению $R_f i$ добавляется (рисунок 4.16б) или вычитается (рисунок 4.16в) продольное напряжение $\Delta u(x,t)$, составляющее часть синусоидального напряжения $u(0,t)$ (рисунок 4.17). Здесь $u(0,t)$, i – наблюдаемые величины; $R_f i$ – истинное напряжение в месте КЗ; $\Delta u(x,t)$, $u(x,t)$ – напряжения, имеющие отношение к местам предполагаемых повреждений.

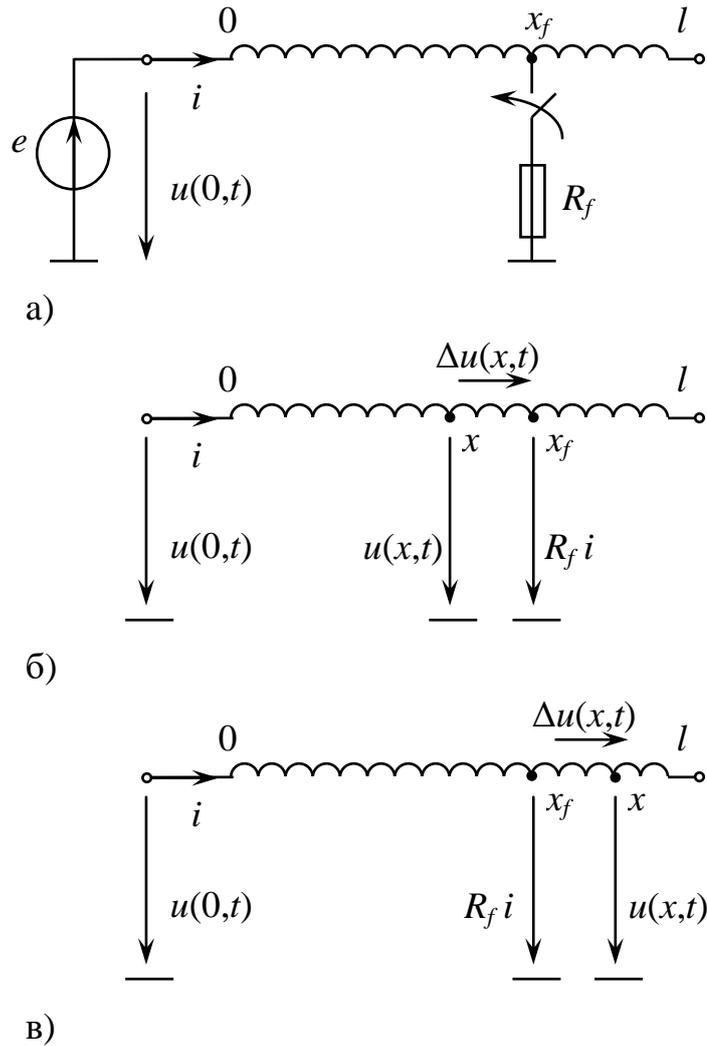


Рисунок 4.16 – Переходный процесс при замыкании в имитационной модели электропередачи (а) через малое сопротивление ($X^0 x_f \gg R_f$) и предполагаемые места замыканий в алгоритмической модели (б, в)

Очевидно, что при $x < x_f$ имеют место интервалы несовпадения первого типа, а при $x > x_f$ – второго типа, в то время как при равенстве $x = x_f$ интервалы несовпадения исчезают вовсе.

Таким образом, реактивная мощность места предполагаемого повреждения и генерируемая им реактивная мощность обнаруживает общие закономерности. Переход через место истинного повреждения сопровождается изменением знака реактивной мощности и вместе с тем изменением типа интервалов, на которых генерируется, но не потребляется,

реактивная мощность.

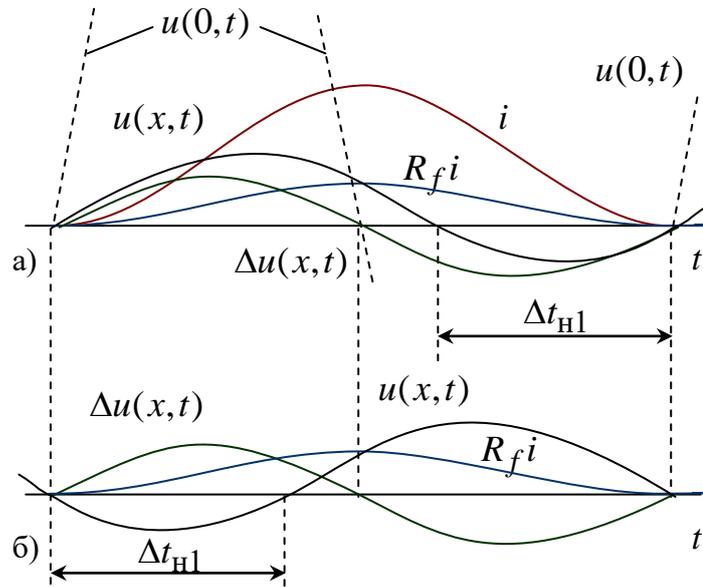


Рисунок 4.17 – График наблюдаемых и воспроизводимых процессов: для $x < x_f$ (а), для $x > x_f$ (б)

4.3 Анализ опыта эксплуатации устройств определения места повреждения и выявление значимых факторов их погрешности

Наибольшая эффективность ОМП для эксплуатации достигается при выполнении централизованных систем сбора информации и управления компонентами системы. Одна из таких систем – программно-технический комплекс «ОМП Бреслер», разработанный при участии автора в ООО «Релематика» и находящийся в эксплуатации с 2008 года [273,]. Комплекс представляет собой многоуровневую систему, к которой имеют доступ оперативный и релейный персонал подстанции, сетевого района или региона (рисунок 4.18).

Ключевым компонентом системы ОМП являются терминалы ТОР-Локатор (ТОР 100-ЛОК), выполняющие сбор информации, автономный расчет места повреждения и индикацию для пользователя [274]. Система обслуживает сотни терминалов одновременно и обеспечивает наблюдаемость

не только режимов, но и собственно компонентов самой системы. Тесное сотрудничество с сетевой компанией позволило собрать статистику срабатываний, для которых было найдено истинное место повреждения. Объемная работа оказалась полезной как для конечного пользователя, так и для разработчиков. С одной стороны, по результатам анализа срабатываний были внесены уточняющие поправки в уставки устройств. С другой – собрана ценная статистика погрешности ОМП и обозначены направления дальнейшего развития системы. Ниже приводятся наиболее значимые факторы, влияющие на погрешность ОМП.

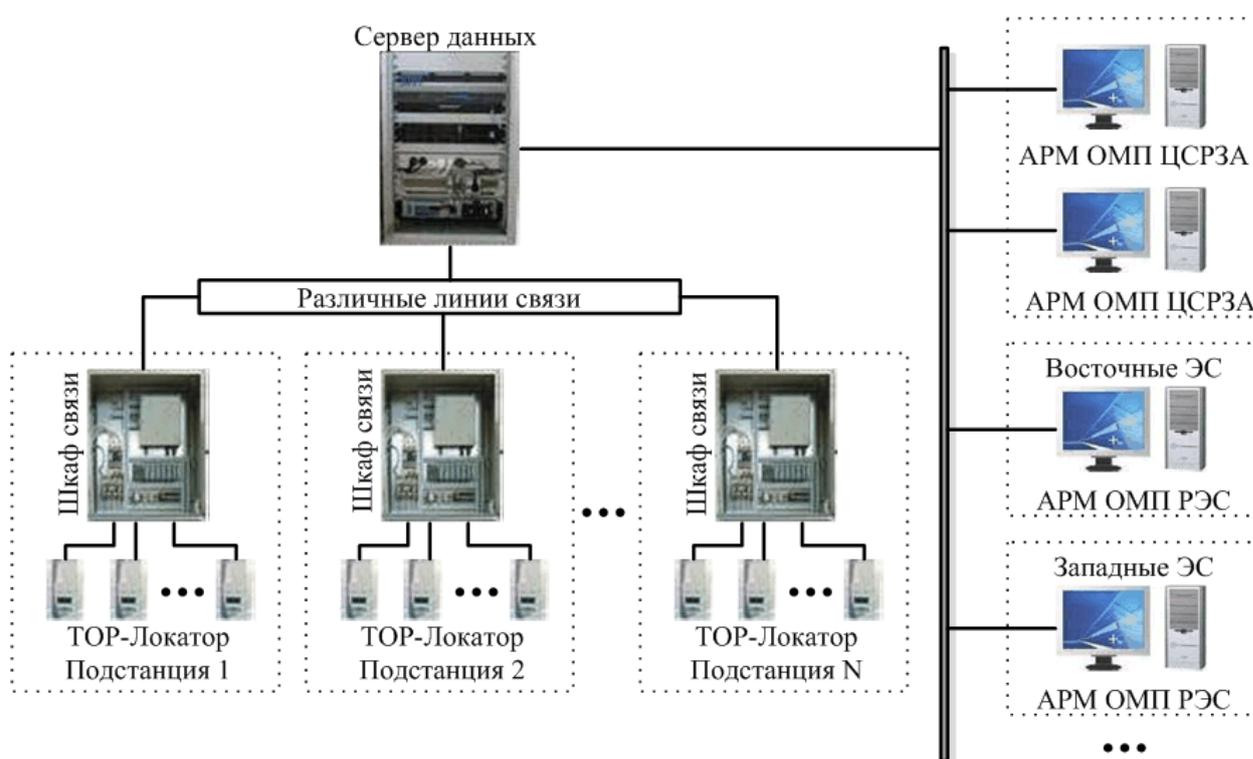


Рисунок 4.18 – Структурная схема системы «ОМП Бреслер»

Анализ опыта эксплуатации проводится для системы «ОМП Бреслер», установленной в ПАО «МОЭСК», за период с 2009 по 2012 гг. Комплекс охватывает более 400 линий электропередачи. Распределение линий по классам напряжения и средние показатели их длины приведены в таблице 4.1. Большинство линий имеют двухстороннее питание при сравнительно небольшой длине электропередачи. В среднем зафиксировано 4

замыкания на линию в год.

Таблица 4.1 – Состав ЛЭП в системе «ОМП Бреслер»

Класс напряжения, кВ	Доля линий в заданном диапазоне длин, %					всего
	менее 10 км	10–20 км	20–30 км	30–50 км	более 50 км	
35	2,4	10,3	6,3	0,8	0,0	19,8
110	10,1	34,0	16,4	13,0	1,6	75,1
220	1,6	1,6	0,8	0,8	0,3	5,1

Терминал предоставляет возможность гибкой конфигурации пуска при КЗ по уровню и приращениям различных последовательностей токов, протекающих по линии электропередачи. Опыт расчета уставок показал, что на некоторых линиях применение пусковых органов по уровню токов не удовлетворяет условиям чувствительности (таблица 4.2). Это связано с большой величиной токов нагрузки и малой кратностью токов внутренних коротких замыканий. Применение пусковых органов по приращению токов обеспечивает срабатывание устройства при КЗ по всей длине линии (в том числе через переходное сопротивление). Одновременно могут регистрироваться и замыкания на смежных объектах сети, однако локально измеренных данных оказывается недостаточно для определения их местоположения. Для того чтобы фиксировать только повреждения собственной линии, большая часть терминалов была переведена в режим селективного пуска. При этом подтверждение пуска, записи события ОМП и осциллограммы подтверждалось внешним сигналом, связанным с аварийным отключением линии. В связи со спецификой подстанций ОАО «МОЭСК» чаще всего эту функцию выполнял сигнал реле положения отключено (РПО). Это позволяло обеспечивать срабатывание ОМП от сигналов как основных, так и резервных защит ЛЭП. Из анализируемых событий 76% зафиксированы

в селективном режиме.

Таблица 4.2 – Условия пуска терминалов ОМП

Режим пуска	Доля в группе	
	Линии 35 кВ	Линии 110-220 кВ
По уровню тока	90,5%	92,0%
По уровню или по приращению токов	9,5%	8,0%
Селективный режим	44,6%	74,3%

Таким образом, для линий всех классов напряжения может быть рекомендовано применение терминалов в режиме пуска по уровню симметричных составляющих токов прямой, обратной и нулевой последовательностей, а при недостаточной чувствительности – подключение дополнительных пусковых органов по приращению тока. При наличии технической возможности рекомендуется использовать сигнал РПО для перевода терминала в режим селективного пуска.

Обобщены данные 469 срабатываний, по которым найдено истинное место повреждения. Различные виды КЗ определяются с разной точностью. Как видно из рисунка 4.19, в среднем погрешность ОМП при замыканиях на землю несколько выше, чем при междуфазных и трехфазных замыканиях. Чаще всего это объясняется недостаточной точностью исходных данных о модели по нулевой последовательности, а также в целом более высокими значениями эквивалентного переходного сопротивления в месте КЗ.

Наиболее важным фактором можно считать эквивалентное переходное сопротивление в месте повреждения [38,275]. В случае металлического замыкания влияние других факторов тем более ослабляется. С величиной переходного сопротивления связано ограничение чувствительности алгоритмов РЗА, выражаемое в явлении нераспознаваемости режимов короткого замыкания [276]. В задаче ОМП

переходное сопротивление снижает точность оценки места повреждения, а потому внимание к этому параметру является приоритетным в разработке алгоритмов ОМП [150].

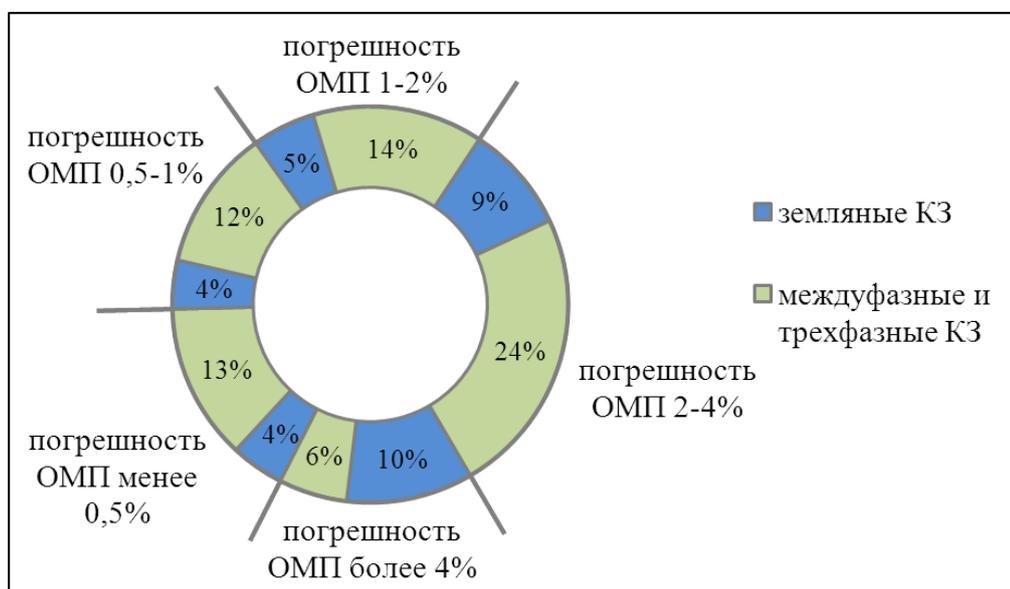


Рисунок 4.19 – Показатели погрешности ОМП при различных видах короткого замыкания

В опубликованных данных отсутствует адекватная оценка эквивалентного переходного сопротивления при различных видах повреждения линий электропередачи. Однако такое исследование необходимо для формирования представления о характере повреждений. Кроме того, сведения о переходном сопротивлении позволяют проводить адекватный анализ эффективности методов ОМП. В исследовании оценка переходного сопротивления была выполнена на основе осциллограмм зарегистрированных повреждений линий электропередачи с известным истинным местом повреждения. Оценка производилась с использованием алгоритмических моделей объекта [277] по соотношениям расчетных токов и напряжений в истинном (известном) месте повреждения.

На рисунке 4.20 приведена статистика переходных сопротивлений R_f при трехфазных, междуфазных и однофазных КЗ. Принятые модели

повреждения при различных видах КЗ показаны на рисунке 4.21. Отметим характерные особенности графиков. Наблюдается сходный характер распределения искомого параметра R_f вне зависимости от вида КЗ. Также примечательно, что для большинства повреждений оценка переходного сопротивления лежит в диапазоне до 5 Ом. Условия для определения места повреждения при таких повреждениях благоприятные, отклонение от истинного места удовлетворительное. Как следует из рисунка 4.20 при однофазных КЗ немалая доля случаев приходится на сравнительно большие значения сопротивлений. При других видах замыканий этот процент значительно ниже. Этот факт объясняет, в частности, в среднем более низкую точность ОМП при земляных замыканиях.

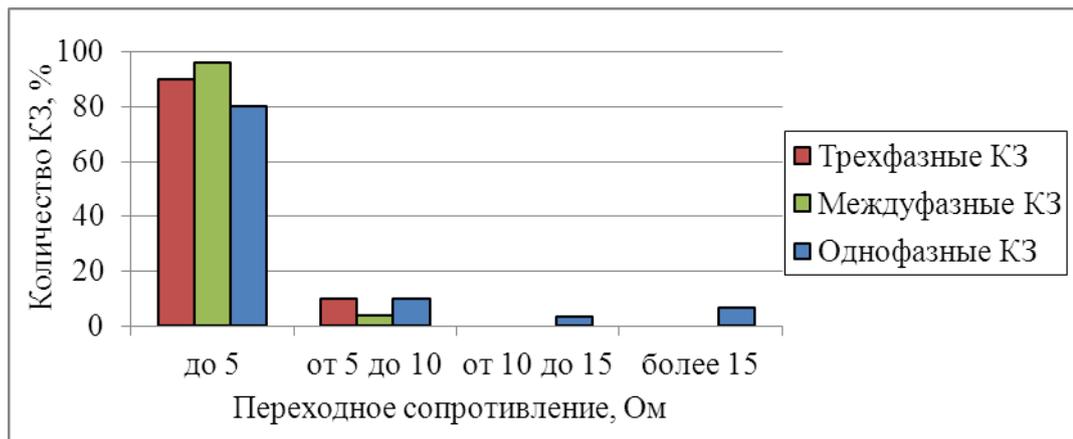


Рисунок 4.20 – Переходное сопротивление в месте повреждения

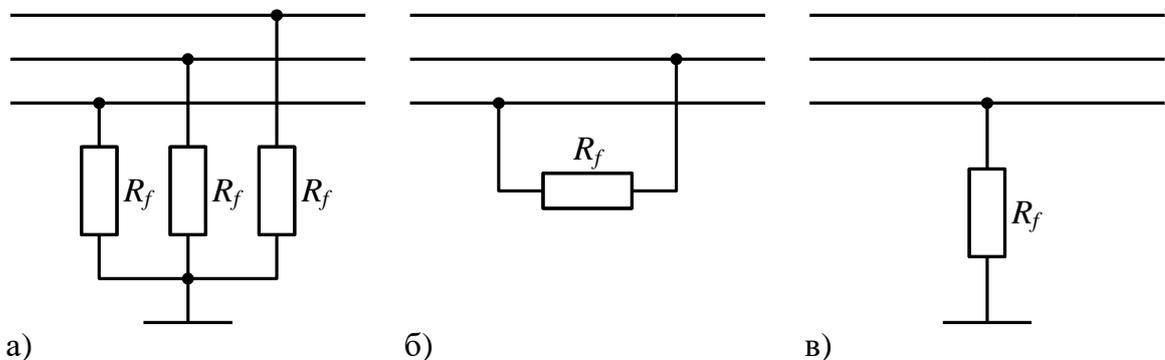


Рисунок 4.21 – Модели повреждения при различных видах КЗ: трехфазное замыкание (а); междуфазное замыкание (б); однофазное замыкание (в)

Исследована точность ОМП на линиях разной длины (рисунок 4.22). Основная доля срабатываний приходится на линии длиной от 10 до 50 км. Статистика показывает, что соотношение погрешностей на линиях разной длины в целом остается постоянным. Это значит, что относительная погрешность ОМП не зависит от длины линии.

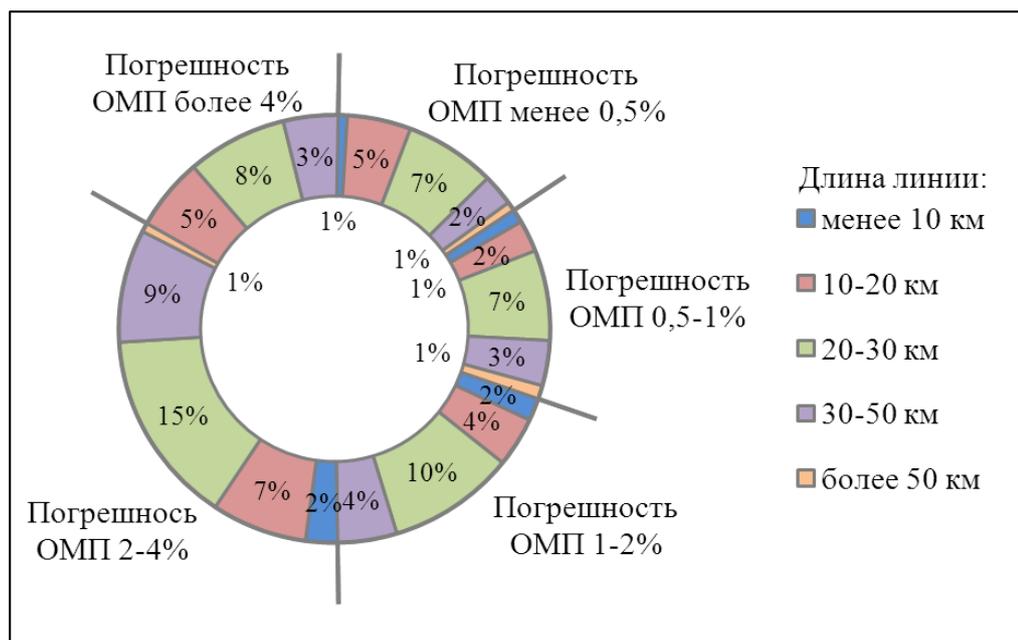


Рисунок 4.22 – Показатели погрешности ОМП на линиях разной длины

К системе «ОМП Бреслер» подключено около 100 линий с ответвлениями. На этих объектах алгоритм терминалов производит поиск места повреждения как на основной линии, так и на ответвлении. Однако с теоретической точки зрения одностороннего ОМП на разветвленных линиях модель определена не полностью. Сравнение распределения погрешностей на линиях с ответвлениями и без ответвлений (рисунок 4.23) показывает, что ответвления не вносят существенную дополнительную погрешность в ОМП. Это достигается учетом в алгоритме полной модели электропередачи, включающей эквивалентную схему ответвительных подстанций.

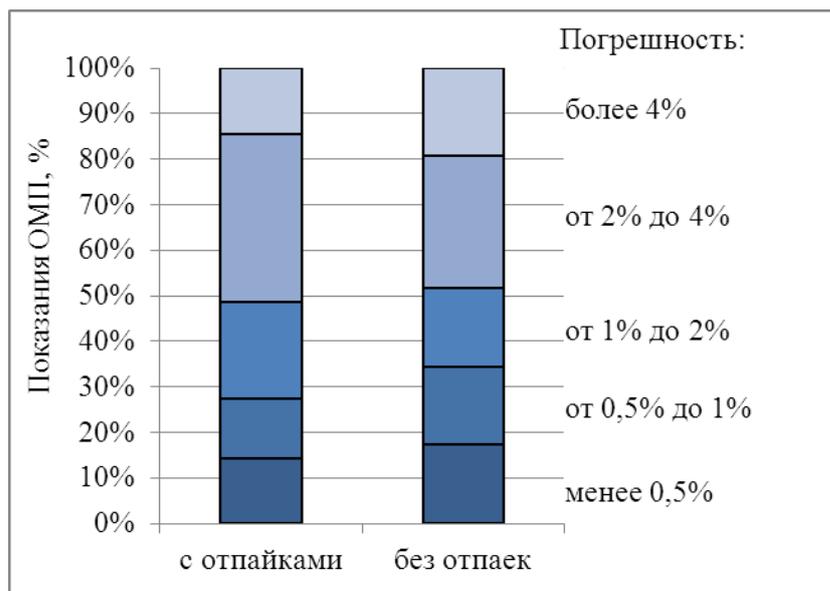


Рисунок 4.23 – Показатели погрешности ОМП в зависимости от конфигурации ЛЭП

Анализ аварийных осциллограмм выявил и случаи неоднозначной оценки расстояния до места повреждения по параметрам аварийного режима, что говорит о нераспознаваемости соответствующих режимов. В отличие от ситуационной задачи, для ОМП ставится диагностическая задача, в которой явление нераспознаваемости выражается в идентичности наблюдений в разных режимах объекта через функцию dist , применяемую в пространстве замеров и в пространстве объектных параметров.

На линиях с двухсторонним питанием картина повреждения искажается из-за подпитки места повреждения от удаленной системы [38]. Этот эффект проявляется при наличии переходного сопротивления в месте повреждения и хорошо известен в теории дистанционных защит. Наличие двухстороннего питания, в частности, приводит к проблеме нераспознаваемости повреждений через переходное сопротивление в некоторых точках или даже зонах линии в определенных режимах электропередачи [276]. Для ОМП этот эффект означает многовариантность решения задачи или относительно широкий диапазон решений. Результатом становится недопустимо большая зона обхода линии электропередачи.

Оценка расстояния только по замеру сопротивления поврежденного контура здесь не представляется возможной из-за высокой погрешности. Удовлетворительный результат могут обеспечить только те алгоритмы ОМП, которые учитывают влияние удаленной системы и снижают зависимость результата расчета от ее параметров, принимаемых варьируемыми. Для этого требуется оценка состояния и параметров удаленного конца линии в момент повреждения. Такая оценка возможна на основе измерений (при их наличии), выполненных на удаленном конце линии в момент КЗ, или информации о нагрузочном режиме, предшествующем КЗ. Первый способ не может быть реализован локально и требует установки приборов на обоих концах линии и наладки связи между ними. Второй способ может быть воплощен в одном локальном устройстве, производящем одностороннее наблюдение КЗ.

Собрана статистика срабатываний одиночного устройства ОМП (рисунок 4.24) [278].

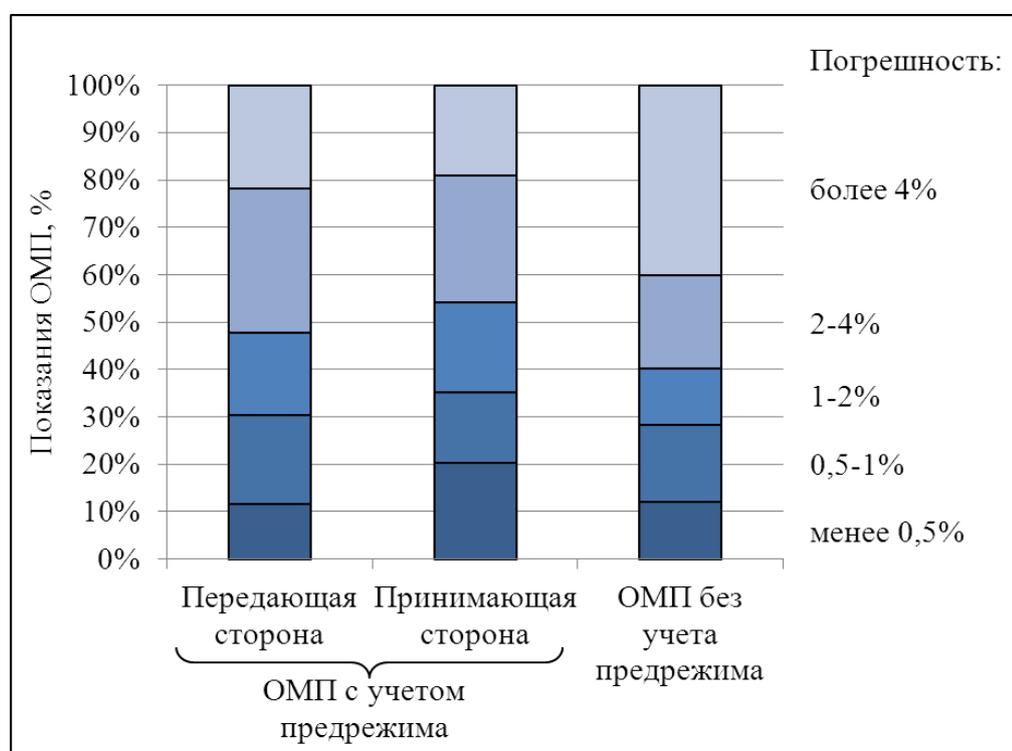


Рисунок 4.24 – Показатели погрешности ОМП в зависимости от направления передачи мощности

Ранее показано, что на замеры токов влияют направление и величина передаваемой мощности в предаварийном режиме. При обратном направлении мощности условия ОМП значительно ухудшаются по сравнению с прямой передачей. Поэтому в качестве основного критерия оценки алгоритмов было выбрано направление активной мощности до аварии. Проведен анализ более 450 срабатываний на линиях напряжением 35-220 кВ с известным местом повреждения. Доля срабатываний с погрешностью ОМП не более 4% от длины линии практически одинакова. Таким образом, статистика срабатываний показывает высокую степень адаптации выбранного алгоритма к режиму работы линии в момент возникновения аварии.

Как указывалось выше, алгоритм расчета места повреждения на линиях с двухсторонним питанием требует учета влияния удаленной системы. Одним из возможных решений этой проблемы является привлечение дополнительной информации с удаленного конца линии. Как правило, это замер аварийных величин.

Был разработан и исследован способ двухстороннего ОМП, не требующий синхронизации измерений с разных концов линии электропередачи. Как и в одностороннем методе, здесь используется алгоритмическая модель наблюдаемой линии. Однако учет подпитки места повреждения удаленным концом выполняется на основе замера удаленного конца, а не по предаварийному режиму.

Проведено сравнение разработанного метода с существующим односторонним алгоритмом. Оценке подлежат области режимов, в которых не обеспечивается достаточная точность ОМП (относительная погрешность превышает 4% от длины линии). Используется модель типичной линии электропередачи 110 кВ длиной 100 км, угол передачи и соотношения мощностей прилегающих систем варьировались в широких диапазонах. Поскольку методическая погрешность рассматриваемого одностороннего

алгоритма ОМП в этих условиях испытаний оказалась пренебрежимо мала, а двухсторонний способ ОМП не содержит методическую погрешность вовсе, то в модель была введена погрешность измерительных преобразователей тока, нелинейная по характеру.

Области повышенной погрешности ОМП показаны на рисунке 4.25 в виде объектных характеристик на плоскости переходного сопротивления и расстояния до места моделируемого замыкания. График показывает минимальные величины R_f , при которых наблюдается погрешность ОМП выше порогового значения. Для одностороннего метода погрешность выходит за рамки допустимой только при замыканиях через переходное сопротивление на последней трети линии электропередачи. Двухсторонний метод оказывается более точным, области погрешности расположены значительно выше по оси переходного сопротивления. Как показало исследование, замыкания с переходными сопротивлениями более 15 Ом встречаются относительно редко (рисунок 4.20). Таким образом, двухсторонний метод распознавания замыканий показывает удовлетворительный результат по всей длине магистральной линии.

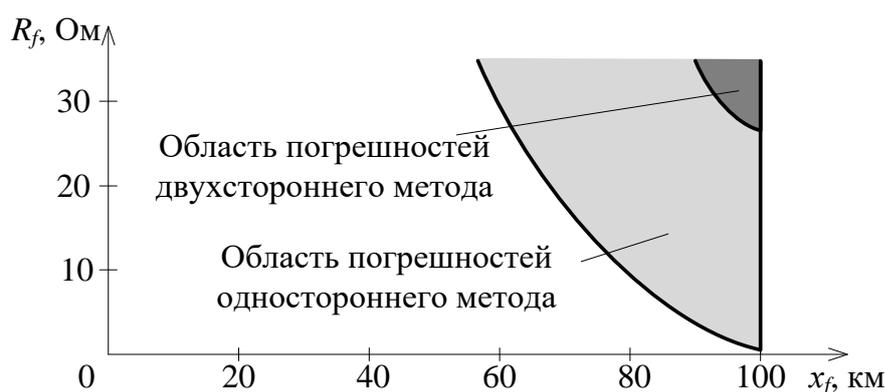


Рисунок 4.25 – Области погрешностей методов ОМП

4.4 Постановка задачи и алгоритм выделения информационных составляющих для устройств определения места повреждения

В последние двадцать лет наблюдается тенденция к укорочению длительности аварийного процесса при его отключении быстродействующими защитами и столь же быстродействующими выключателями. В ближайшем будущем можно ожидать длительность процесса КЗ до 20-25 мс. Этого времени может оказаться недостаточно для выделения информационных составляющих токов и напряжений традиционными способами. Требуется применять инновационные подходы [279] для выделения наиболее информативной части процесса, а также для анализа периодической составляющей аварийного процесса с высокой точностью. Терминалы ТОР-Локатор, реализованные на современной вычислительной платформе, позволяют отслеживать процессы КЗ по нескольким линиям одновременно. При этом оценка места повреждения производится для каждого процесса, имеющего признаки КЗ.

Измерение предаварийных величин, как правило, не встречает значительных затруднений. Нормальный режим чаще всего имеет однородный синусоидальный характер. Если имеет место опробование присоединения, то токи или напряжения доаварийного режима могут отсутствовать. В других случаях их величина может быть оценена с достаточной степенью точности. Фиксация значений предаварийного режима производится непосредственно перед срабатыванием чувствительных пусковых органов (ПО), как показано на рисунке 4.26. В качестве пусковых органов целесообразно использование реле векторного приращения токов фаз или их симметричных составляющих, как показано в Главе 3. Тогда запаздывание момента срабатывания ИО по отношению к началу аварийного процесса составляет не более 10 мс, в среднем – 5 мс. В итоге оказывается возможным разделить аварийный процесс на нагрузочную составляющую и

чисто аварийную составляющую, последняя непосредственно связана с коротким замыканием и его местоположением в электрической сети.

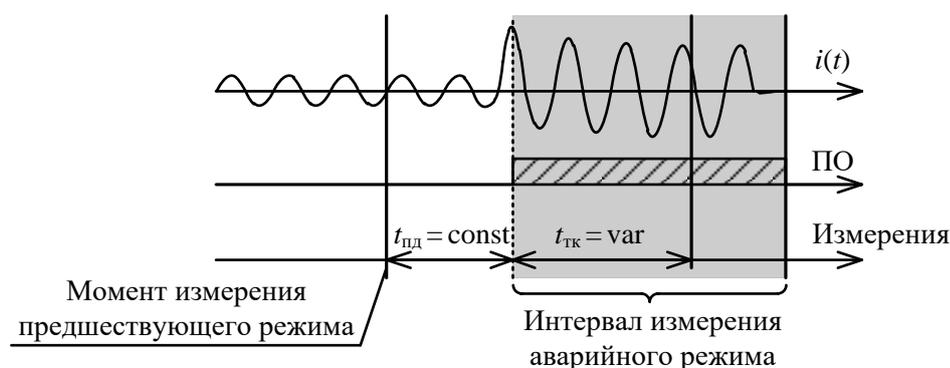


Рисунок 4.26 – Фиксация аварийных и предаварийных величин для целей ОМП

Замер токов и напряжений аварийного процесса сразу после срабатывания пусковых органов может не обеспечить высокую точность ОМП, например, по причине искажения электрических величин за счет свободных составляющих электромагнитных переходных процессов в первичной сети или из-за погрешностей измерительных преобразователей. Требуется интеллектуальный выбор момента замера на интервале аварийного процесса (рисунок 4.27). На основе анализа 20 тысяч аварийных осциллограмм, зафиксированных цифровыми регистраторами на линиях среднего и высокого напряжения, были выделены наиболее распространенные сценарии развития аварийных процессов:

- 83% – Классические повреждения линии. К ним отнесены повреждения на фоне нагрузки или без тока до КЗ, при которых не изменяется вид КЗ, схема сети остается постоянной, а величина эквивалентного переходного сопротивления изменяется незначительно.

- 6% – Неуспешные АПВ. Для процесса характерно отсутствие предаварийного режима, постоянство параметров аварийного режима в течение всей длительности процесса. Должна обеспечиваться готовность алгоритма ОМП к повторному действию после обработки

первоначального КЗ.

- 6% – Процессы малой длительности, неоднородные по структуре процессы, режимы с каскадным отключением линии. Особенность обработки таких режимов заключается в применении специализированных фильтров для выделения информационных составляющих на уменьшенном (по сравнению с периодом промышленной частоты) интервале. К этой категории отнесены и развивающиеся КЗ.

- 4% – КЗ на фоне внешних возмущений в сети, приводящих к преждевременному срабатыванию пусковых органов. Анализ затруднен тем, что не все части зафиксированного процесса относятся к одному КЗ. Замеры в предаварийном и аварийном режимах могут относиться к разным схемам сети, а потому их совместное использование невозможно.

- 1% – КЗ на ответвлении от магистральной линии, сопровождающееся включением короткозамыкателя. Процессы имеют относительно большую длительность. Предаварийный режим, как правило, не может быть использован для расширения информационной базы функции ОМП. Наблюдается малое эквивалентное переходное сопротивление.

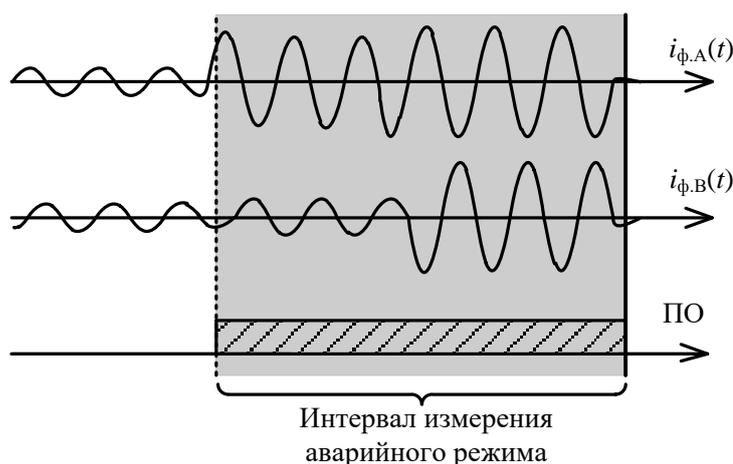


Рисунок 4.27 – Фиксация аварийных величин для целей ОМП

Каждый сценарий устанавливает собственные требования к способу фиксации параметров режима, что отмечено также в [80]. На основе

представленной классификации режимов (таблица 4.3) был разработан и применен новый алгоритм выделения информационных составляющих для целей ОМП ЛЭП (рисунок 4.28).

Таблица 4.3 – Классификация сценариев развития аварийных процессов

№	Наименование сценария	Ток до аварии	Изменение вида КЗ	Изменение R_f	Изменение схемы сети	Доля, %
1	Классическое повреждение	Есть или нет	Нет	Нет или незначительное	Нет	83
2	Неуспешное АПВ	Нет	Нет	Нет	Да	6
3	Процесс малой длительности, быстрое изменение сети	Есть или нет	Да	Да	Да	6
4	КЗ на фоне внешних возмущений	Есть	Нет	Нет	Да	4
5	КЗ за трансформатором ответвления	Да	Да	Снижается	Да	1

Чувствительные пусковые органы, основанные на аварийных составляющих токов, определяют изменение режима и задают интервалы выделения информационных составляющих. После оценки измерений и оценки состояния ЛЭП производится расчет расстояния до места повреждения с выделением поврежденных фаз (ПФ) и определением переходного сопротивления R_f . Эти наборы накапливаются все время развития аварии. Далее применяется двухступенчатая схема отбора замеров по результатам процедуры ОМП. На первом этапе исключаются те

интервалы, которым соответствуют повреждения вне наблюдаемой ЛЭП. Из оставшихся замеров выбирается интервал с наибольшим индексом надежности результата ОМП ЛЭП. Аналогичный отбор проходит и двухсторонний замер. Таким образом, алгоритм использует всю доступную информацию, содержащуюся в записи аварийного процесса.

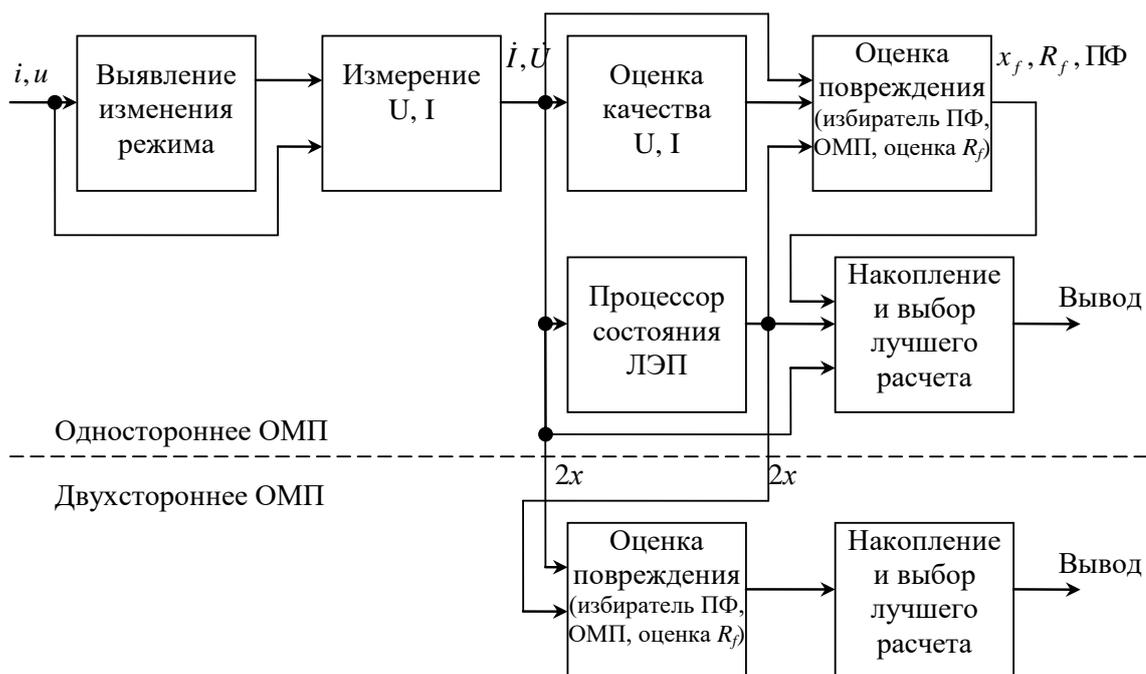


Рисунок 4.28 – Структурная схема алгоритма ОМП

Алгоритмы по техническим заданиям автора реализованы в функции ОМП серийных терминалов TOP 300 ЛОК 5ХХ, TOP 300 КСЗ, TOP 300 ДЗЛ, TOP 300 ДФЗ, TOP 300 НВЧЗ. Терминалы с этой функцией аттестованы в ПАО «Россети» для применения на ЛЭП различного класса напряжения и находятся в эксплуатации с 2015 года.

4.5 Выводы

1. Характеристики, полученные методами информационного анализа, показали, что точность односторонних методов ОМП по ПАР ограничена физическими свойствами наблюдаемого объекта – ЛЭП. Исследование

выявило причины возникновения нераспознаваемых КЗ как в условиях полной определенности модели, так и при неопределенности одного объектного параметра, а также при неопределенности измерений. Предложена и обоснована инженерная методика определения максимальной разрешающей способности одностороннего дистанционного локатора повреждений.

2. Собранные при эксплуатации устройств ОМП данные о повреждениях ЛЭП 35-220 кВ явились достоверным источником информации об условиях функционирования ЛЭП. Обоснованы критерии ОМП на основе реактивной мощности предполагаемого повреждения, показавшие высокую точность в эксплуатации. Выделены значимые факторы погрешности одностороннего ОМП по ПАР, в том числе чувствительность к ошибке измерения информационных составляющих.

3. Классифицированы сценарии развития аварий с точки зрения процедуры ОМП. Предложена структурная схема алгоритма выделения информационных составляющих и обработки данных в микропроцессорных устройствах ОМП по ПАР, которая реализована автором в серийных устройствах ООО «Релематика».

Глава 5 Разработка системотехнических решений пассивного волнового определения места повреждения

5.1 Исследование переходных процессов, вызванных повреждением линий электропередачи

5.1.1 Анализ переходного процесса в токах и напряжениях при коммутации линии электропередачи методом спектральных составляющих

Коммутация в электрической системе приводит к изменению принужденной составляющей режима и возникновению свободных составляющих. Для распознавания повреждений в электрической сети устройства защиты и автоматики обычно использует принужденную составляющую основной гармоники. В волновой РЗА факт повреждения может быть установлен раньше, чем может быть выделена основная гармоника, а расчет выполняется по свободным составляющим электромагнитного переходного процесса.

Распространяясь из места коммутации, электромагнитная волна претерпевает множественные отражения и преломления в электрической сети. Вся совокупность преобразований сигнала формирует образы, которые должны быть распознаны устройствами РЗА. На основе частотно-временного анализа исследуется набор спектральных составляющих начальной стадии переходного процесса, пригодной для срабатывания волновых алгоритмов.

Входной сигнал пассивного волнового ОМП представлен последовательностью дискретных отсчетов сигнала f_n . Наиболее распространенным методом анализа спектра такого сигнала является дискретное преобразование Фурье (ДПФ) [280]:

$$F_k = \sum_{n=0}^{N-1} f_n e^{-\frac{j2\pi}{N}kn}, \quad k = 0, 1, \dots, N-1. \quad (5.1)$$

Результатом ДПФ является спектр сигнала $\{|F_k|\}$, показывающий амплитуды частотных составляющих в сигнале. Исследованы переходные процессы в моделях ЛЭП и в измерительных цепях реальных ПС.

Для примера на рисунке 5.1 показан переходный процесс при КЗ на ЛЭП 330 кВ, полученный на модели электрической сети в среде PS CAD. Сигнал напряжения на подстанции зарегистрирован с частотой дискретизации 2 МГц. На рисунке 5.2 представлен спектр начального, основного интервала КЗ (обозначен «1»), где видно, что в сигнале явно выражены низкочастотные составляющие (до 11 кГц), амплитуды высокочастотных составляющих в этом масштабе малы. Контрольный анализ спектра на расширенном интервале (обозначен «2») показывает адекватность основного измерения.

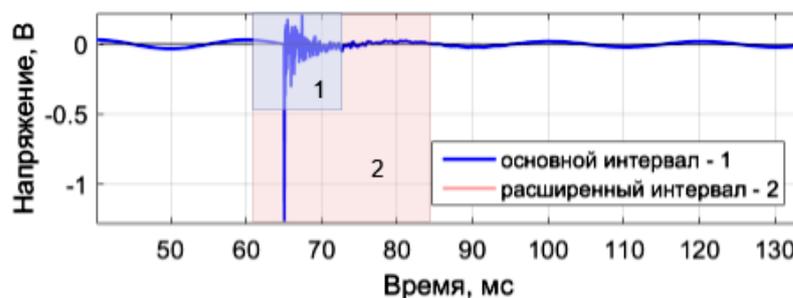


Рисунок 5.1 – Сигнал переходного процесса в ЛЭП

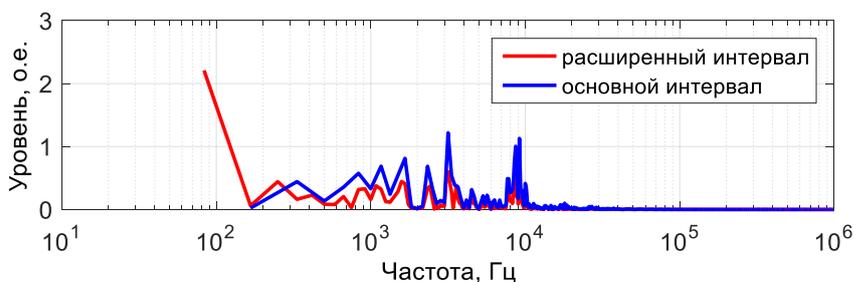


Рисунок 5.2 – Спектр сигнала на заданных интервалах

В предположении неоднородности процесса целесообразно условно

разделить это окно на смежные интервалы: $[0, N_1 - 1]$, $[N_1, N_2 - 1]$, ..., $[N_p, N - 1]$, – содержащие отдельные процессы или части процессов. Тогда выражение (5.1) примет вид

$$F_k = \sum_{n=0}^{N_1-1} f_n e^{-\frac{j2\pi}{N}kn} + \sum_{n=N_1}^{N_2-1} f_n e^{-\frac{j2\pi}{N}kn} + \dots + \sum_{n=N_p}^{N-1} f_n e^{-\frac{j2\pi}{N}kn}. \quad (5.2)$$

Формула (5.2) показывает, что ДПФ суммирует составляющие отдельных волн. Эти составляющие имеют произвольную фазу, зависящую от задержки распространения волн и их полярности. Взаимное расположение фаз влияет на общую сумму, которая может отображать заниженные значения при неадекватной длине интервалов.

Дальнейший анализ сигнала выполнен с использованием спектрограмм, показывающих амплитуду частотных составляющих для каждого момента времени. Оптимизацией параметров ширины окна преобразования Фурье N_f и глубины наложения N_n были получены узкие по частоте полосы на спектрограмме.

На рисунке 5.3 представлена спектрограмма, на которой красным цветом показаны наибольшие амплитуды, а синим – наименьшие. На рисунке 5.4 показаны наиболее значимые области спектрограмм для трех сигналов, относящихся к различным условиям КЗ на одной ЛЭП. Видно, что в предшествующем коммутации режиме преобладают низкие частоты (основная гармоника), тогда как после коммутации наиболее значимые частоты всех опытов КЗ сосредоточены в области 1-3 кГц. Длительность этого переходного процесса ограничена 1-3 мс. Процесс носит негармонический характер, а модель волны зависит от структуры электрической сети. Результаты сравнимы с другими аналогичными исследованиями, выполненными для других видов выявительных органов при повреждениях ЛЭП [108].

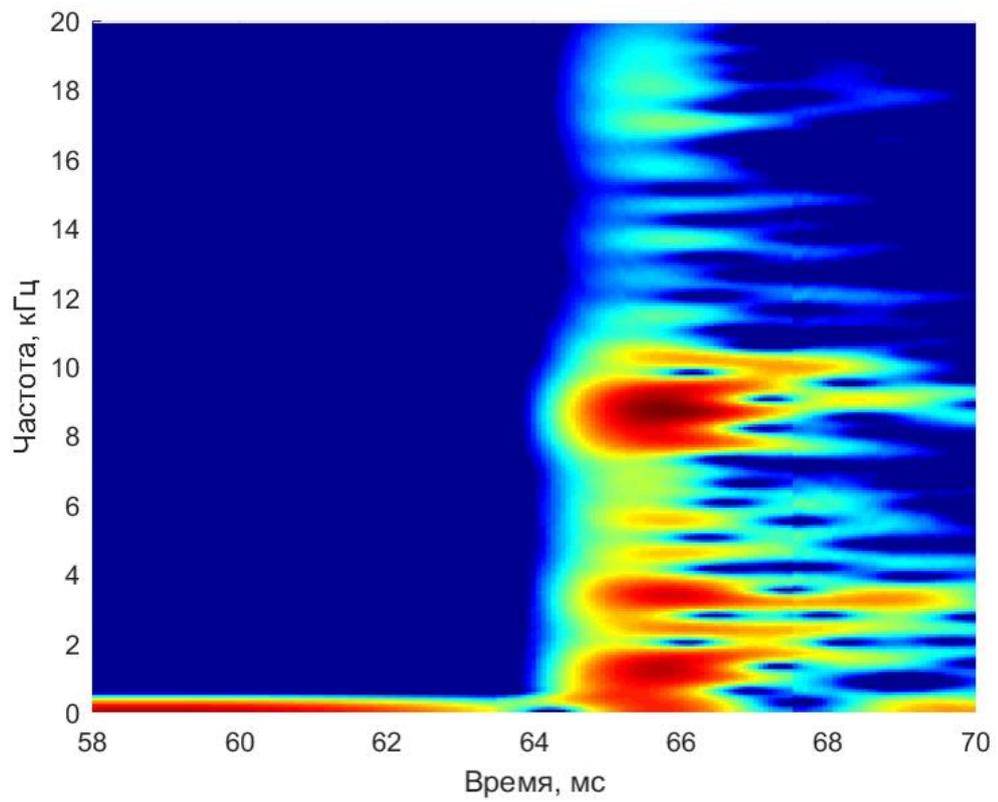


Рисунок 5.3 – Спектрограмма сигнала при КЗ

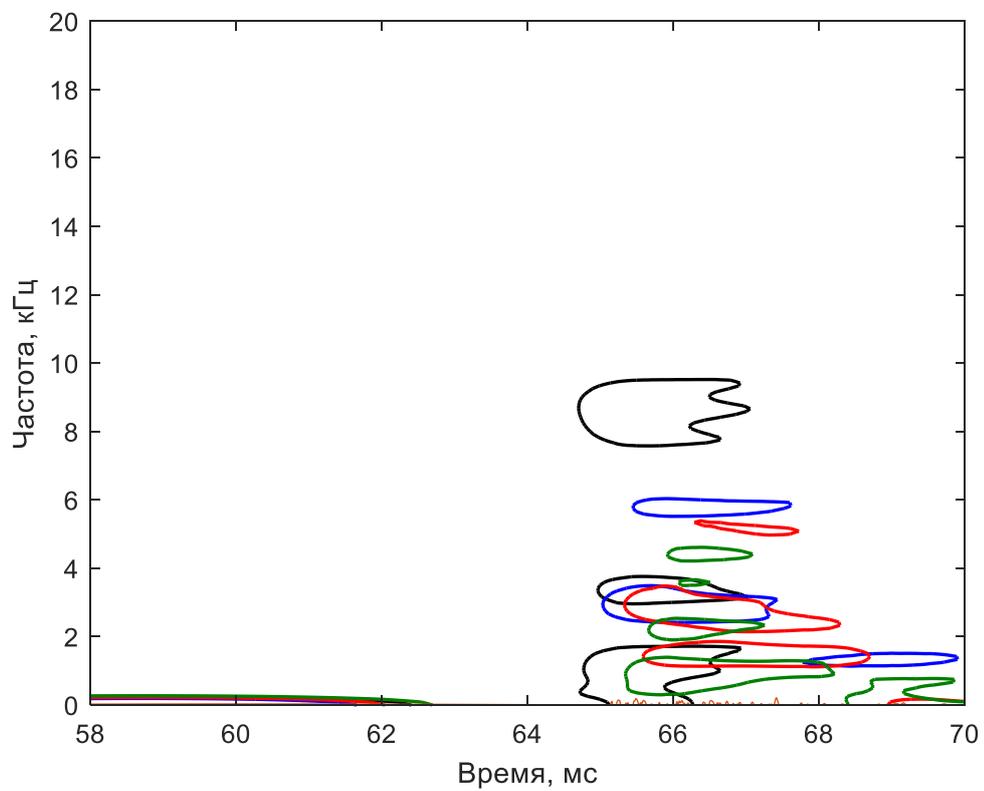


Рисунок 5.4 – Области значимых частот при КЗ

Второй пример [281] связан с анализом реального КЗ на ЛЭП 220 кВ. На рисунке 5.5 представлены осциллограмма измеренного междуфазного напряжения (а), осциллограмма сигнала после удаления составляющей основной частоты (б), спектрограмма высокого разрешения (в). Отслеживаемый режим коммутации (при $t \geq 0$) характеризуется кратковременным появлением широкого спектра частот (частота Найквиста в исследовании составляет 500 кГц). Доля высокочастотной части спектра оказывается малой при расширении окна фильтра N_{ϕ} , как это произошло на рисунке 5.2. Также видны узкие горизонтальные полосы частот, ассоциируемых с работой оборудования связи по ЛЭП. Этот пример также подтверждает выводы о сосредоточении энергии переходного процесса в диапазоне до 10 кГц.

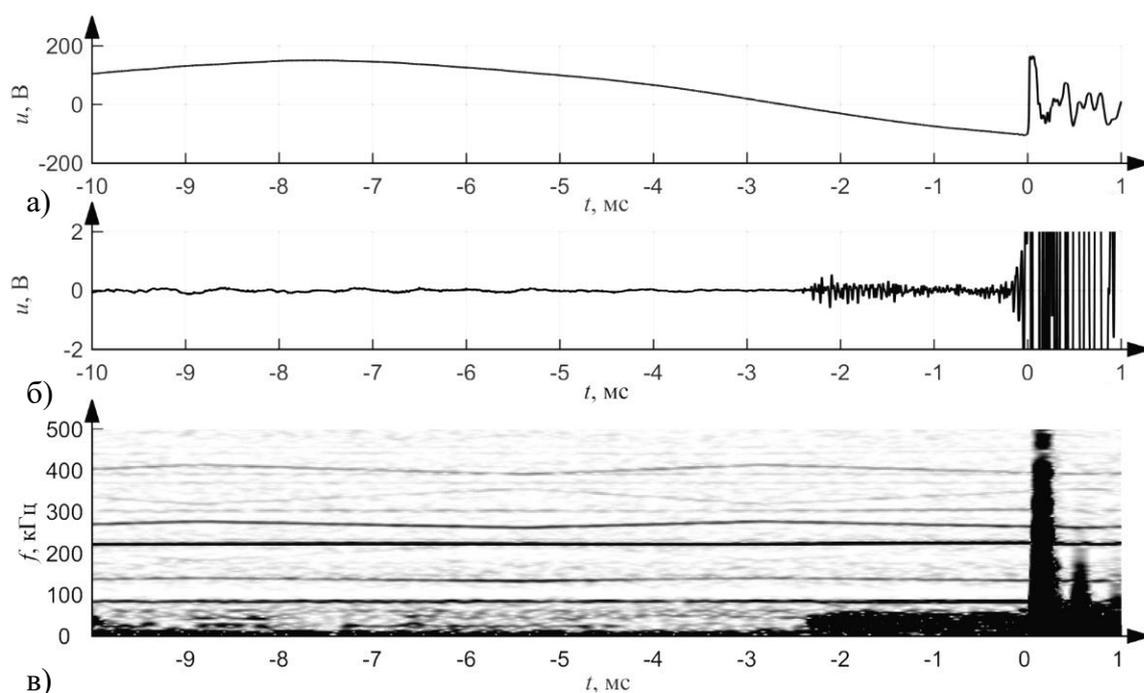


Рисунок 5.5 – Сигналы (а и б) и спектрограмма (в) при КЗ на ЛЭП

Выявленные признаки переходного процесса при КЗ позволяют сформулировать требования к регистрации сигналов в волновых устройствах РЗА с нижней частотой полосы пропускания не выше 1 кГц.

Волновые методы РЗА и определения места повреждения ОМП предполагают измерение характеристик и моментов прихода электромагнитных волн в узлы электрической системы [109,282].

Исследование показывает, что структура измерительного органа волнового ОМП на основе частотных компонент сигнала встречает трудности настройки из-за высокой неопределенности спектра как отслеживаемых составляющих, так и альтернативных им составляющих нормального (доаварийного) процесса. Действительно, измерения выполняются в широком диапазоне частот, включающем помехи таких источников, как частичные разряды, коронные разряды на элементах сети, высокочастотная связь по ЛЭП, шумы от силовых полупроводниковых элементов, внешние радиолокационные сигналы и другие.

5.1.2 Создание модели сигнала переходного процесса на ограниченном временном интервале

На коротком интервале времени электроэнергетический сигнал $u(t)$ может быть представлен следующей моделью [283]:

$$u(t) = \sum u_{\Pi}(t) + \sum u_{C}(t) + u_{\text{Ш}}(t),$$

где $\sum u_{\Pi}(t)$ – сумма принужденных периодических составляющих энергосистемы;

$\sum u_{C}(t)$ – сумма свободных составляющих переходных процессов энергосистемы;

$u_{\text{Ш}}(t)$ – шумовые компоненты в сигнале, не связанные с принужденными компонентами или переходными процессами в энергосистеме.

Фронт электромагнитной волны достигает узла наблюдения в момент

t_0 и проявляется в составляющих $\sum u_C(t)$ лишь при $t \geq t_0$, а компоненты $\sum u_{\Pi}(t)$ и $u_{\text{III}}(t)$ определены и значимы на всем интервале наблюдения $[t_{\text{Н}}; t_{\text{К}}]$. Задача волновой РЗА ЛЭП состоит в наиболее точной оценке t_0 , то есть ее измерительные органы воспринимают составляющие сигнала $\sum u_{\Pi}(t)$ и шумовые компоненты $u_{\text{III}}(t)$ как альтернативные, то есть как помехи. При этом отслеживаемая волна принадлежит к компоненте $\sum u_C(t)$.

Наиболее интенсивные периодические составляющие в сумме $\sum u_{\Pi}(t)$ – компоненты гармоник промышленной частоты, обусловленные энергетическим режимом и нелинейностью элементов сети. Задачи выделения и подавления этих составляющих хорошо известны в классической РЗА и решаются с привлечением адаптивных и неадаптивных фильтров [284].

Шумовые компоненты могут быть разделены на две группы:

$$u_{\text{III}}(t) = \sum u_{\text{ГIII}}(t) + u_{\text{НIII}}(t),$$

где $\sum u_{\text{ГIII}}(t)$ – сумма детерминированных (периодических) квазистационарных компонент шума;

$u_{\text{НIII}}(t)$ – непериодическая компонента шума.

Компоненты $\sum u_{\text{ГIII}}(t)$ могут быть связаны с работой высокочастотной аппаратуры связи, полупроводниковой электроники и должны учитываться при проектировании сигнальных фильтров в волновом устройстве РЗА. Если их частоты известны, то реализуются аналоговые (как будет показано в главе 6 на примере применения комплекса АПВК) или цифровые заграждающие фильтры [284]. В отличие от $\sum u_{\Pi}(t)$, компоненты $\sum u_{\text{ГIII}}(t)$ непостоянны во времени и охватывают широкий диапазон частот, пересекающийся с отслеживаемым сигналом. Эти компоненты следует

обрабатывать разными фильтрами.

Функция $u_{\text{НШ}}(t)$ неизвестна, а потому эта компонента не может быть удалена из сигнала с помощью фильтра. Применение широкополосных фильтров должно быть ограничено из-за вероятного подавления полезной составляющей – $\sum u_{\text{С}}(t)$.

Применением фильтров и дискретизацией сигналов получают дискретный сигнал на интервале дискретного времени $[k_{\text{Н}}; k_{\text{К}}]$ с компонентами, где все суммы заменены соответствующими обобщающими функциями:

$$u'(k) = u'_{\text{П}}(k) + u'_{\text{С}}(k) + u'_{\text{ПШ}}(k) + u'_{\text{НШ}}(k), \quad (5.3)$$

Каждую компоненту (5.3) на заданном интервале будем рассматривать как последовательность независимой случайной величины с собственным законом распределения. В [111,285] принимается, что компоненты шума подчиняются нормальному закону распределения.

5.1.3 Экспериментальное исследование статистических характеристик альтернативного режима

В период опытной эксплуатации нескольких комплексов волнового ОМП на основе устройств TOP 300 ЛОК 550 произведена регистрация сигналов ЛЭП в режимах коммутации и в безаварийных режимах.

На рисунках 5.6а и 5.7а показаны осциллограммы сигналов, зарегистрированных на одной подстанции (ПС 330 кВ Каменногорская) в разные годы [283]. В сигналах преобладает промышленная частота 50 Гц. Сигналы после фильтрации $u'(k)$ (условно обозначены А и В) приведены на рисунках 5.6б и 5.7б, их амплитуда составляет около 0,35% от амплитуды основной гармоники в измеренном сигнале.

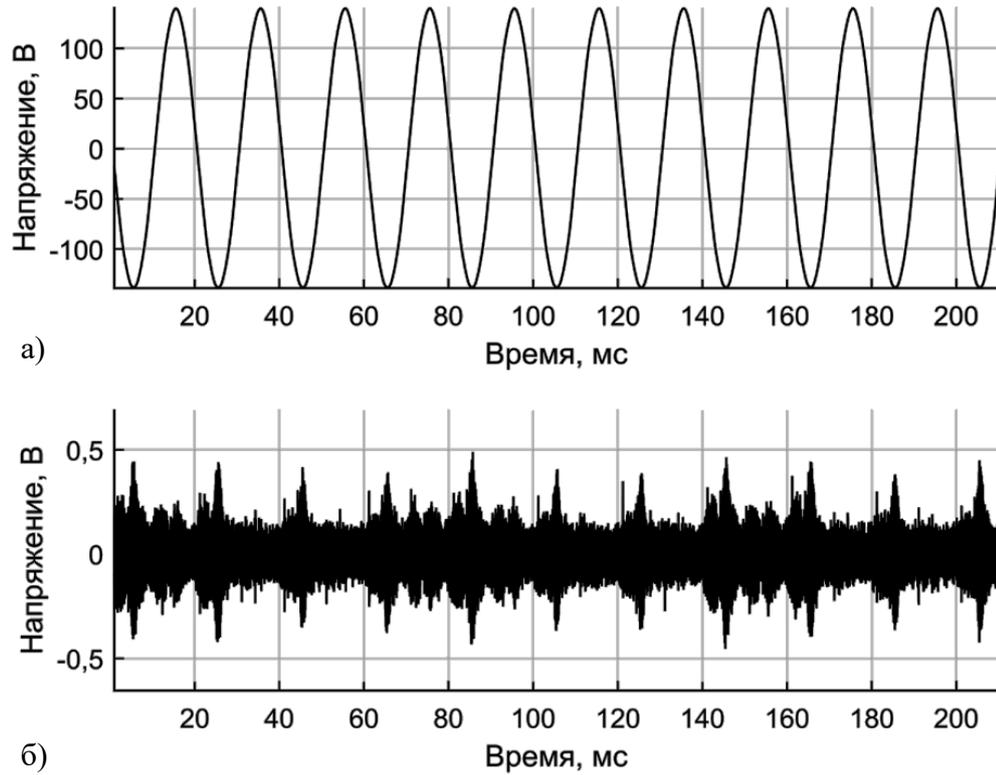


Рисунок 5.6 – Осциллограмма сигнала А: измеренный сигнал (а); сигнал после фильтрации (б)

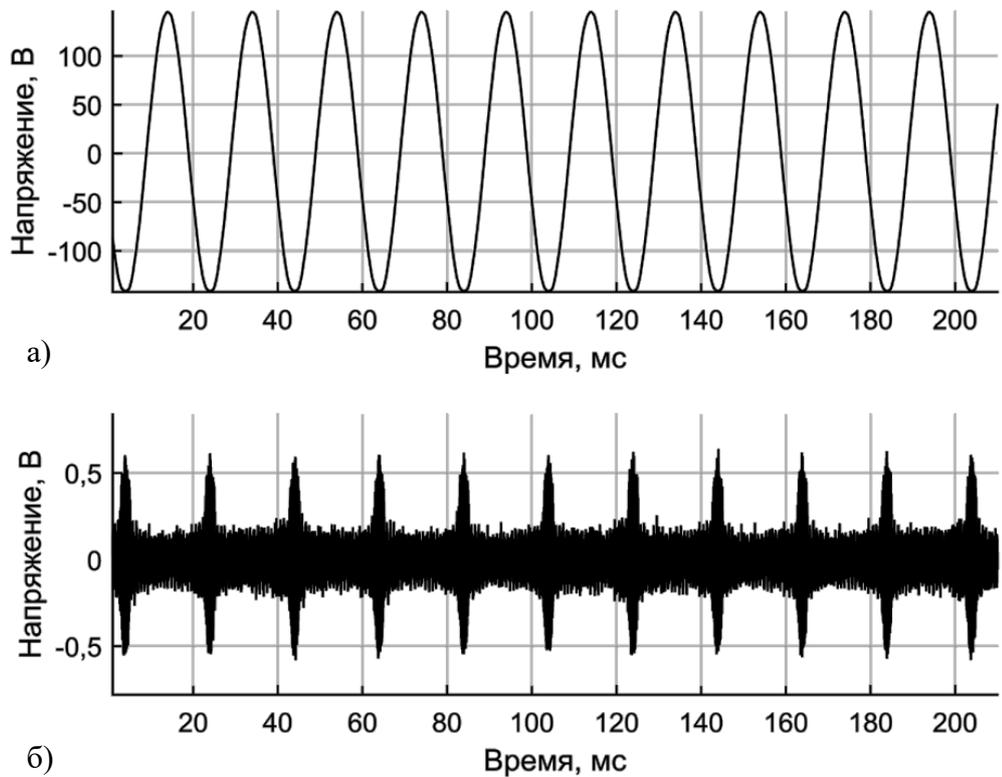


Рисунок 5.7 – Осциллограмма сигнала В: измеренный сигнал (а); сигнал после фильтрации (б)

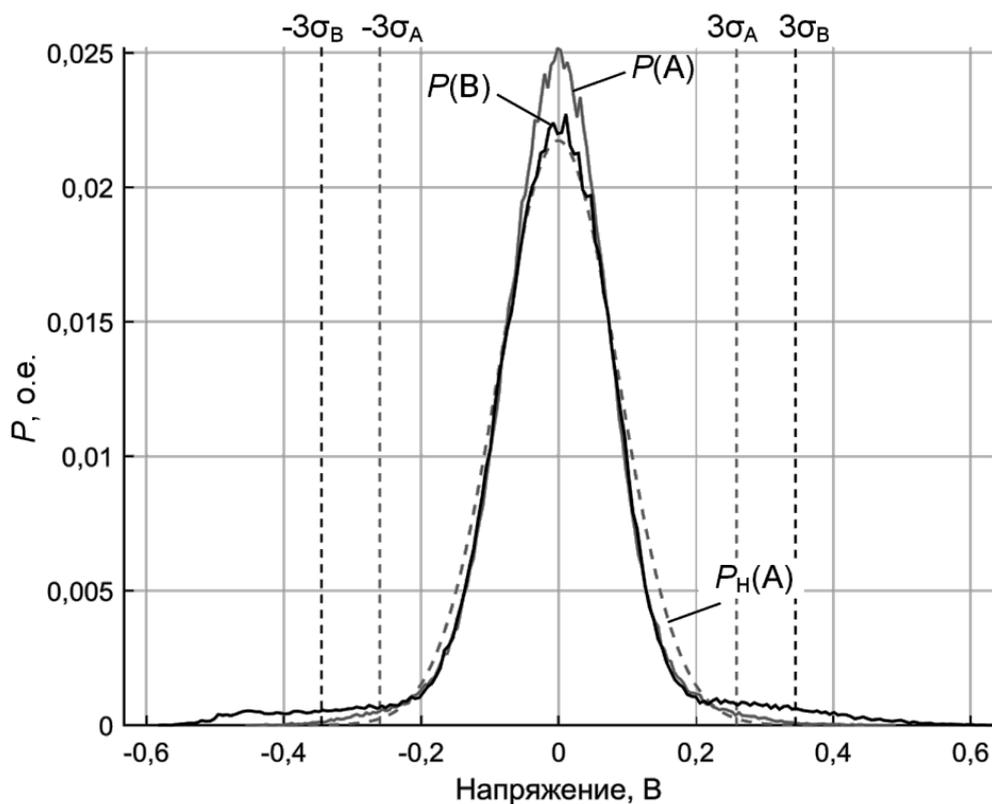


Рисунок 5.8 – Плотность вероятности сигналов А и В после фильтрации

Для этих сигналов, рассчитаны и представлены на рисунке 5.8 функции плотности распределения вероятностей $P(A)$ и $P(B)$ соответственно. Для сравнения на рисунке 5.8 показана плотность нормального распределения $P_H(A)$ с характеристиками математического ожидания и дисперсии, рассчитанными для сигнала А. Как видно, распределение измеренных сигналов имеет много общего с нормальным распределением, однако обнаруживает более острую вершину и «приподнятые» боковые части. Математическое ожидание M_0 мало и составляет менее 0,01% от среднеквадратического отклонения (СКО) σ . Это говорит о в целом успешной фильтрации периодических составляющих (включая постоянную составляющую).

Для указанных сигналов определено среднеквадратическое отклонение σ на интервалах различной длины. Численные показатели таблицы 5.1 подтверждают, что зависимость σ от длины интервала

несущественна, вариация не превышает 10%, тогда как при измерении через большие промежутки времени дало изменение около 25%. Амплитудные значения A_0 сигнала также могут варьировать в больших пределах, что свидетельствует о новых источниках шумов в процессе второго измерения и высокой неопределенности сигналов $u'(k)$.

Таблица 5.1 – Статистические характеристики сигналов в нормальном режиме

Показатель	Длина интервала, мс	Сигнал А, В	Сигнал В, В
σ	20	0,0923	0,1140
σ	200	0,0842	0,1150
M_0	200	$5,3755 \cdot 10^{-6}$	$5,1978 \cdot 10^{-7}$
A_0	200	0,4891	0,6388

Регистрация высокочастотных процессов на другой стороне ЛЭП (ПС 330 кВ Выборгская) производилось с использованием измерительного преобразователя, который обладает свойством фильтра верхних частот. Поэтому измеренный сигнал на рисунке 5.9а имеет значительно меньшую амплитуду промышленной частоты. Как видно из рисунка 5.9б, после фильтрации периодических составляющих амплитуда сигнала, обозначаемого С, снизилась всего в несколько раз. Для двух сигналов С и D, также измеренных в одном узле в разные годы, на рисунке 5.10 построены графики плотности распределения вероятностей $P(C)$ и $P(D)$ соответственно. Математическое ожидание M_0 мало, но графики несимметричны. Можно показать, что сигналы сохранили высокочастотные гармонические компоненты $\sum u_{ПШ}(k)$ [283]. Так, распределение синусоидального сигнала при достаточной частоте его дискретизации имеет β -распределение, а его комбинация с нормальным распределением в

некотором соотношении дает схожее с наблюдаемым распределение, показанное на рисунке 5.11. Видно, что амплитуда гармонических компонент могла быть значительной и изменялась между двумя измерениями.

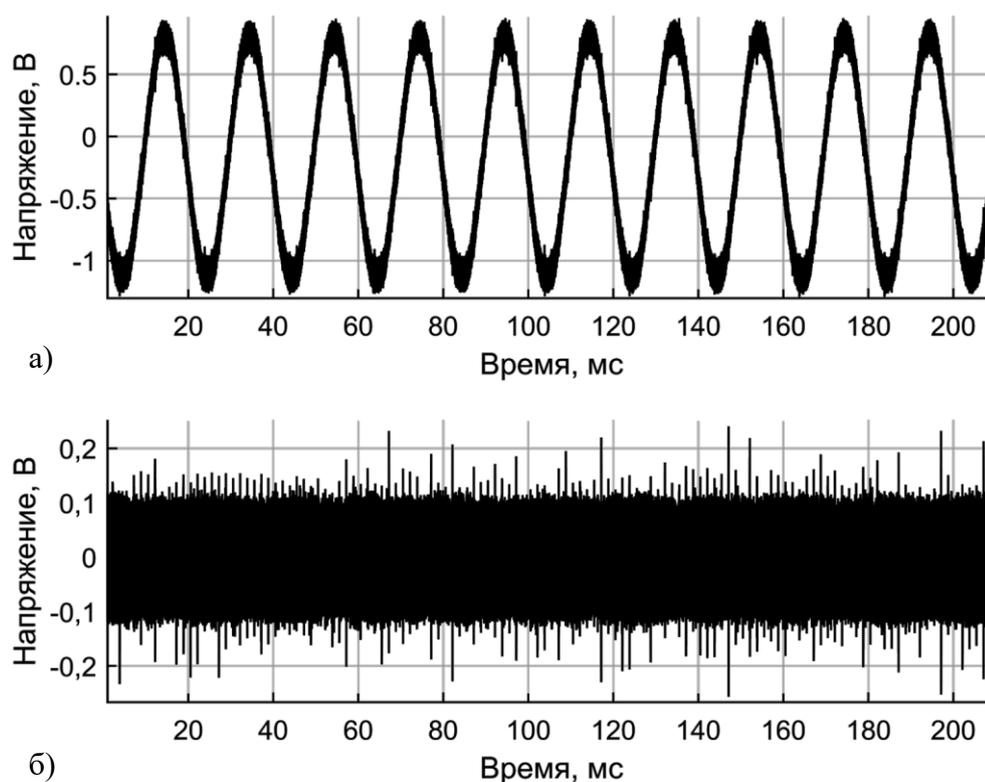


Рисунок 5.9 – Осциллограмма на ПС 330 кВ Выборгская: измеренный сигнал (а); сигнал после фильтрации (б)

Накопленная статистика сигналов при наблюдении на реальных подстанциях указывает на большой разброс величины шума, необходимость определения уставки измерительного органа адаптивно, с учетом текущей интенсивности шума на подстанции. Целесообразно основывать расчет уставки на величине СКО, которая обладает большей стабильностью на различных временных интервалах.

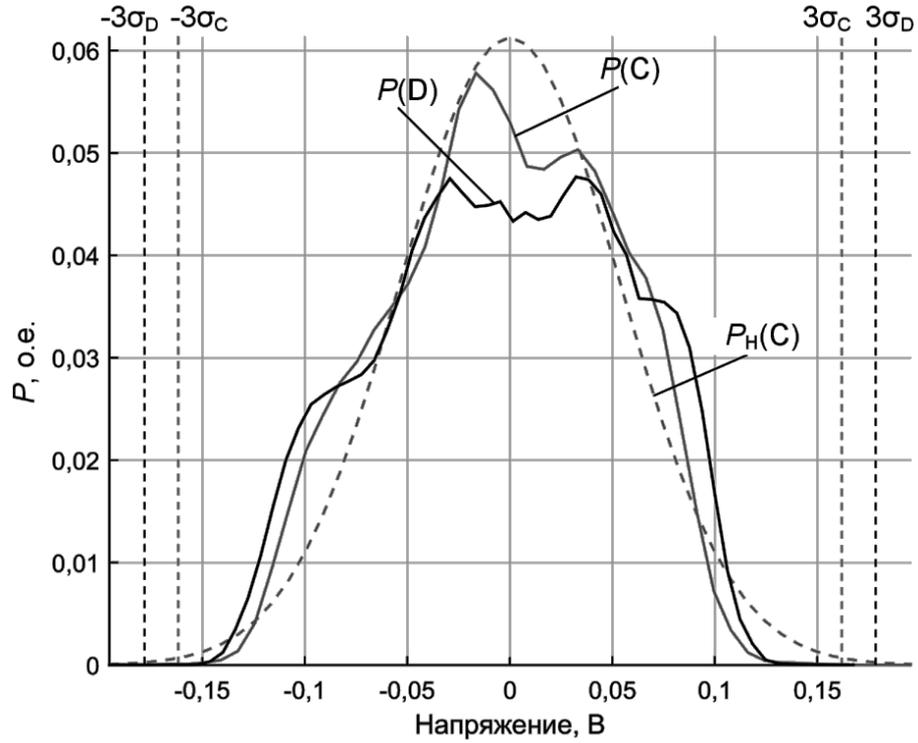


Рисунок 5.10 – Плотность вероятности сигнала после фильтрации на ПС 330 кВ Выборгская

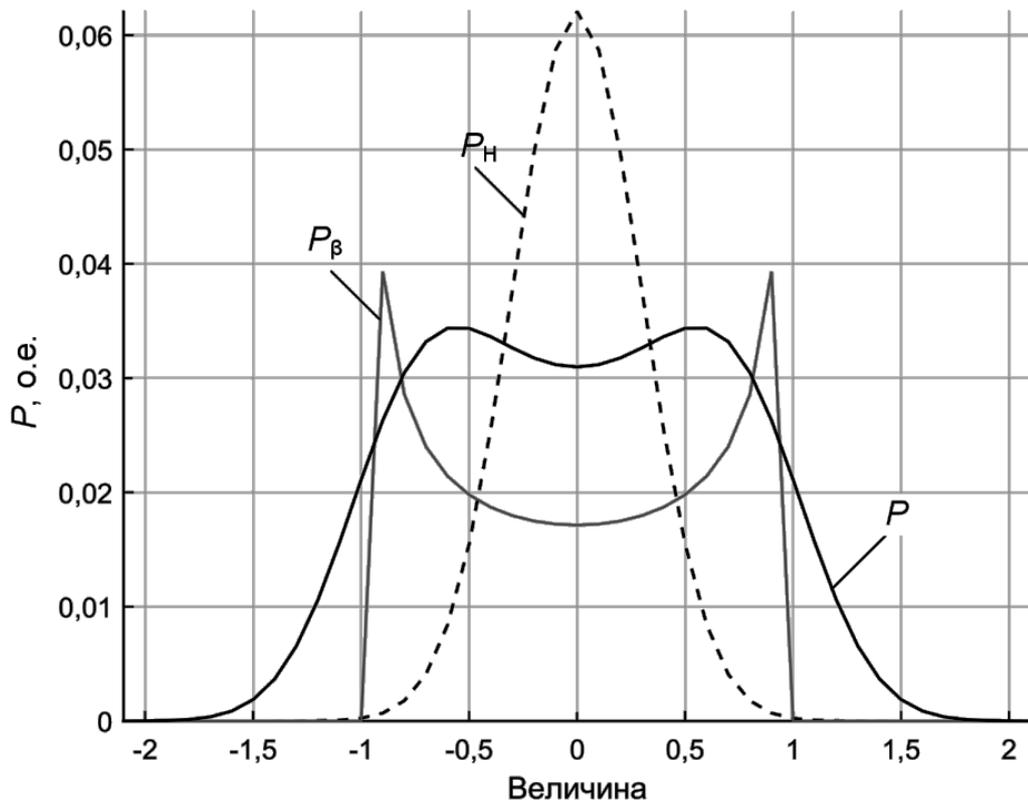


Рисунок 5.11 – Плотность вероятности синтетического сигнала

Измерительный орган, выявляющий начало фронта, может иметь вид

$$|u'(k)| \geq v_{уст}$$

и не должен срабатывать в нормальном (предаварийном) режиме. Уставка должна превышать любое значение сигнала на заданном интервале. Используем соотношение σ и амплитуды A_0 сигналов из таблицы 5.1.

В [285] автором исследовано поведение измерительного органа на осциллограммах при величине уставки от 3σ до 9σ и показано, что излишнее срабатывание возникало при минимальной уставке диапазона и не обнаружено при уставках кратности 6 и 9. Таким образом, в предположении о плавном изменении характеристик шума во времени, возможно выполнить адаптацию $v_{уст}$ к текущему режиму в реальном времени устройства РЗА.

На тех же подстанциях выполнена регистрация режимов однофазного КЗ и предшествовавших им частичных пробоев изоляции (рисунки 5.12 и 5.13). В таблице 5.2 сведены показатели срабатывания измерительного органа с различными уставками. Чувствительность к первой волне повреждения $K_{\text{ч}}$ определена как отношение амплитуды аварийного сигнала к уставке. Важно, что ложные срабатывания измерительного органа отсутствовали при уставке 6σ и более, а с каждым фронтом волны ассоциировано срабатывание.

Задержку срабатывания измерительного органа относительно действительного фронта волны также можно отнести к оценке чувствительности. Превышение уставки $v_{уст} = 9\sigma$ происходило с задержкой на время от 0 до 2 мкс, а при меньших уставках происходило без задержки. Предварительные пробои имеют значительно меньшую амплитуду, поэтому минимальный коэффициент чувствительности измерительного органа оказался в диапазоне от 1,1 до 11,7. Однако запаздывание срабатывания измерительного органа также наблюдалось в диапазоне от 0 до 2 мкс.

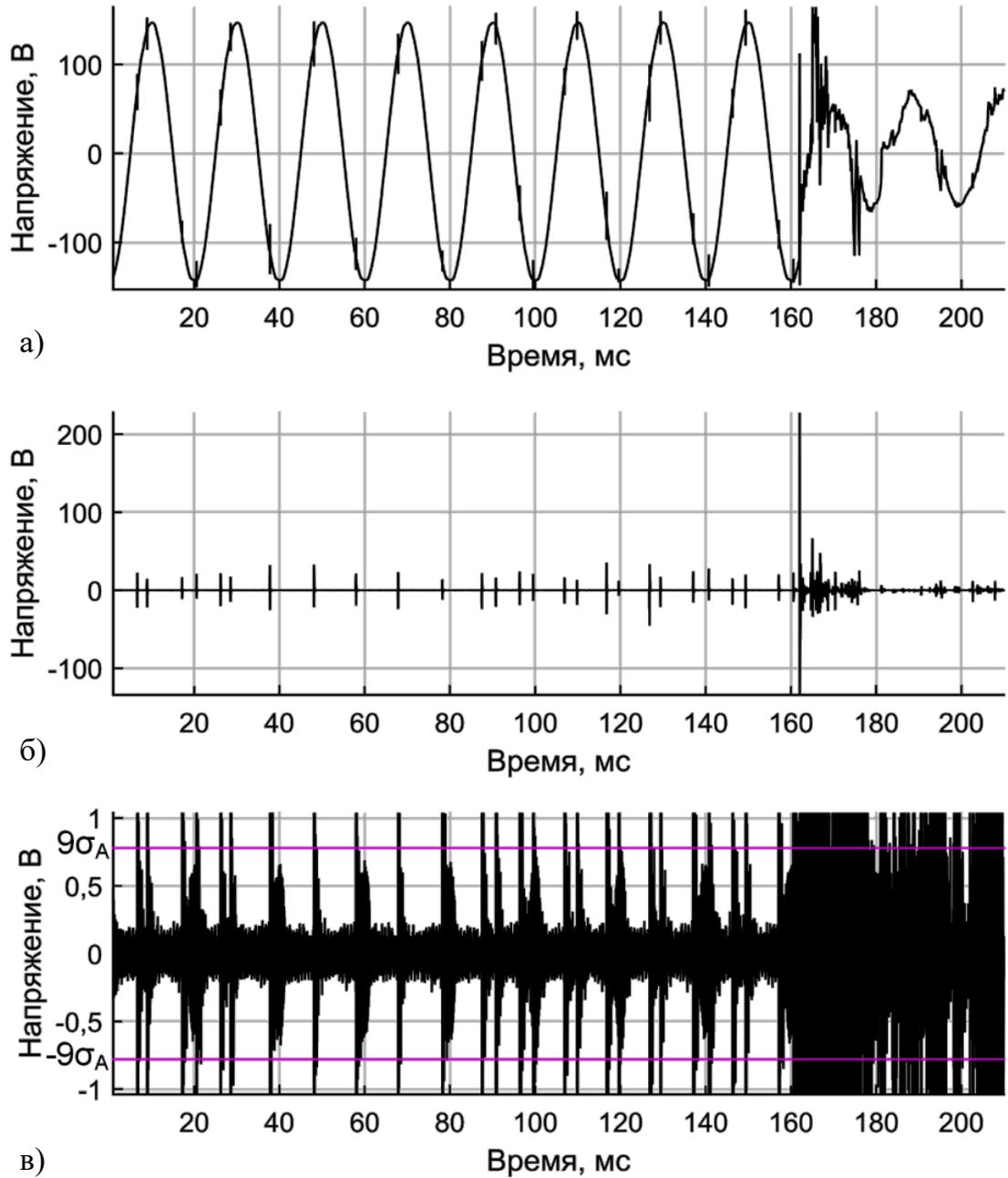


Рисунок 5.12 – Осциллограмма однофазного КЗ: измеренный сигнал (а); сигнал после фильтрации (б); сигнал после фильтрации (в)

Накоплен банк высокочастотных осциллограмм [286,287] на ЛЭП напряжением от 10 до 330 кВ. Анализ данных подтверждает сделанные выводы.

Таблица 5.2 – Показатели чувствительности измерительного органа на ПС 330 кВ Каменногорская

Параметр	Значение уставки $v_{уст}$		
	3σ	6σ	9σ
$K_{\text{ч}}$ на ПС 330 кВ Каменногорская, о.е.	659,4	329,7	219,8
$K_{\text{ч}}$ на ПС 330 кВ Выборгская, о.е.	134,0	67,0	44,7

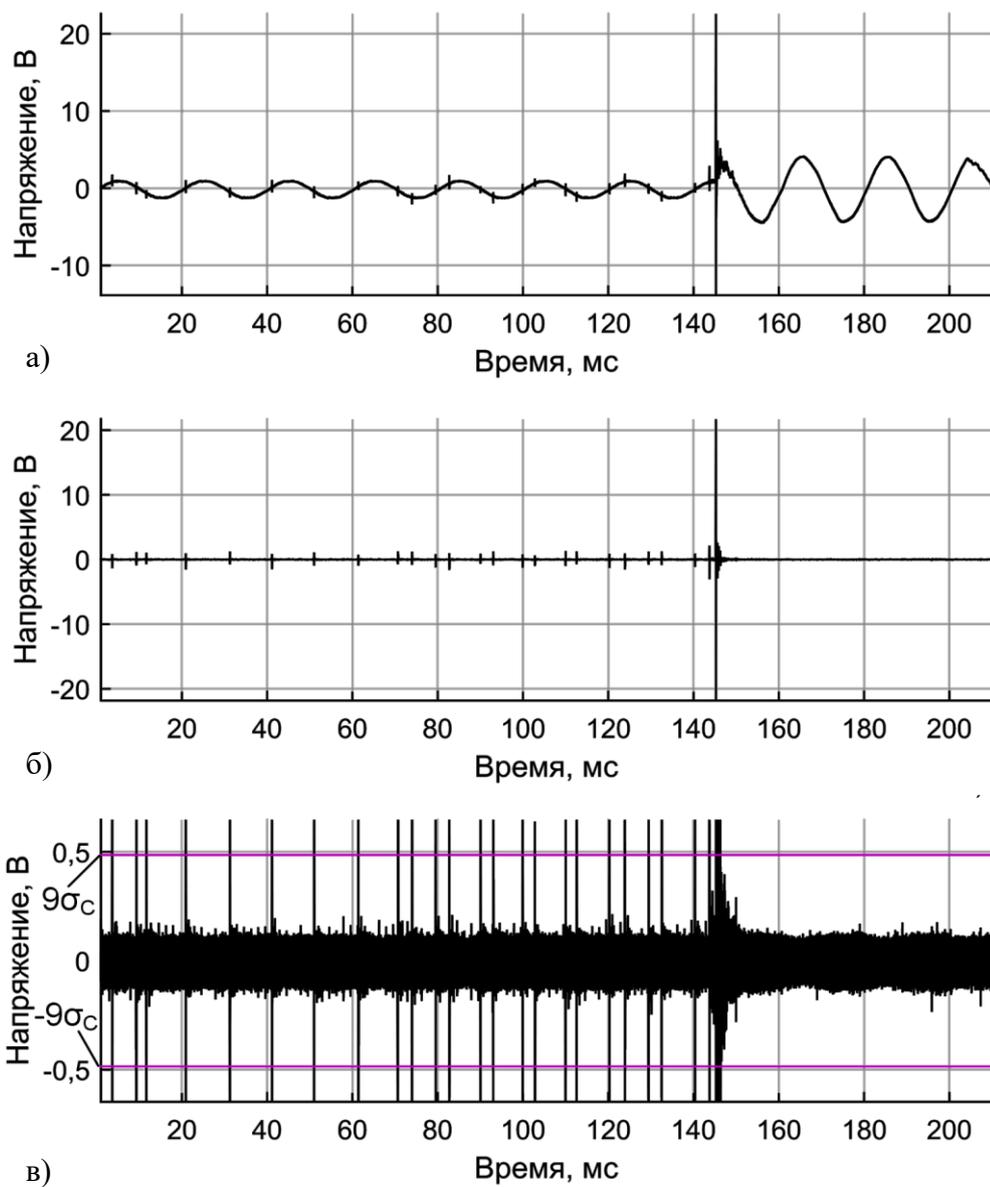


Рисунок 5.13 – Осциллограмма однофазного КЗ: измеренный сигнал (а); сигнал после фильтрации (б); сигнал после фильтрации и границы $\pm 9\sigma$ (в)

Из приведенных примеров можно видеть, что измеряемые в разных режимах сигналы имеют значительные статистические и структурные отличия. Эти отличия повлияли на вероятность срабатывания измерительного органа при малой уставке и на результирующую чувствительность измерительного органа. Тем не менее, предложенный автоматический выбор уставки позволил надежно выявить фронт волны и измерить его начало с высокой точностью.

5.2 Синтез измерительных органов для устройств определения места повреждения с использованием статистической обработки сигналов

5.2.1 Анализ принципов выявления фронта волны при повреждениях

Выявление фронта волны – важнейший этап процедуры ОМП [288]. Существует множество алгоритмов выявления фронта волны, подразделяемых в работе на следующие виды:

- статистические [111],
- с анализом формы кривой (модельные) [289],
- с анализом подобия формы волны (корреляционные) [290],
- пороговые [291],
- фильтровые [292,293].

Как показано выше, в условиях реальной подстанции существенное значение для распознавания волны имеет шум, величина которого не нормируется действующими стандартами. Величина волны (ее амплитуда) может варьировать в широком диапазоне в зависимости от условий повреждения, режимных условий, параметров электрической сети и способа измерения для целей волнового ОМП [294]. Адаптивную отстройку от шумов обеспечивают статистические и отдельные фильтровые решения.

Предложенная выше структура порогового элемента с адаптивной уставкой является средством надежного выявления волнового процесса. Предметом исследования является повышение точности метки времени.

Далее рассмотрен один из перспективных измерительных органов, основанный на статистической оценке последовательности измеренных отсчетов через коэффициент эксцесса [295]. Коэффициент эксцесса является мерой отклонения функции распределения заданной выборки от нормальной. Когда в окно наблюдения такого измерительного органа попадает часть аварийного процесса, эксцесс принимает большие значения, что и является условием срабатывания [296,297].

Вводимая функция эксцесса в работе будет применена к скользящему окну отсчетов электрического или иного сигнала, полученных на интервале времени, – к дискретной выборке X , тогда коэффициент эксцесса вычисляют по формуле

$$\gamma_2 = \frac{\mu_4}{\sigma^4} - 3,$$

где $\mu_4 = E(X - EX)^4$ – четвертый центральный момент X ;

$\sigma = \sqrt{E(X - EX)^2}$ – стандартное отклонение X ;

E – оператор математического ожидания соответствующей случайной величины.

В работе выполнен анализ измерительного органа на основе коэффициента эксцесса для разных видов случайной величины X , которые могут оказаться типичными для волнового ОМП [298]. Далее приведены наиболее важные результаты этого исследования. В режиме срабатывания измерительного органа ожидается, что множество X будет охватывать два примыкающих режима: до коммутации и после коммутации – аварийный режим. Анализ будет проводиться в предположении известных

характеристик процесса, предшествующего коммутации в электрической сети и выраженного подмножеством $X_{\text{пд}}$. Аварийный режим подмножества $X_{\text{ав}}$ содержит отслеживаемую составляющую сигналов переходного процесса при коммутации.

5.2.2 Исследование реакции измерительного органа на прямоугольный импульс на фоне нулевого предшествующего режима

Последовательность X представлена N отсчетами x_i , первые $N-1$ из которых нулевые, а последний отсчет, относящийся к аварийному процессу $X_{\text{ав}}$, равен a . Это условие определяет возможное срабатывание измерительного органа волнового ОМП на первом же отсчете нового, аварийного процесса. Тогда

$$EX = \sum_{i=1}^N x_i / N = a / N .$$

Соответственно, четвертый центральный момент

$$\mu_4 = \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^{N-1} (0 - a/N)^4 + (a - a/N)^4 \right) = a^4 \frac{N-1}{N^4} (N^2 - 3N + 3) .$$

Квадрат стандартного отклонения

$$\sigma^2 = \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^{N-1} (0 - a/N)^2 + (a - a/N)^2 \right) = a^2 \frac{N-1}{N^2} .$$

Тогда коэффициент эксцесса

$$\gamma_2 = N - 5 + \frac{1}{N-1} . \quad (5.4)$$

Этот пример показывает важные свойства величины γ_2 :

- Величина γ_2 для заданной последовательности не зависит от величины приращения a , а определяется лишь длиной последовательности

X . В этом выражается ее преимущество по отношению к пороговому измерительному органу, реагирующему на абсолютную величину или приращение входного сигнала. Отсутствует необходимость выбора уставки измерительного органа.

- Формула (5.4) описывает значение γ_2 и для случая, когда в выборке X соотношение числа отсчетов аварийного режима $X_{\text{пд}}$ и всего объема выборки X соответствует $1:N$. Из этого следует, что при одинаковом объеме последовательностей X коэффициент эксцесса больше для той последовательности, которая содержит больше отсчетов предшествующего режима. На рисунке 3.5 показано, как меняется величина коэффициента эксцесса при смещении плавающего окна измерительного органа на прямоугольную волну при $N = 100$. Величина $\gamma_2(n)$ вычислена по данным окна $[n - N + 1; n]$.

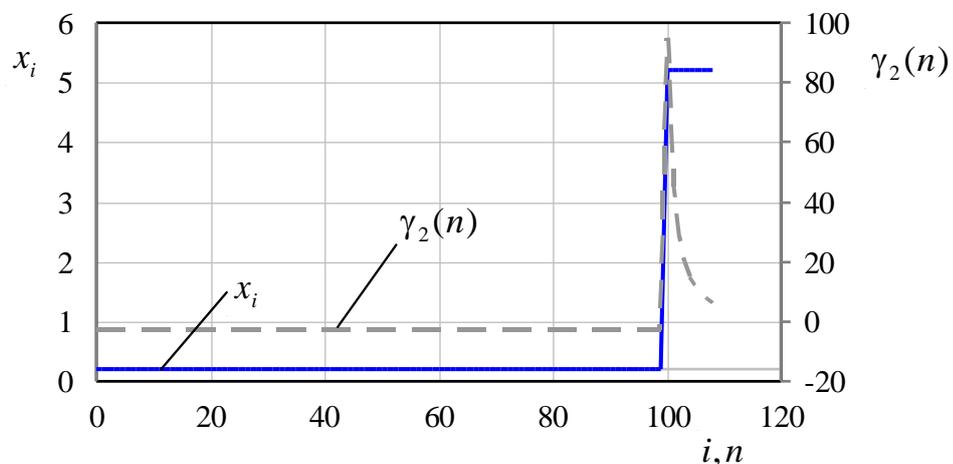


Рисунок 5.14— Коэффициент эксцесса $\gamma_2(n)$ в начале аварийного режима

Из этих двух свойств следует, что длина выборки X должна быть значительной (например, $N = 100$), чтобы обеспечить контраст фронта волны в ее начальный момент.

- Важно отметить, что формула (5.4) справедлива и для выборки, где предшествующий режим представлен одинаковыми ненулевыми отсчетами, а

величина a указывает смещение (приращение) прямоугольной волны, наложенной на продолженный предшествующий режим. Это свойство γ_2 приобретает благодаря использованию в расчете центральных моментов μ_4 и σ^2 .

Из этого следует важное качество γ_2 для анализа электрических сигналов: постоянное смещение электрической величины на любую конечную величину не влияет на значение γ_2 , а значит, и на чувствительность соответствующего измерительного органа. Смещение во входном сигнале могло быть обусловлено способом измерения, фазой возникновения повреждения в сети или низкочастотными (по отношению к частоте дискретизации) составляющими в сигнале.

- Формула (5.4) может использоваться как приближенное значение γ_2 в тех случаях, когда отсчеты в предшествующем режиме не равны между собой и допускают максимальное отклонение δ от среднего $EX_{\text{пд}}$ при условии, что $\delta \ll a$.

- При вычислении функции эксцесса на постоянном сигнале в предшествующем режиме возникает неопределенность при делении на ноль. Истинное аналитическое значение при этом оказывается равно $N - 3$ и превышает значение по формуле (5.4). Это свойство эксцесса указывает лишь на теоретический, но не практический результат, где вычисления с ограниченной точностью могут дать и другие произвольные значения функции эксцесса.

5.2.3 Исследование особенностей срабатывания измерительного органа при нормальном распределении сигнала в предшествующем режиме

По сравнению с рассмотренным выше нулевым предшествующим режимом более реалистичным представляется случай, когда коммутации

предшествует режим, характеризуемый нормальным распределением со стандартным отклонением $\sigma = b$. Поскольку среднее значение предшествующего режима не влияет на расчет γ_2 , то оно принимается нулевым, а величина a рассматривается как отклонение от этого среднего $EX_{\text{пд}}$.

Используем, что для нормального распределения

$$\mu_4 = 3\sigma^4.$$

С учетом нулевого среднего предшествующего режима используем запись:

$$b^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} x_i^2. \quad (5.5)$$

Тогда можно получить:

$$\sigma^4 = \frac{(N-1)^2}{N^4} (b^2 N + a^2)^2. \quad (5.6)$$

Преобразованиями с использованием свойств моментов можно получить:

$$\mu_4 = \frac{N-1}{N^4} (3b^4 N^3 + 6b^2 a^2 N + a^4 N^2 - 3a^4 N^2 - 3a^4 N + 3a^4). \quad (5.7)$$

С использованием (5.6), (5.7) и эквивалентных преобразований получено выражение для коэффициента эксцесса:

$$\gamma_2 = \frac{3}{N-1} - \frac{6}{M} + \frac{N+1}{M^2} - \frac{2}{M^2(N-1)}, \quad (5.8)$$

где $M = (b/a)^2 N + 1$.

Легко убедиться, что при $b = 0$ выражение (5.8) сводится к (5.4) как к своему частному случаю.

Обсуждаемый измерительный орган имеет смысл только при $a > b$, а потому в (5.8) обнаруживается различная зависимость каждого слагаемого от величины N . При больших N значимыми остаются лишь второе и третье слагаемые, в которых M в знаменателе возрастает пропорционально N , но множитель $(b/a)^2$ тормозит это нарастание.

Определим отношение a/b , при котором $\gamma_2 \geq \Gamma$, то есть значение γ_2 достаточно для срабатывания измерительного органа. Прямые требования к величине порога Γ отсутствуют. Очевидно, что большая величина порога обеспечит меньшую чувствительность измерительного органа. Известны значения коэффициента эксцесса для употребимых распределений случайной величины от -3 до $-1,5$. Ограничением сверху можно считать значения, полученные на рисунке 3.5. С некоторой отстройкой примем $\Gamma = 2$, что не позволит срабатывать измерительному органу в предшествующем режиме, но обеспечит некоторую чувствительность к аварийным режимам.

Тогда первым и четвертым слагаемыми можно пренебречь. Граничное значение

$$\delta = (a/b)^2 \approx 3 + \sqrt{M\Gamma}. \quad (5.9)$$

При больших N равенство (5.9) может быть упрощено:

$$a/b \approx \sqrt[4]{M\Gamma}. \quad (5.10)$$

Из (5.8) можно определить, что упрощенные выражения (5.9) и (5.10) справедливы, если $N \geq (6 + \Gamma)/\Delta$, где Δ – принимаемая относительная погрешность оценки δ . Например, если погрешность не должна превышать $\Delta = 5\% = 0,05$, то при прочих заданных параметрах можно получить условие для объема выборки: $N \geq 160$.

Высокую точность оценки граничного отношения дает следующее выражение:

$$(b/a)^2 \approx \frac{1}{3 + \sqrt{M\Gamma}} - \frac{1}{N}. \quad (5.11)$$

Здесь $N \geq 6 + \Gamma$, то есть выражение (5.11) справедливо для больших N .

Как видно из (5.8), (5.9) и (5.11), величина γ_2 зависит от соотношения сигнал-шум: чем больше стандартное отклонение b в предшествующем режиме, тем больше величина M и меньше величина γ_2 , то есть тем менее чувствительным оказывается измерительный орган на основе коэффициента эксцесса. Выражение (5.10) удобно для качественного анализа зависимости между величиной шума (оценивается величиной b), величиной волны (приращение a) и уставкой измерительного органа Γ .

На рисунке 5.15 показана зависимость a/b от произведения $M\Gamma$. Видно, что в широком диапазоне практических значений $M\Gamma$ график имеет пологий характер, а потому измерительный орган обнаруживает почти одинаковую чувствительность. Рисунок 5.15 также демонстрирует аппроксимацию зависимости разными функциями. Как видно, формула (5.11) дает наилучшее приближение в широком диапазоне значений произведения $M\Gamma$.

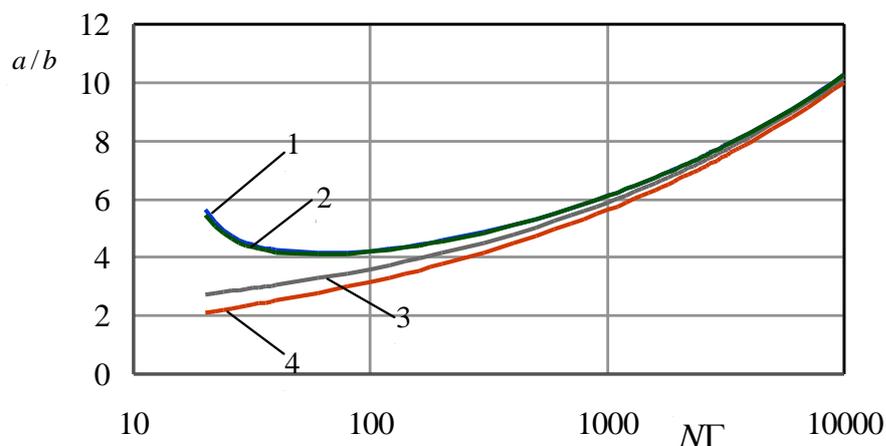


Рисунок 5.15 – Зависимость чувствительности a/b от произведения $M\Gamma$.

Виды расчета: кривая 1 – точный расчет, кривая 2 – формула (5.11),
кривая 3 – формула (5.9), кривая 4 – формула (5.10)

Определим соотношение сигнал-шум измерительного органа, используя формулу мощности:

$$SNR = 10 \lg(a/b)^2.$$

С учетом (5.9) получим:

$$SNR \approx 10 \lg(3 + \sqrt{N\Gamma}) \approx 5(\lg N + \lg \Gamma). \quad (5.12)$$

При малых $\Gamma > 1$ и рассматриваемых значениях N от 100 до 1000 величина SNR находится в диапазоне от 11,5 до 16,5 дБ. Эти значения показывают минимальную необходимую для срабатывания измерительного органа величину отклонения, если срабатывание ожидается на первом отсчете аварийного режима.

В практических задачах соотношения (5.9)-(5.12) позволяют выбрать уставку Γ при заданных N и SNR .

5.2.4 Исследование особенностей срабатывания измерительного органа в условиях периодического сигнала в предшествующем режиме

Рассмотрим случай, когда во входных сигналах присутствует принужденная синусоидальная составляющая. Аналогично предыдущему случаю примем, что стандартное отклонение синусоиды $\sigma = b$, а ее период много меньше τN , где τ – период дискретизации входного сигнала. Последнее условие означает, что принужденная составляющая имеет сравнительно высокую частоту и может быть обусловлена помехами, заграждение которых имело бы негативные последствия для распознавания фронта полезного сигнала аварийного режима.

Поскольку величина среднего значения сигнала в предшествующем режиме не влияет на расчет, оно принимается нулевым, а величина a рассматривается как отклонение от среднего $EX_{\text{пд}}$ предшествующего режима. Для расчета удобно использовать свойства β -распределения [283].

Это распределение описывает выборку, составленную из отсчетов синусоиды, полученных с равным шагом аргумента на целом числе периодов. С учетом введенных ограничений не кратность наблюдаемого интервала и частоты сигнала предшествующего режима не повлияет на результаты расчета. Тогда, используя известные соотношения для β -распределения и изложенный выше аналитический метод, можно получить

$$\gamma_2 = \frac{3}{2(N-1)} - \frac{3}{M} + \frac{3}{M(N-1)} + \frac{N}{M^2} - \frac{1}{2M^2} - \frac{7}{2(N-1)M^2} - \frac{3}{2}. \quad (5.13)$$

Снова определим граничное значение a/b , достаточное для срабатывания измерительного органа $\gamma_2 = \Gamma$:

$$(b/a)^2 \approx \frac{1}{1,5 + \sqrt{N(\Gamma + 1,5)}} - \frac{1}{N}. \quad (5.14)$$

Если принять $N > 50$, то можно определить приближенное соотношение порогов срабатывания измерительных органов на сигналах с различным распределением предшествующего режима: нормальное a_H (из выражения (5.11) и β -распределение a_β (из выражения (5.14)):

$$\frac{a_H}{a_\beta} \approx 4 \sqrt{\frac{\Gamma}{\Gamma + 1,5}} < 1. \quad (5.15)$$

Рассмотренные выборки с нормальным распределением и β -распределением обладают очень разными характеристиками: разной плотностью распределения вероятностей (рисунок 5.16), соответственно неограниченным и ограниченным диапазоном значений отсчетов. Тем не менее, расчет (5.15) и анализ выражения (5.13) демонстрируют, что выделенные для нормального распределения свойства во многом могут быть отнесены и к синусоидальному предшествующему режиму. Отношение сигнал-шум при малых Γ снижается на 1,2 дБ. При больших Γ ожидается почти идентичное срабатывание измерительного органа.

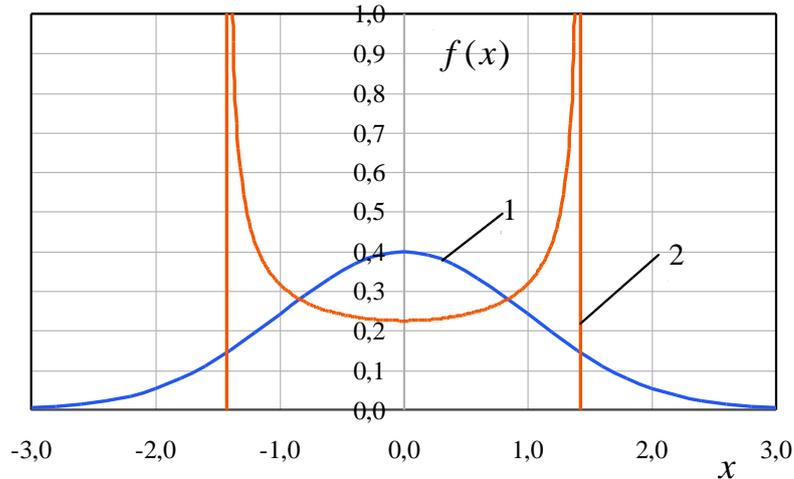


Рисунок 5.16 – Плотность распределения вероятностей $f(x)$ сигналов с нормальным распределением (кривая 1) и β -распределением (кривая 2)

Можно ожидать, что в условиях наложения нормального шума на принужденные составляющие поведение измерительного органа также останется предсказуемым, а характеристики могут быть аппроксимированы формулами (5.11) и (5.14). Это иллюстрирует анализ осциллограммы, записанной в цепях напряжения при повреждении электрической сети 220 кВ. На рисунке 5.17 показано срабатывание измерительного органа в начале аварийного режима при соотношении $a/b = 9,3$ в двух масштабах.

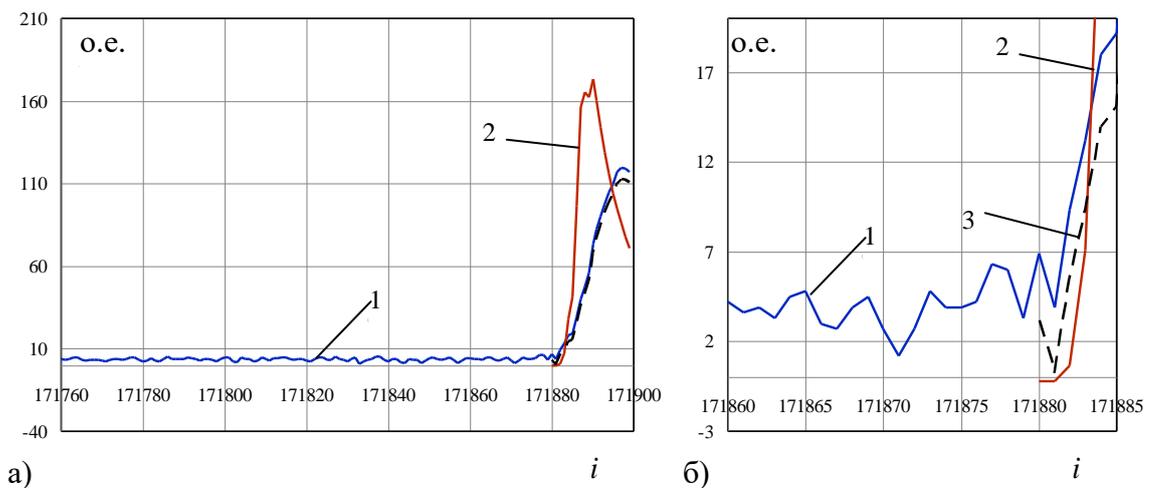


Рисунок 5.17 – Срабатывание измерительного органа на осциллограмме сигнала электрической сети: кривая 1 – входной сигнал x_i , кривая 2 – функция эксцесса γ_2 , кривая 3 – отношение a/b

Неточность соблюдения соотношения (5.14) при срабатывании объясняется дискретностью входного сигнала во времени, а также высокой скоростью нарастания этого сигнала.

Из анализа также следует, что для повышения эффективности (чувствительности) измерительного органа на основе коэффициента эксцесса необходимо максимально ослабить периодические составляющие во входном сигнале, например, при помощи полосовых или адаптивных фильтров. Отметим, что срабатывание измерительного органа на синусоиде предшествующего режима не происходит, поскольку ее амплитудное значение $\sqrt{2}\sigma$ всегда меньше порога срабатывания.

5.2.5 Исследование особенностей срабатывания измерительных органов в условиях линейного нарастания сигнала отслеживаемого режима

Практическое значение имеет анализ поведения функции эксцесса в условиях аварийного сигнала в виде n отсчетов, подчиняющихся линейному закону: $x_{N-n+m} = kbm$, где $m = \overline{1, n}$. Коэффициент k связывает изменение полезного сигнала за единицу времени (интервал дискретизации) с величиной стандартного отклонения сигнала в предшествующем режиме. Здесь, как и ранее, среднее предшествующего режима принимается нулевым.

Очевидно, что если $kb = a$, где a – величина, достаточная для срабатывания измерительного органа на первом же отсчете и найденная выше, то линейное изменение сигнала не изменит описанные выше характеристики срабатывания. Поэтому ставится задача определения величины $k < a/b$, при которой срабатывание измерительного органа происходит не позже отсчета с заданным номером n аварийного режима.

Компоненты коэффициента эксцесса определены поэтапно по изложенному выше алгоритму с той разницей, что n из N отсчетов принадлежат новому режиму с известными моментами.

Для больших N можно получить приближенную формулу:

$$\gamma_2 \approx \frac{k^2 n^2 - 10}{5 \cdot \left(\frac{2}{3} + \frac{N}{k^2 n(n+1)^2} \right)}. \quad (5.16)$$

С большей погрешностью может использоваться и следующая формула, в которой явно прослеживаются основные зависимости параметров:

$$\gamma_2 \approx \frac{k^4 n^3 (n+1)^2}{10N}. \quad (5.17)$$

При поиске приближенных решений (5.16) и (5.17) учтено, что срабатывание измерительного органа ожидается не позже $n \leq 10$, а $N \gg n$. Наибольшая достоверность формул обеспечена вблизи порога срабатывания измерительного органа, выбранного в соответствии с изложенными выше соображениями.

На рисунке 5.18 показано сравнение значений коэффициента эксцесса, определенных по формуле (5.17) и точного расчета для $n = 5$ и $N = 500$ при вариации значения k .

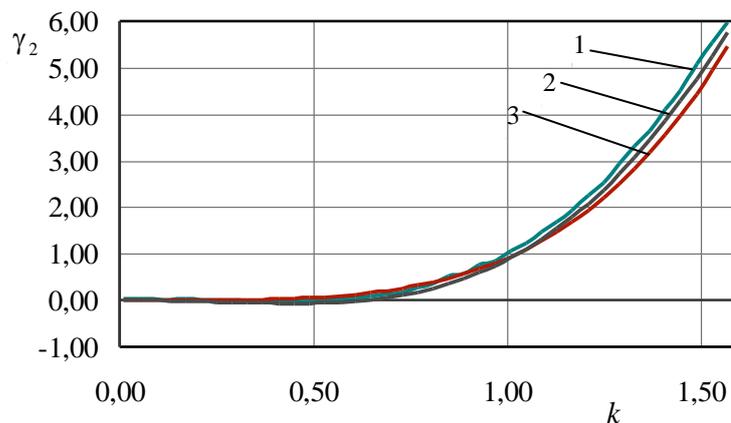


Рисунок 5.18 – Аппроксимация коэффициента эксцесса. Виды расчета:
 кривая 1 – экспериментальные данные, кривая 2 – формула (5.16),
 кривая 3 – формула (5.17)

Как видно, выражение (5.16) обладает высокой достоверностью, а оценка (5.17) оказывается несколько заниженной. Результаты вычислительных экспериментов позволяют сделать следующие выводы:

- При прочих равных увеличение длины окна расчета N снижает значение коэффициента эксцесса, что означает снижение чувствительности измерительного органа или, по крайней мере, затягивание его срабатывания. Это свойство коэффициента эксцесса наблюдалось во всех рассмотренных вариантах аварийного режима.

- Чем выше коэффициент k , то есть чем быстрее нарастает аварийный режим, тем меньше время срабатывания измерительного органа. Коэффициент k и число отсчетов срабатывания n находятся в обратной зависимости, что фактически означает срабатывание измерительного органа при превышении сигналом величины kbn , как при ступенчатом сигнале. Это иллюстрирует рисунок 5.19, построенный при $N = 500$.

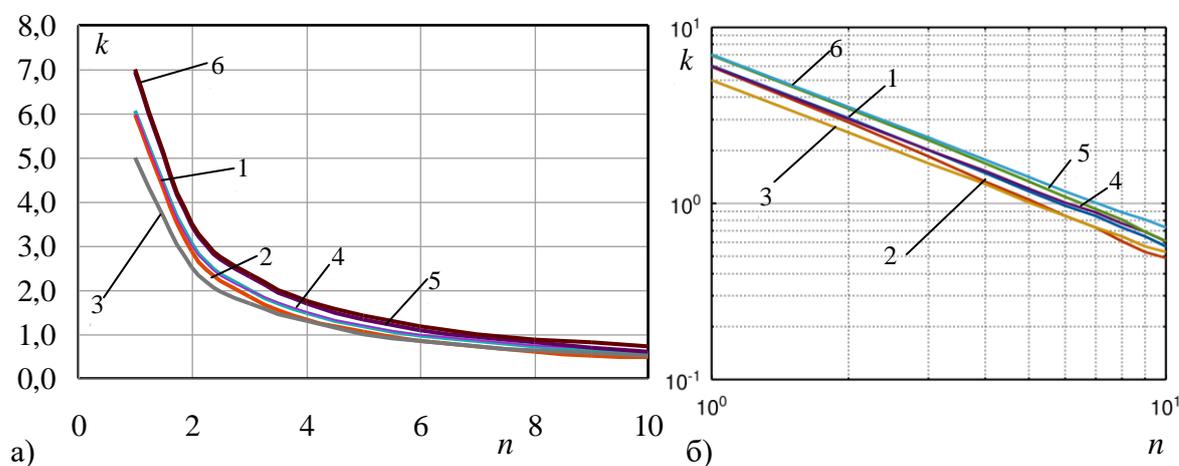


Рисунок 5.19 – Граница зоны срабатывания измерительного органа в линейном (а) и логарифмическом (б) масштабе для кривых: 1 – экспериментальные данные для нормального распределения; 2 – приближение (5.17); 3,4,5 – измерительный орган при $k_S = 5,5$, $k_S = 6,0$, $k_S = 7,0$; 6 – экспериментальные данные для β -распределения

Видно, что расчет по формуле (5.17) дает несколько меньшее значение k при заданном числе отсчетов срабатывания вследствие

завышенной оценки γ_2 . Тем не менее, формула (5.16) правильно указывает аналитическую зависимость коэффициента эксцесса от основных параметров.

Для сравнения на рисунке 5.19 показана граница области срабатывания измерительного органа с синусоидальным предшествующим режимом (кривая б). Чувствительность к аварийному сигналу на этом фоне снижается незначительно.

Схематично запаздывание n_c срабатывания измерительного органа по отношению к началу аварийного процесса с заданным коэффициентом нарастания k показано на рисунке 5.20. Коэффициент k отражен углом наклона отрезка, соединяющего начало координат и отсчет срабатывания. Рисунок также позволяет наблюдать величину $x_N/b = kn_c$ в момент срабатывания измерительного органа. Как видно, в эксперименте она оказалась в диапазоне от 5,5 до 6,1.

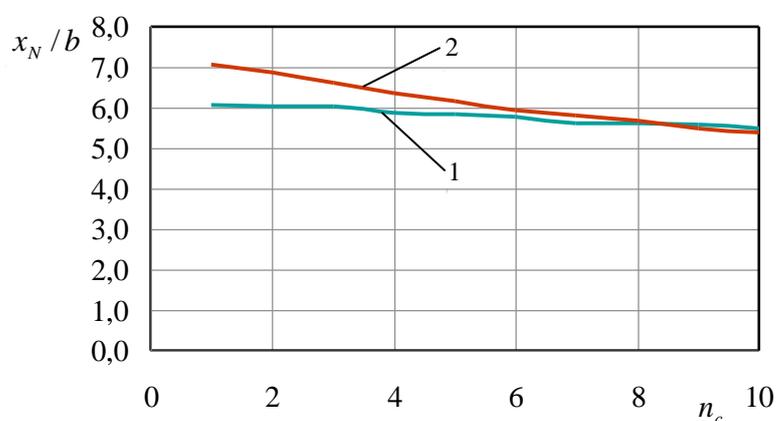


Рисунок 5.20 – Запаздывание срабатывания измерительного органа: кривая 1 – экспериментальные данные, кривая 2 – аппроксимация по выражению (5.17)

- Величина порога kbn отклоняется от расчета (5.14) не более 20%. Это свидетельствует о том, что при больших N для срабатывания измерительного органа на основе коэффициента эксцесса необходима определенная величина отклонения отсчета в аварийном режиме.

- Характеристики функции эксцесса близки к характеристикам измерительного органа со сравнением текущего отсчета x_i со значением $k_S\sigma$, рассчитанного по текущему значению σ и заранее заданному коэффициенту k_S .

Теоретически нормальное распределение не ограничивает диапазон значений множества X , а потому вероятность излишнего срабатывания измерительного органа оценивается вероятностью превышения очередным отсчетом x_i заданного порога. Для найденных выше пороговых величин вероятность такого срабатывания составляет менее 10^{-6} . Мощность единичного импульса невелика, однако коэффициент эксцесса не позволяет регулировать мощность срабатывания контролем длительности превышения порога, так как дальнейший сдвиг окна не приводит к изменению соотношения мощности шума и этого выброса. Поэтому выявленные зависимости нужно рассматривать как характеристики чувствительности измерительного органа. Если выброс не случаен (относится к полезному сигналу), то дальнейшее нарастание сигнала приведет к возрастанию коэффициента эксцесса и его срабатыванию с опозданием, которое можно отнести к разрешающей способности функции эксцесса при выявлении фронта волны. Уточнение метки времени начала процесса и, соответственно, повышение разрешающей способности измерительного органа целесообразно производить с использованием модели сигнала на заданном (найденном) интервале времени, как это показано на рисунке 5.20.

Таким образом, проведенное аналитическое исследование показало, что коэффициент эксцесса обладает характеристиками, которые могут быть использованы для построения измерительного органа выявления фронта волны. К его положительным свойствам относятся адаптивность к фоновому шуму в сигнале, а также универсальность применения, в том числе и к

величине принужденных составляющих. При рассмотренных значениях параметров коэффициент эксцесса обеспечивает отношение сигнал-шум от 11 до 17 дБ, что вполне удовлетворяет требованиям РЗА. При необходимости эта величина может быть скорректирована путем изменения параметров расчета. Анализ показал, что вне зависимости от вида распределения выборок предшествующего режима поведение измерительного органа универсально описывается величиной отклонения при срабатывании.

5.3 Повышение чувствительности измерительных органов волнового определения места повреждения путем компенсации искажения сигналов

5.3.1 Синтез модели электрической сети с применением операторного метода

Дальнейшее повышение чувствительности измерительных органов волнового ОМП связано с преобразованием величин в алгоритмическое пространство на основе имитационных моделей ЛЭП. Действительно, фронт волны искажен в ЛЭП и в измерительных цепях на подстанции [299]. Кроме того, форма фронта волны и дальнейший переходный процесс определяются структурой и параметрами всех элементов ЛЭП и примыкающих подстанций [224,300,301].

Полное описание электрической сети возможно в дифференциальных уравнениях с учетом особенностей нелинейных элементов (например, разрядников и иных ограничителей тока и напряжения в первичных и вторичных цепях) [302]. Однако наиболее перспективным видится использование операторного метода, который способен воспроизводить как частотные, так и переходные характеристики элементов [303]. Кроме того, с его помощью возможно создание моделей для использования с данными

дискретных систем (например, цифровой РЗА). Существует решение [304], которое достаточно достоверно воспроизводит процессы и учитывает прямые и обратные волны, а также их переотражения, возникающие в местах неоднородностей. В настоящей работе решение несколько упрощается для целей пассивного волнового ОМП.

В работе предложен подход, детально раскрытый в [305], при котором каждому элементу сети ставится в соответствие передаточное звено, а звенья соединяются специальными узлами направленного графа. Аналогично [304] создаются каналы для двухстороннего распространения сигналов по электрической цепи.

На рисунке 5.21а представлена схема соединения двух двухпроводных участков ЛЭП с различными параметрами. В месте их сопряжения образуется отражение [302], а потому в схеме модели на рисунке 5.21б возникает переход на обратную ветвь, где отражение накладывается на преломление волны из другой линии. Передаточные функции звеньев W_1 и W_2 рассчитываются по известным выражениям, например, длинных линий с известными величинами длины участка ЛЭП l , волнового сопротивления Z_c , коэффициента распространения γ , в общем случае сохраняющим зависимость от p [302]. Для сигналов напряжения, например, функции имеют вид, $i, j = \{1;2\}$:

$$W_i(p) = e^{\gamma_i(p)l_i}.$$

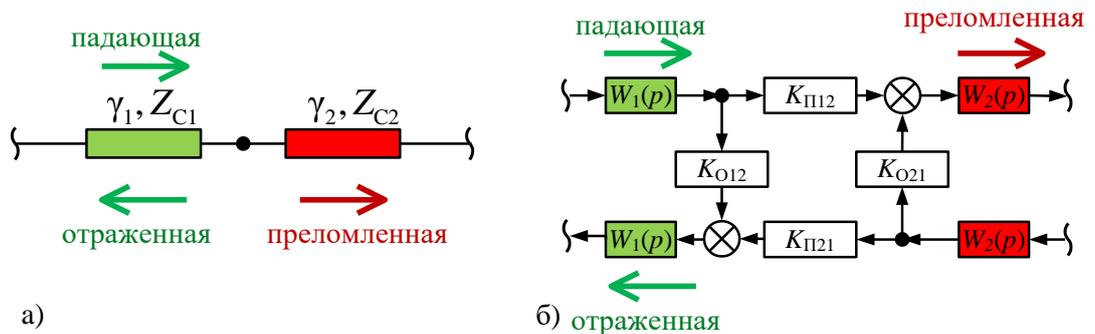


Рисунок 5.21 – Схема соединения двух длинных линий (а) и ее модель (б)

Коэффициенты преломления $K_{\Pi ij}$ и K_{Oij} :

$$K_{\Pi ij}(p) = \frac{2Z_{cj}(p)}{Z_{c1}(p) + Z_{c2}(p)}; \quad K_{Oij}(p) = \frac{Z_{cj}(p) - Z_{ci}(p)}{Z_{c1}(p) + Z_{c2}(p)}.$$

Аналогично построена модель соединения трех длинных линий. На рисунке 5.22б показан переход волны из участка с индексом 1 в линии 2 и 3. Коэффициенты преломления и отражения рассчитаны с учетом параллельного соединения ветвей $i, j, k = \{1;2;3\}$:

$$K_{\Pi ij} = K_{\Pi ik} = \frac{2(Z_{Ci}(p) \parallel Z_{Ck}(p))}{Z_{Ci}(p) + Z_{Cj}(p) \parallel Z_{Ck}(p)};$$

$$K_{Oi} = \frac{Z_{Cj}(p) \parallel Z_{Ck}(p) - Z_{Ci}(p)}{Z_{Cj}(p) \parallel Z_{Ck}(p) + Z_{Ci}(p)},$$

где $a \parallel b$ – операция расчета эквивалента по формуле: $ab/(a + b)$.

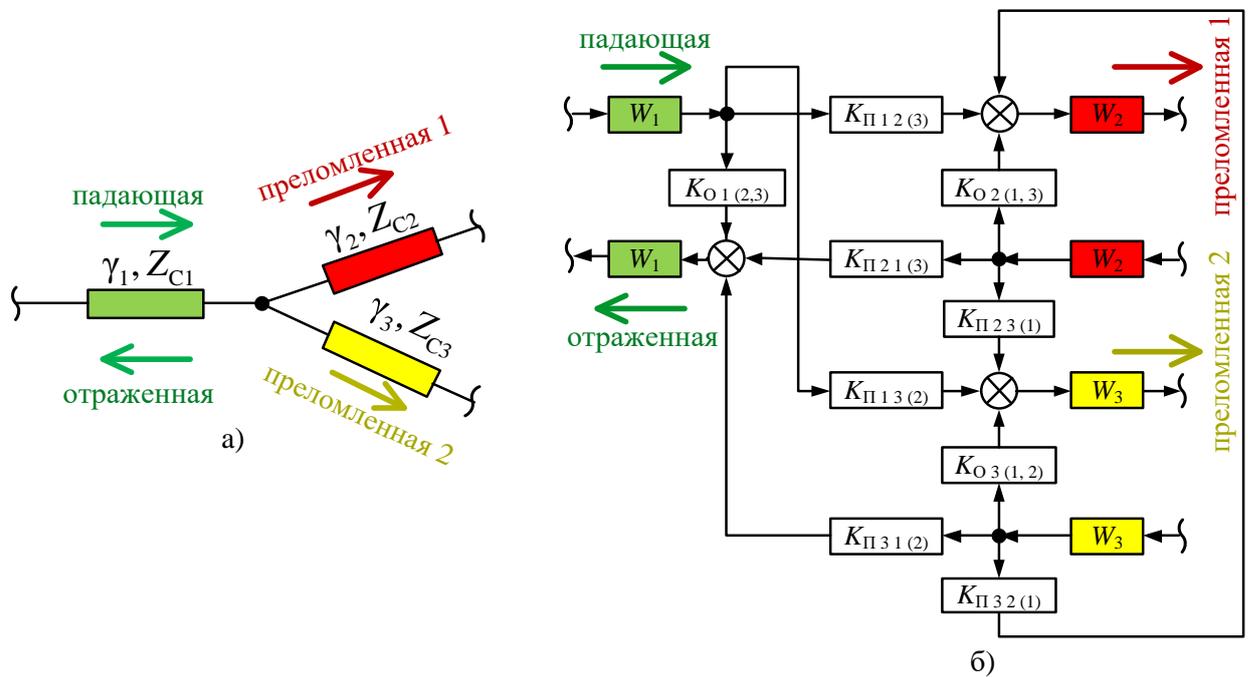


Рисунок 5.22 – Схема соединения трех длинных линий (а) и ее модель (б)

На основе приведенных правил составляется эквивалентная схема сети, которая связывает точки наблюдения ЛЭП (выход) и точки приложения

воздействий (вход). В результате может быть получено выражение передачи:

$$Y(p) = W(p)X(p), \quad (5.18)$$

где $X(p)$ и $Y(p)$ – изображения входной и выходной величин соответственно;

$W(p)$ передаточная функция.

Передаточная функция определяет как частотные свойства цепи, так и реакцию на ступенчатое воздействие, характерное для коммутаций в электрической сети. Реакция модели на дельта-функцию Дирака дает весовую функцию $g(t)$, которая представляет собой оригинал передаточной функции [306]:

$$g(t) = \frac{1}{2\pi j} \int_{c-j\infty}^{c+j\infty} e^{pt} W(p) dp,$$

где c – константа, выбранная по определенным требованиям.

Если входная и выходная величины известны, то может решаться обратная задача – идентификация модели с неизвестной структурой и параметрами [307]. В цифровой РЗА измерения доступны в дискретной форме, а потому в работе идентификация осуществляется на основе дискретного аналога уравнения Винера-Хопфа [308]:

$$R_{YX}[n] = \sum_{k=0}^{N-1} g[k] R_{XX}[n-k] \Delta t,$$

где $n = -N + 1, -N + 2, \dots, N - 1$;

Δt – интервал дискретизации.

Весовую функцию определяют по выражению:

$$\mathbf{g} = \frac{1}{\Delta t} \mathbf{R}_{XXm}^{-1} \mathbf{R}_{YX}^T, \quad (5.19)$$

где \mathbf{g} – вектор-столбец весовой функции;

\mathbf{R}_{YX} – вектор-строка взаимной корреляции входного и выходного сигналов;

\mathbf{R}_{XXm} – квадратная матрица, полученная на основе автокорреляции \mathbf{R}_{XX} входного сигнала, причем $R_{XXm}[n, k] = R_{XX}[-n + k]$, $n = 0, 1, \dots, N - 1$, $k = 0, 1, \dots, N - 1$.

Вектор весовой функции может быть использован для определения реакции идентифицированного звена на воздействие:

$$\hat{\mathbf{y}} = \frac{1}{\Delta t} \mathbf{g} * \mathbf{x}.$$

Возможно решение и обратной задачи – оценка входного сигнала по известному выходному вектору \mathbf{y} :

$$\hat{\mathbf{x}} = \frac{1}{\Delta t} \mathbf{g}_r * \mathbf{y},$$

где \mathbf{g}_r – вектор, полученный из матрицы \mathbf{g}_m^{-1} ;

$$g_m[n, k] = \begin{cases} g[-n + k], & k \geq n; \\ 0, & k < n; \end{cases} \quad n = 0, 1, \dots, N - 1; \quad k = 0, 1, \dots, N - 1.$$

5.3.2 Компенсация искажений измерительных преобразователей с использованием их моделей

Для целей регистрации волновых процессов в ЛЭП целесообразно использовать измерительные преобразователи тока и напряжения, установленные на ЛЭП для целей современной РЗА, имеющей, как правило, алгоритмы срабатывания по параметрам аварийного режима [309]. Прямой анализ характеристик ИП связан с подачей высокочастотных сигналов на высоковольтное оборудование и потому вызывает затруднения на практике.

Поэтому разработан алгоритм их анализа с применением методов идентификации [310]. Проводится пассивный эксперимент, в котором источником сигнала может являться, например, коммутация в энергосистеме. Сигнал коммутации близок по своему спектру сигналу КЗ, а потому возможно получить характеристики ИП в широком диапазоне частот. Такое измерение возможно в рабочем режиме энергообъекта.

Эксперимент предполагает измерение двух сигналов: на входе и на выходе исследуемого объекта – ИП. Выходной сигнал измеряется во вторичных цепях РЗА. Входной сигнал должен быть измерен на первичной стороне оборудования, например, при помощи емкостного делителя (рисунок 5.23). Практические аспекты такого измерения изложены в [311].

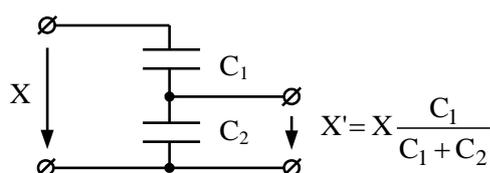


Рисунок 5.23 – Схема емкостного делителя

Для примера подстанции (рисунок 5.24), где в сетях высокого напряжения трансформатор напряжения (ТН) установлен на шинах, а конденсатор связи (КС) – за высокочастотным заградителем (ВЧЗ) со стороны ЛЭП, составлена операторная модель, показанная на рисунке 5.25 [312].

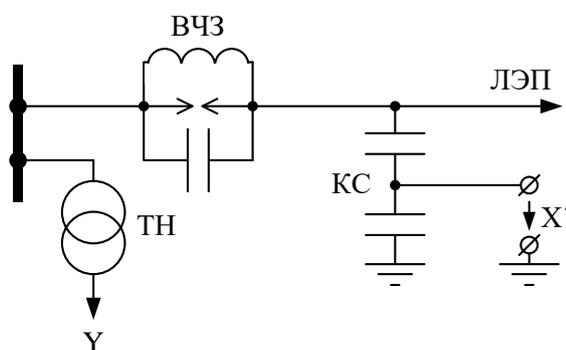


Рисунок 5.24 – Схема измерения напряжений на подстанции

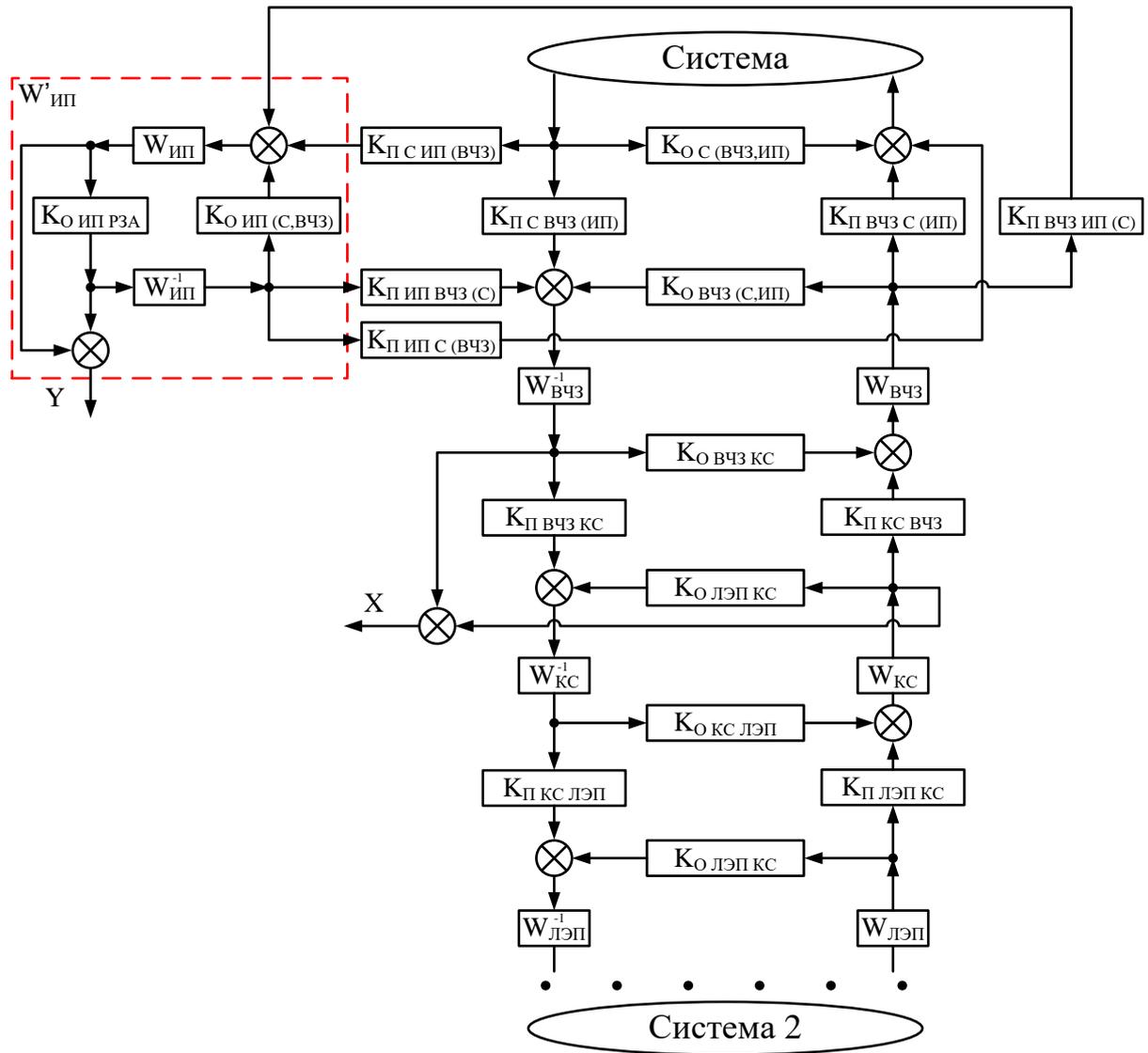


Рисунок 5.25 – Схема соединения эквивалентных звеньев электрической цепи

На рисунке 5.25 показана схема только одной модальной составляющей. Предполагаются симметрия расположения всех фаз, а также наличие ВЧЗ и КС во всех фазах и их одинаковая настройка. Условия относительно ВЧ связи, как правило, не выполняются, поскольку ВЧ оборудование настраивается на разные частоты и может быть установлено не во всех фазах. Вследствие этой несимметрии происходит переход волны между модальными составляющими. Соответственно, в схеме должны быть показаны связи между тремя модальными составляющими (аналог комплексной схемы замещения в методе симметричных составляющих). В

данной работе в качестве примера рассматривается симметричная схема, поэтому указанные связи не приведены.

Как было показано в [313], ИП практически не оказывает влияния на процессы в первичной сети. Поэтому можно пренебречь некоторыми связями ($K_{П\text{ ИП ВЧЗ}(С)} = K_{П\text{ ИП С}(ВЧЗ)} \ll 1$) и преломлениями ($K_{П\text{ С ВЧЗ}(ИП)} = K_{П\text{ С ИП}(ВЧЗ)} = K_{П\text{ ВЧЗ С}(ИП)} = K_{П\text{ ВЧЗ ИП}(С)} \approx 1$). В таком случае возможно упрощение эквивалентной схемы в условиях, когда к шинам подстанции не подключены другие присоединения (рисунок 5.26). Получена связь входа и выхода в операторной форме $Y(p) = W_{\text{ЭКВ}}(p)X(p)$.

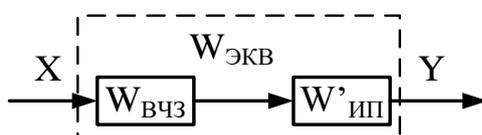


Рисунок 5.26 – Упрощенная схема соединения передаточных функций

По рисунку 5.26 видно, что при идентификации может быть определена только эквивалентная передаточная функция ВЧЗ и ИП [307]. Для проведения эксперимента требуется выполнение условий: нулевые начальные условия, ограниченное по времени входное воздействие и неограниченное время наблюдения после воздействий. Последнее условие из практических соображений ограничивалось снижением уровня сигналов на 30 дБ [311].

На рисунке 5.27 приведен пример осциллограммы напряжения одной из фаз (напряжение линии приведено ко вторичному напряжению), полученной при математическом моделировании эксперимента в среде MatLab/Simulink.

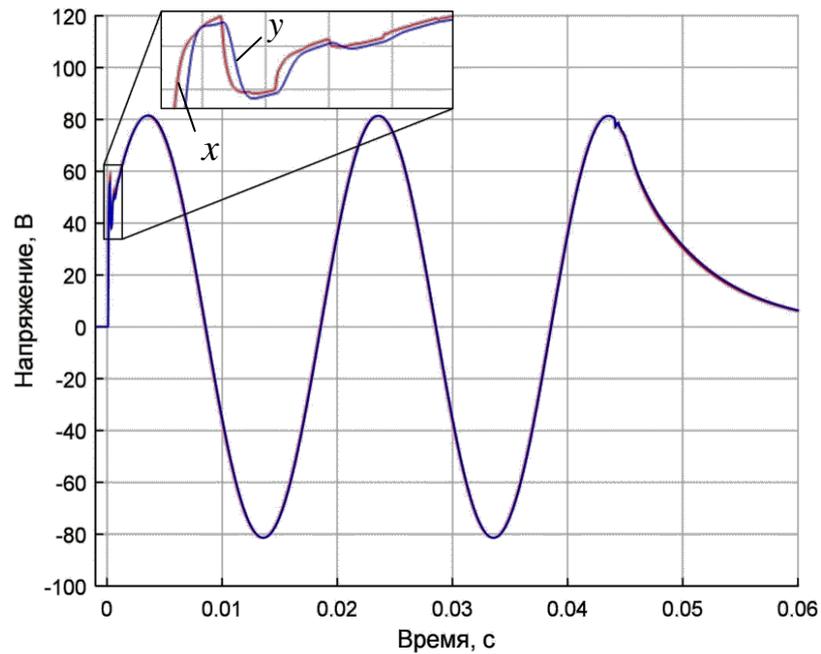


Рисунок 5.27 – Осциллограмма при включении и отключении ЛЭП

По осциллограмме видно, что длительность подачи синусоидального напряжения составила около 45 мс, после чего происходит саморазряд ЛЭП. Процесс условно завершается в момент времени 100 мс. При частоте дискретизации 1 МГц размер обрабатываемой матрицы в формуле (5.19) составляет $(10^5)^2$ элементов, и операция обращения представляет большую сложность. По осциллограмме также видно, что постоянная времени саморазряда ЛЭП на порядки больше, чем собственные постоянные времени преобразователя.

Предложен альтернативный подход для снижения длительности наблюдения. К измеренным сигналам применены одинаковые преобразования $W_{\Phi}(p)$:

$$X_1(p) = W_{\Phi}(p)X(p);$$

$$Y_1(p) = W_{\Phi}(p)Y(p).$$

Тогда согласно правилам преобразования схем [314] по рисунку 5.28

$$Y_1(p) = W_{\text{ЭКВ}}(p)X_1(p).$$

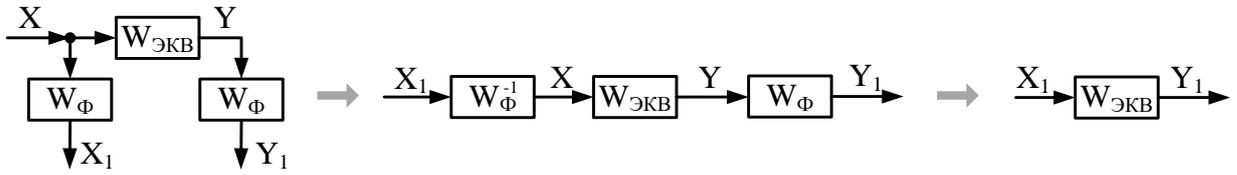


Рисунок 5.28 – Преобразования схемы с применением промежуточных фильтров

В качестве W_{Φ} предлагается использовать полосовой фильтр, подавляющий частоту 50 Гц. Анализ результата идентификации вблизи частот заграждения становится невозможным, однако эта область, как показано выше, не представляет интерес для волнового ОМП. Определена весовая функция g и выполнено восстановление сигнала \hat{x} в линии по вторичному напряжению y_1 , результат показан на рисунке 5.29. Задержка восстановленного напряжения относительно измеренного напряжения линии на время $t_3 = 8 \text{ мкс}$ является параметром идентификации, определяет коэффициент усиления звена и потому влияет на стабильность решения.

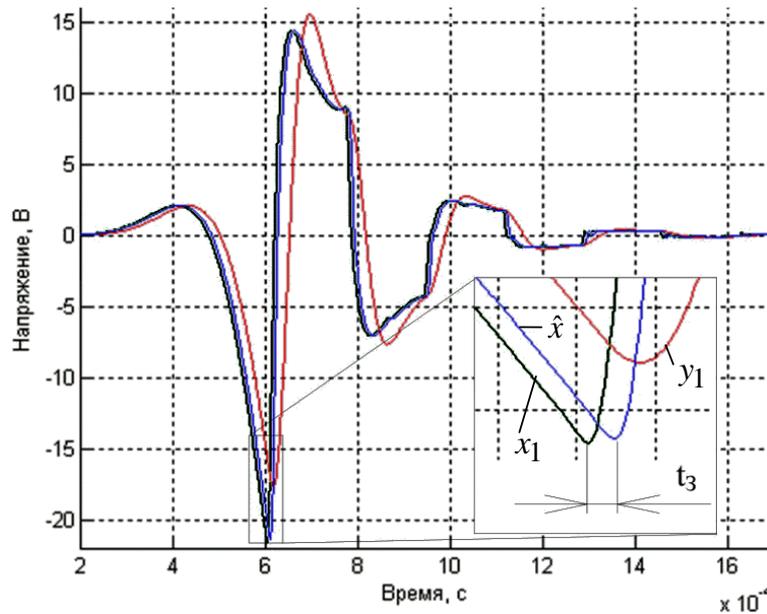


Рисунок 5.29 – Результат восстановления сигнала в ЛЭП

Рисунки 5.30 и 5.31 иллюстрируют результаты применения функции

восстановления к осциллограммам подачи напряжения на ЛЭП и возникновения КЗ.

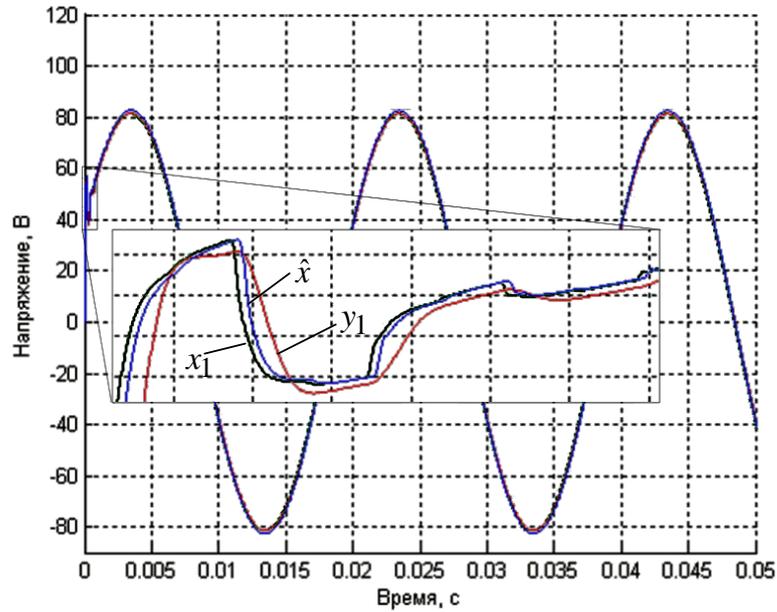


Рисунок 5.30 – Восстановление сигналов при подаче напряжения на ЛЭП

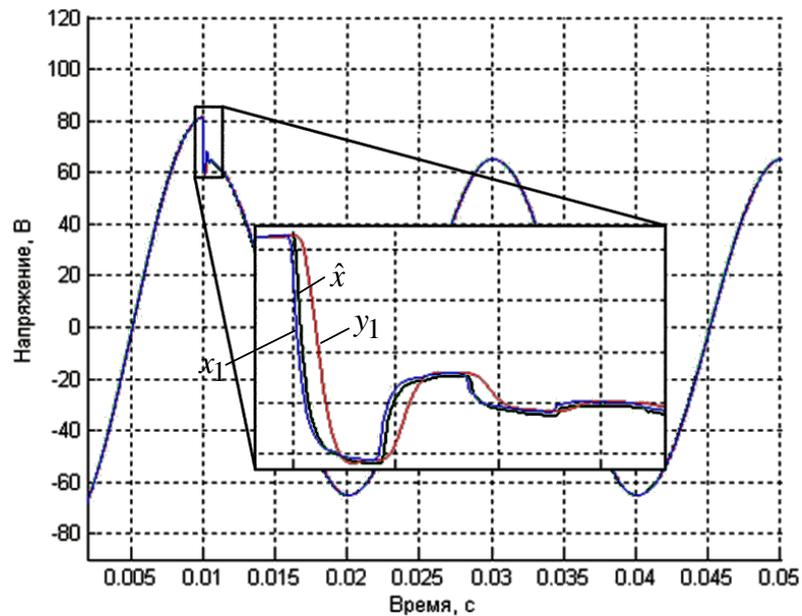


Рисунок 5.31 – Восстановление сигналов при возникновении КЗ на ЛЭП

В таблице 5.3 приведено среднеквадратическое отклонение сигналов u и \hat{x} от приведенного ко вторичной стороне напряжения линии x на интервале 1 мс после коммутации. Выполнена алгоритмическая компенсация

задержки t_3 .

Таблица 5.3 – Анализ результатов восстановления сигналов

Режим	Среднеквадратическая ошибка, В		Снижение ошибки, %
	y	\hat{x}	
Рисунок 5.30, использован W_{Φ}	4,60	0,04	99
Рисунок 5.30	5,63	0,17	97
Рисунок 5.31	2,53	0,34	87

Из таблицы видно, что применение предложенного метода восстановления сигнала позволило снизить отклонение измерений на 87% и более. При этом в экспериментах достигнуто ускорение срабатывания измерительного органа фронта волны до 13 мкс.

5.3.3 Синтез модели линии и электрической сети и ее использование при выявлении отражений от повреждения

Наблюдение ЛЭП в разных точках позволяет идентифицировать отдельные свойства ее модели. На рисунке 5.32а показана ЛЭП с подключением измерительных преобразователей и внешним воздействием (коммутацией) X' . Реакции Y_1 и Y_2 наблюдаются двумя синхронизированными измерителями, подключенными к ИП1 и ИП2.

Для достаточно короткого интервала времени до появления первых переотраженных волн в месте наблюдения модель упрощается – остаются только волноводы первой падающей волны, что отражено на рисунке 5.32б. Падающая волна X' претерпевает первое преломление на шинах ИП1 и образует волну X . После перестановки звеньев и переноса воздействий получена схема на рисунке 5.32в относительно двух измерений РЗА.

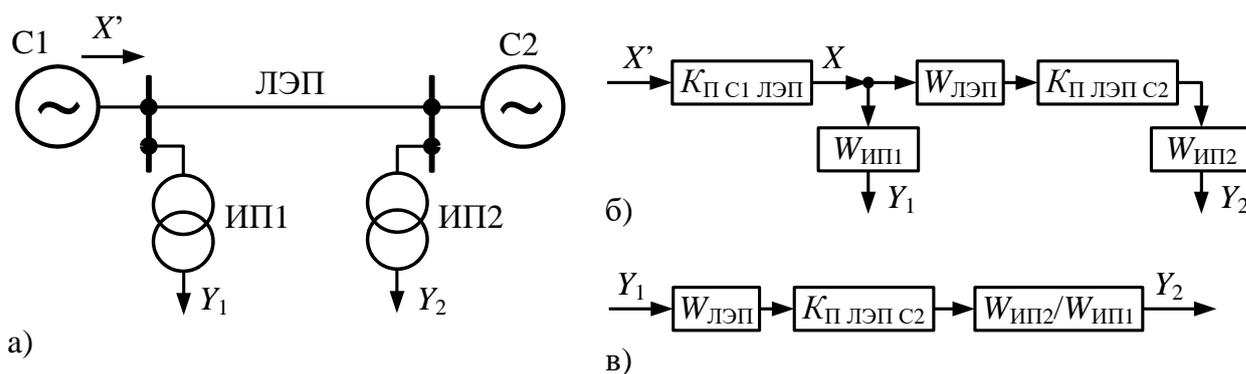


Рисунок 5.32 – Схема фрагмента сети (а), схема воздействий при внешнем КЗ (б) и преобразованная схема воздействий (в)

Величина $K_{П\ ЛЭП\ C2}$ зависит от текущей оперативной схемы подстанции. В частном случае для линии на холостом ходу и подключения ИП2 к линии можно принять полное отражение: $K_{П\ ЛЭП\ C2} = 2$. Величина $W_{ИП2} / W_{ИП1}$ может рассматриваться как постоянная характеристика объекта независимо от места КЗ. Так, при внутреннем КЗ схема воздействий на рисунке 5.33а после перестановки звеньев и переноса воздействий преобразуется в схему на рисунке 5.33б, где также присутствует величина $W_{ИП2} / W_{ИП1}$. Для частного случая симметричной ЛЭП преобразования [313] приводят к упрощению модели ЛЭП до рисунка 5.33в, если выделен сегмент ЛЭП, для которого $W_{2\ ЛЭП}'' = W_{1\ ЛЭП}$.

Выполнен расчет по осциллограммам реальных внутренних КЗ на КВЛ 220 кВ Томмот–Маяя длиной 434,7 км. ЛЭП имеет симметричную структуру. Расстояние между проводами варьируется незначительно, марка провода неизменна на протяжении 99,8% длины линии. ИП на подстанциях однотипные. Графики первой моды напряжений на двух сторонах ЛЭП показаны на рисунке 5.34 с совмещением начала отсчета времени. Рассматриваемое КЗ находится на расстоянии 120,3 км от ИП1 и 314,4 км от ИП2, а потому $W_{2\ ЛЭП}'$ описывает участок линии длиной $314,4 - 120,3 = 194,1$ км.

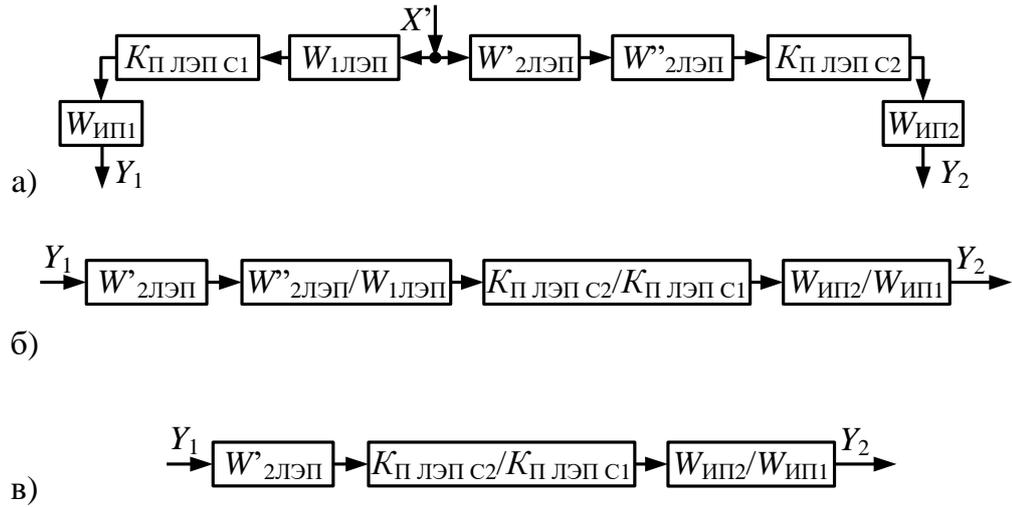


Рисунок 5.33 – Схемы воздействий при внутреннем КЗ: исходная (а), преобразованная (б) и упрощенная для случая однородной относительно середины линии (в)

В [315] выполнен расчет и обоснована достоверность эквивалентной функции, принимаемой как оценка $W'_{2ЛЭП}$. На основе этой функции выполнен расчет $\hat{y}_2(t)$ по данным удаленного конца ЛЭП (рисунок 5.34). Сигнал $\hat{y}_2(t)$ в целом повторяет $y_2(t)$, в том числе вне интервала идентификации.

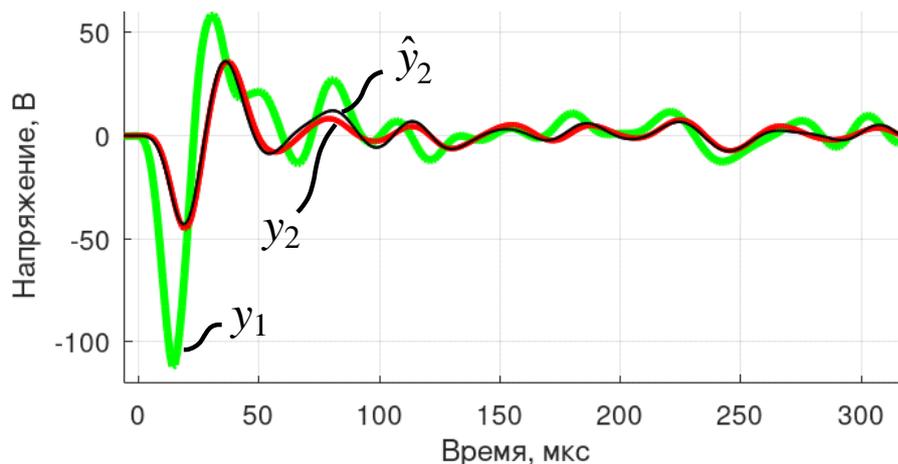


Рисунок 5.34 – Измерения при КЗ

На рисунке 5.35 показана невязка $e^2 = |\hat{y}_2 - y_2|^2$. Моменты времени, рассчитанные по известному расположению КЗ: $t_1 = 803$ мкс – возврат

переотраженной от КЗ волны в ИП1, $t_2 = 1606$ мкс – возврат дважды переотраженной от КЗ волны в ИП1, $t_3 = 2098$ мкс – возврат переотраженной от КЗ волны в ИП2.

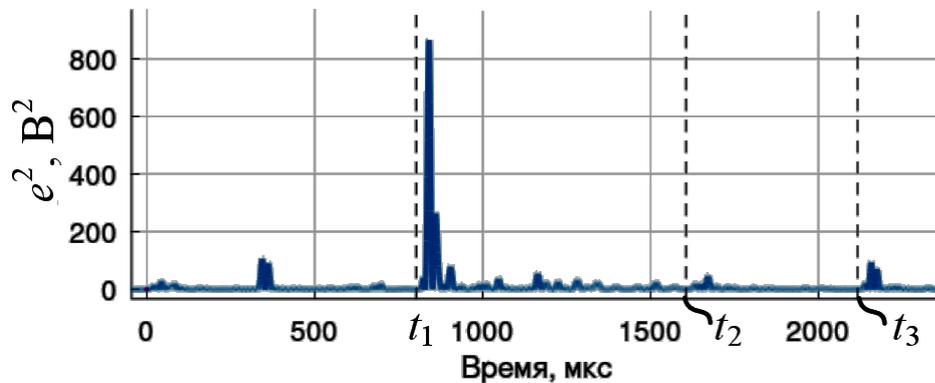


Рисунок 5.35 – Ошибка идентификации

Графики свидетельствуют о том, что в результате идентификации получена модель участка ЛЭП, структурно согласованная с неповрежденной ЛЭП и примыкающей к ней сетью. Последующие отражения от КЗ и более удаленных неоднородностей сети не были учтены в модели, что привело к возрастанию отклонения e^2 в соответствующие моменты времени. Следовательно, полученная модель может использоваться для повышения чувствительности измерительного органа волнового ОМП при выявлении последующих отражений, связанных с повреждением.

5.4 Синтез алгоритмов определения места повреждения на основе поэтапной обработки временной информации

Накопление информации о фронтах волн позволяет выполнять функции ОМП и РЗА с высоким быстродействием и высокой точностью [109,316]. Возможен односторонний расчет по переотраженным волнам [282] либо по волнам в разных волновых каналах, имеющих разные скорости распространения [317,302]. Сложность и вместе с тем низкая надёжность

методов связана с необходимостью отыскания второй волны среди множества прочих переотраженных волн (волнового ряда). Двухсторонний пассивный волновой метод оперирует только первыми волнами [109], достигшими концов ЛЭП, что повышает его надёжность в сравнении с односторонними методами. На практике для его реализации размещают два полукомплекта регистраторов волн по концам ЛЭП, связывают их информационным каналом и синхронизируют между собой с высокой точностью.

Требуется обобщение подходов к распознаванию места повреждения на основе совместной обработки информации о волнах в измерительных каналах, с адаптацией к доступному объёму информации.

Разработан метод, выстраивающий оптимальный расчёт места повреждения по волновому ряду с привлечением данных с одного или двух несинхронизированных полукомплектов волнового ОМП.

5.4.1 Синтез модели волновых процессов в электрической сети

В процессе распространения волна претерпевает множественные отражения и преломления на неоднородностях электрической сети [318]. В применении к изолированной однородной двухпроводной ЛЭП (рисунок 5.36) для некоторой точки повреждения можно получить следующие известные выражения для меток времени, когда фронт волны поступает в место регистрации на ПС А (рисунок 5.37):

$$\frac{1}{v} x_f = t_1 - t_0; \quad (5.20)$$

$$\frac{1}{v} (-x_f + 2L) = t_2 - t_0; \quad (5.21)$$

$$\frac{1}{v} 3x_f = t_3 - t_0; \quad (5.22)$$

$$\frac{1}{v} (-3x_f + 4L) = t_4 - t_0; \quad (5.23)$$

$$\frac{1}{v} 5x_f = t_5 - t_0, \quad (5.24)$$

где x_f – расстояние от наблюдателя до места повреждения;

L – длина линии;

v – скорость распространения волны по линии;

t_0 – время возникновения коммутации, которое априорно неизвестно наблюдателю.

наблюдателю.

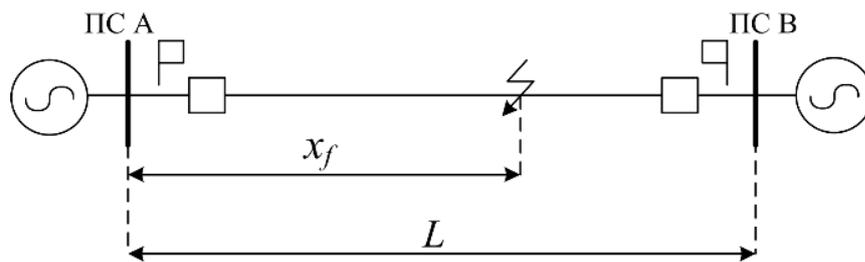


Рисунок 5.36 – Схема однородной линии электропередачи

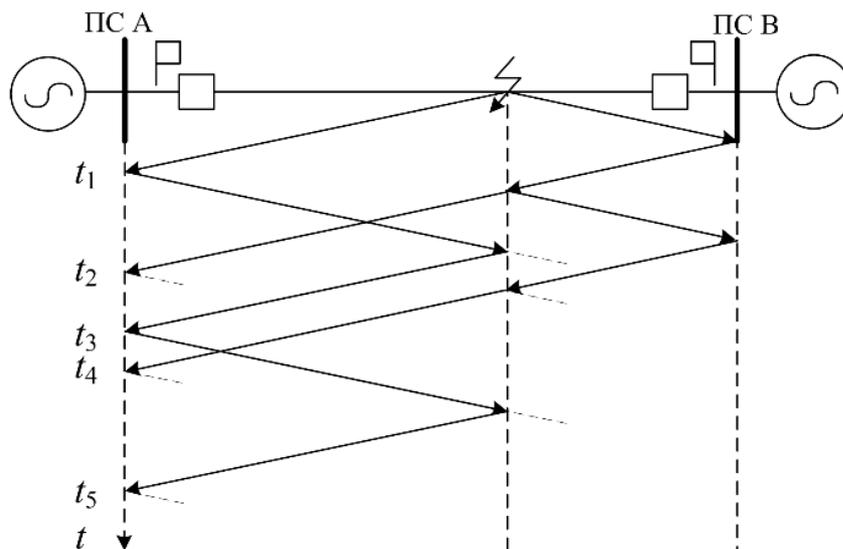


Рисунок 5.37 – Схема распространения волн в однородной ЛЭП

Устройство РЗА формирует упорядоченный вектор времени фронтов \mathbf{T}_{abc} , называемый волновым рядом, каждый элемент которого отвечает одному из времен (5.20)-(5.24) и последующим аналогичным уравнениям. Учитывая линейность уравнений относительно объектных параметров x_f , L , t_0 , запишем соответствующее матричное уравнение для вектора $\mathbf{T}_{abc} = [t_1, t_2, t_3, t_4, t_5]^T$:

$$\mathbf{T}_{abc} = \mathbf{B}[x_f \ L]^T + \mathbf{T}_0, \quad (5.25)$$

где \mathbf{B} – матрица темпа, учитывающая скорость распространения и путь волны;

\mathbf{T}_0 – вектор смещения времени.

Матрица \mathbf{B} составлена для определенного местоположения повреждения. При изменении x_f волновой ряд будет сформирован теми же уравнениями в другом порядке. Анализ уравнений обнаруживает несколько важных свойств.

Нетрудно видеть, что существуют условия, при которых отдельные волны достигают наблюдателя одновременно. Так, волны (5.21) и (5.22) имеют пересечение при $x_f = L/2$ вне зависимости от скорости распространения волны. Волны (5.21) и (5.24) накладываются при $x_f = L/3$. Наблюдатель не может отличить эти волны и воспринимает их как одну. Это явление исследовано в литературе [300], а в данной работе будет учтено в алгоритмах распознавания.

При одностороннем наблюдении немаловажен факт, что система уравнений (5.25) симметрична относительно середины линии, а соответствующие повреждения неразличимы:

$$\mathbf{B}[x_f \ L]^T = \mathbf{B}[L - x_f \ L]^T.$$

Для дальнейших расчетов удобно исключить из системы уравнений (5.25) ненаблюдаемые времена и перейти к относительному времени, когда за начало отсчета принимается момент регистрации первой волны: $t' = t - t_1$. Эта операция выполняется вычитанием первого уравнения из всех последующих с образованием матрицы шаблона \mathbf{A} и вектора относительных времен \mathbf{T} :

$$\mathbf{A}[x_f \ L]^T = \mathbf{T}. \quad (5.26)$$

В [291] показана актуальность учета неоднородности волновых параметров по длине ЛЭП, которая выражается в вариации скорости распространения фронта волны. Это явление приводит к существенному отклонению меток времени от ожидаемых и, как следствие, к погрешности ОМП. Поэтому модель ЛЭП на рисунке 5.36 разбивается на сегменты длиной L_i , $i = \overline{1, n}$ (элементы вектора \mathbf{L}), в рамках которых скорость распространения волны v_i принимается постоянной. Тогда при повреждении на участке i с локальной координатой x'_f , $x'_f \in [0; L_i]$ может быть получена система уравнений:

$$\mathbf{A}_x x'_f + \mathbf{A}_L \mathbf{L} = \mathbf{T}, \quad (5.27)$$

где \mathbf{A}_x и \mathbf{A}_L – матрицы темпа для соответствующих участков ЛЭП в рамках шаблона.

Если точек наблюдения ЛЭП несколько (n_H), то систему уравнений (5.25) можно дополнить новыми измерениями. В относительных временах учитывают смещение времени τ_{jk} между точками j и k , $i = \overline{1, n_H}$. Для двухстороннего наблюдения

$$\mathbf{A}_x x'_f + \mathbf{A}_L \mathbf{L} = \mathbf{T} + \mathbf{A}_\tau \tau \Leftrightarrow \mathbf{A}[x'_f \ \mathbf{L}^T \ \tau] = \mathbf{T}, \quad (5.28)$$

где \mathbf{A}_τ – вектор признаков смещения времени второй подстанции.

В случаях, когда смежные волны совпадают по времени в пределах измерительной погрешности, используется дополнительный шаблон без повторной строки.

Система уравнений (5.28) может рассматриваться как имитационная модель волнового ОМП. Эта модель может быть распространена на все наблюдаемые компоненты волнового процесса, включая отдельные волновые каналы трехпроводной ЛЭП [303].

5.4.2 Разработка метода волновых рядов для определения места повреждения линии электропередачи

Имитационная модель (5.28), структура которой изменяется в зависимости от значений аварийных параметров объектного вектора, может использоваться для оценки объектных параметров, например, координаты места повреждения x_f по известным измерениям времени. ОМП по оптимизационной процедуре обратного преобразования (1.30) – возможный, но вычислительно затратный процесс, альтернативу которому составляет разработанный автором метод волновых рядов [319].

Система (5.28) образует систему линейных алгебраических уравнений относительно x_f . В настоящей работе решение определяется методом наименьших квадратов [320], который хорошо отвечает однородности уравнений (одинаковые единицы измерения и масштаб каждой строки) и случайному характеру погрешности измерений волновых рядов \mathbf{T} . Чтобы матрица $(\mathbf{A}_x^T \mathbf{A}_x)$ была обратимой, достаточно исключить из нее (и из системы (5.28) в целом) строки, не связанные с местом повреждения. Получив достаточное число измерений фронтов, можно добиться переопределенного характера системы (число уравнений, как правило, выбирается больше числа неизвестных).

Каждому шаблону \mathbf{A} , задающему определенную последовательность волн, ставится в соответствие непрерывный сегмент ЛЭП. Для однородной ЛЭП число таких сегментов (секций), охватывающих всю протяжённость линии, определяется числом регистрируемых волн. В таблице 5.4 представлены расчёты числа интервалов линии при различной длине волнового ряда, полученные совместным анализом уравнений (5.20)-(5.24) и других строк системы (5.26). Видно, что с увеличением числа волн число секций и шаблонов (а значит, и сложность задачи ОМП) возрастает незначительно.

Таблица 5.4 – Зависимость числа секций от длины волнового ряда

Длина волнового ряда	Число секций
2	2
3	4
4	6
5	8
6	12

Оценим расстояние \hat{x}_f всеми возможными шаблонами по уравнениям (5.26) на основе данных о трех первых волнах, полученных в имитационной модели при перемещении истинного места КЗ x_f вдоль ЛЭП. Из графиков на рисунке 5.38 видно, что каждый шаблон (обозначен «ш.») позволил оценить расстояние \hat{x}_f без методической погрешности на собственном сегменте и показал значительное отклонение вне его. При этом невязка каждой системы уравнений, определенная по формуле

$$\varepsilon = \left\| \mathbf{A}[\hat{x}_f \quad L]^T - \mathbf{T} \right\|, \quad (5.29)$$

принимает нулевое значение только у истинного шаблона, что отражено на рисунке 5.39. В силу симметрии уравнений невязки шаблонов 3 и 4

совпадают с невязками 1 и 2 соответственно. Поэтому подходящий для ОМП шаблон предложено выбирать именно по минимальной невязке ε и при попадании расчета \hat{x}_f в сегмент действия шаблона.

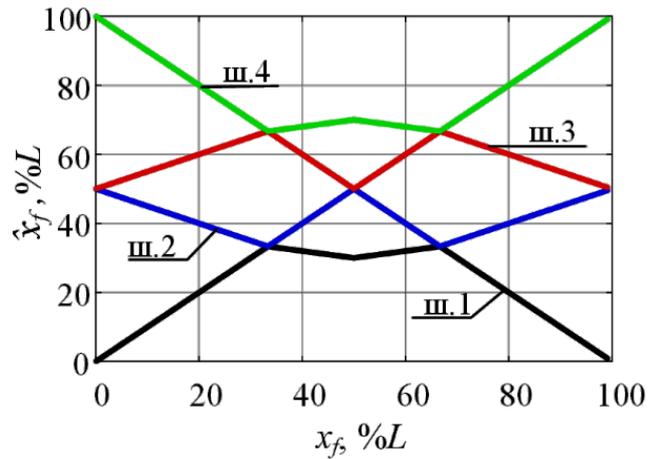


Рисунок 5.38 – Оценка расстояния до места повреждения шаблонами 1–4

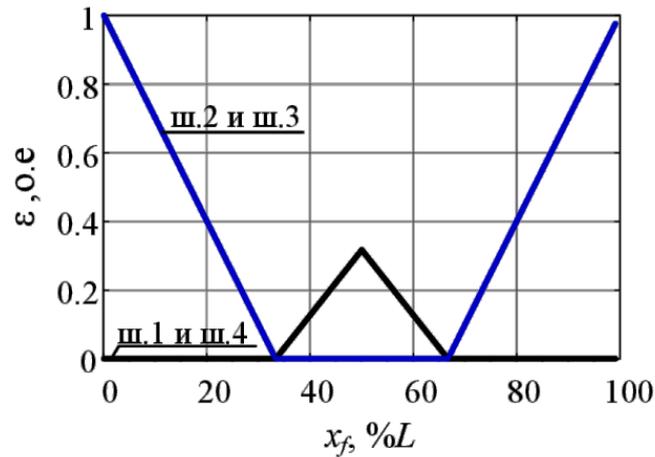


Рисунок 5.39 – Невязка шаблонов 1–4

Поскольку в точках сопряжения секций ЛЭП происходит совпадение меток времени разных уравнений, то такие шаблоны с однократным фронтом намеренно вводятся в систему уравнений с ограничением области их действия малой окрестностью точки сопряжения.

Система уравнений (5.28) позволяет оценить ряд дополнительных объектных параметров:

- длина отдельных секций ЛЭП – элементы вектора \mathbf{L} ;

- смещение времени τ ;
- скорость распространения волны по секциям ЛЭП, заключенная в элементах матрицы темпа \mathbf{A} .

Ограничения для их поиска накладываются следующими факторами: малое число фронтов (строк системы уравнений), недостоверность всех или части других объектных параметров.

Таким образом, метод волновых рядов дает возможность решения следующих практических задач:

- одностороннее ОМП – оценка x'_f ;
- многостороннее ОМП на основе несинхронизированных односторонних волновых рядов – оценка x'_f и, возможно, τ ;
- многостороннее ОМП при абсолютной синхронизации времени подстанций – оценка x'_f ;
- оценка объектных параметров и качества синхронизации по известным параметрам повреждения (x'_f) – оценка элементов матрицы \mathbf{A} , вектора \mathbf{L} и τ .

5.4.3 Исследование чувствительности метода волновых рядов к погрешности срабатывания измерительных органов

Исследуем предложенный алгоритм ОМП на устойчивость к ошибкам в измерениях временного ряда. На практике погрешность метки времени может быть связана с действием помех, малой величиной волны, ошибками синхронизации времени. Модель ошибки – однополярное положительное отклонение каждой метки времени в диапазоне от 0 до 5 мкс. Погрешность оценки расстояния приобретает значительные величины при одностороннем (рисунок 5.40а) и двухстороннем (рисунок 5.40б) замерах, которые

существенно сокращаются при увеличении длины волнового ряда. При двухстороннем наблюдении использовалось равное число волн с каждой стороны ЛЭП. Как можно видеть, представленные максимальные погрешности непостоянны по длине линии, но постоянны в рамках каждой секции. Это подтверждается аналитическим расчётом. Так, погрешности оценки расстояния по трём волнам (№3) на секциях ЛЭП определяются соотношениями, которые зависят только от погрешностей Δt_1 , Δt_2 и Δt_3 времени регистрации волн 1, 2 и 3 соответственно:

$$\Delta x_f = \frac{1}{4} v(\Delta t_2 - \Delta t_3) \text{ при } \frac{1}{3} L < x_f < \frac{2}{3} L;$$

$$\Delta x_f = \frac{1}{10} v(\Delta t_2 + 2\Delta t_3 - 3\Delta t_1) \text{ при } x_f < \frac{1}{3} L \text{ и } x_f > \frac{2}{3} L.$$

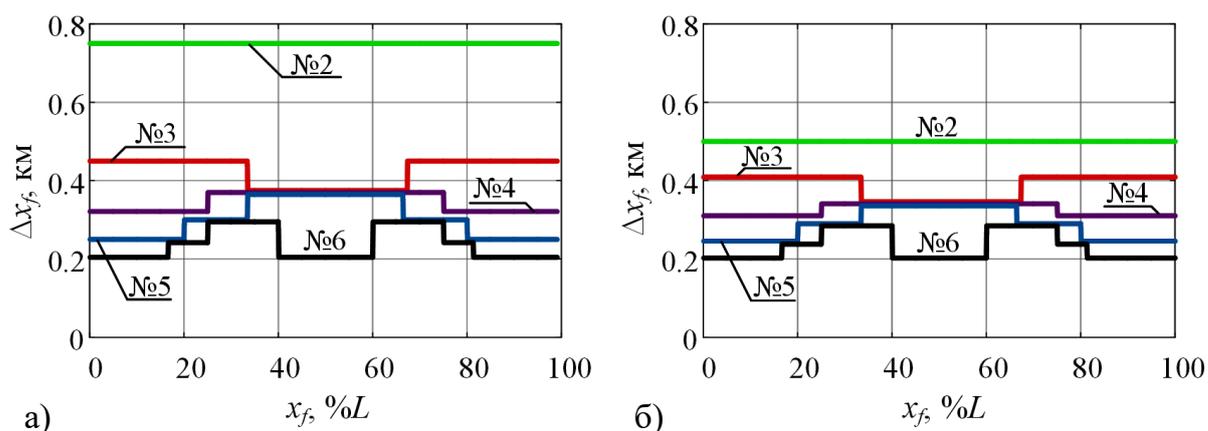


Рисунок 5.40 – Погрешность ОМП при числе волн от двух (№2) до шести (№6) при одностороннем наблюдении (а) и при двухстороннем наблюдении (б)

При числе волн 3 и более система уравнений (5.26) переопределена, что способствует усреднению погрешностей измерения. Исследование чувствительности к измерительной погрешности выявило недостаток выбранного критерия выбора шаблона: вблизи точек сопряжения интервалов разных шаблонов невязки (5.29) вступают в конкуренцию, а потому возможен неправильный выбор шаблона.

Для выбора оптимального числа волн воспользуемся гистограммой на рисунке 5.41, показывающей максимальную возможную погрешность ОМП. Видно, что оптимальное число волн – 4. Дальнейшее увеличение числа фиксируемых волн не приводит к существенному снижению погрешности.

Можно было бы ожидать, что односторонний и двухсторонний методы будут демонстрировать одинаковую погрешность при одинаковом суммарном числе волн, например, при одностороннем расчёте по четырём волнам и при двухстороннем расчёте по двум волнам с каждой стороны. Однако при двухстороннем расчёте используется одно уравнение для определения синхронизирующей константы τ и охватывается меньший диапазон сигнала во времени, а потому сравнение неравнозначное.

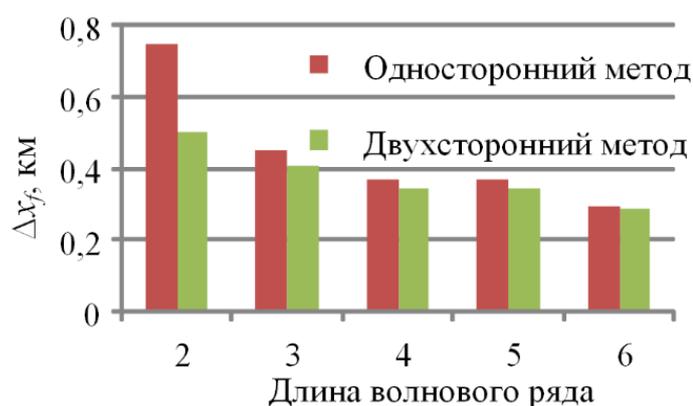


Рисунок 5.41 – Зависимость погрешности ОМП от числа волн

Таким образом, предложенный метод демонстрирует устойчивость к значительной погрешности входных данных и способен выбирать оптимальное решение, что отличает его от других технических решений.

5.4.4 Реализация односторонней оценки места повреждения методом волновых рядов и проверка на данных реального короткого замыкания

Разработан алгоритм поэтапного анализа переходного процесса с наращиванием информационной базы новыми измерениями. Так, метод

волновых рядов позволяет использовать найденные ранее волны для прогноза времени возникновения следующих волн, выявления их в электрических сигналах и последовательного увеличения числа строк **A** и **T** в расчете. Алгоритм проверки гипотез принимает в качестве t_1 момент прихода первой волны, t_2 – любую из следующих волн, t_3 и далее – любую из последующих волн, удовлетворяющую прогнозу успешного шаблона на основе уже выбранных строк. Поиск t_2 и следующих меток времени выполняется с учетом заданного порога невязки ε . Существуют похожие технические решения [301,321] на основе замеров других видов ОМП, однако они отличаются информационной базой алгоритма.

Продемонстрируем работу алгоритма на примере анализа высокочастотных осциллограмм, записанных при двух реальных КЗ на КВЛ 220 кВ Томмот–Мая длиной 434,7 км. Рассматривается реальная сеть, а потому в сигнале обнаруживается множество излишних отражений от структурных элементов сети, не учтенных в модели однородной ЛЭП (5.26). На рисунках 5.42а и 5.42б приведены результаты ОМП при одностороннем наблюдении КЗ №1 со стороны ПС 220 кВ Томмот и ПС 220 кВ Мая соответственно, на рисунках 5.42в и 5.42г – оценки для КЗ №2. Вертикальные линии обозначают метки времени, выявленные с использованием измерительных органов волнового ОМП. Далее параллельно обрабатывались все возможные шаблоны. Точка на графике указывает на согласованность **T** и **A** в пределах заданного порога ε на текущем этапе расчета, а также оценку \hat{x}_f . Линия между точками указывает на непрерывность успешного применения волнового ряда без пропуска строк шаблона. Для большинства шаблонов выявлены отдельные частные решения, не нашедшие развития более чем в двух строках шаблона подряд.

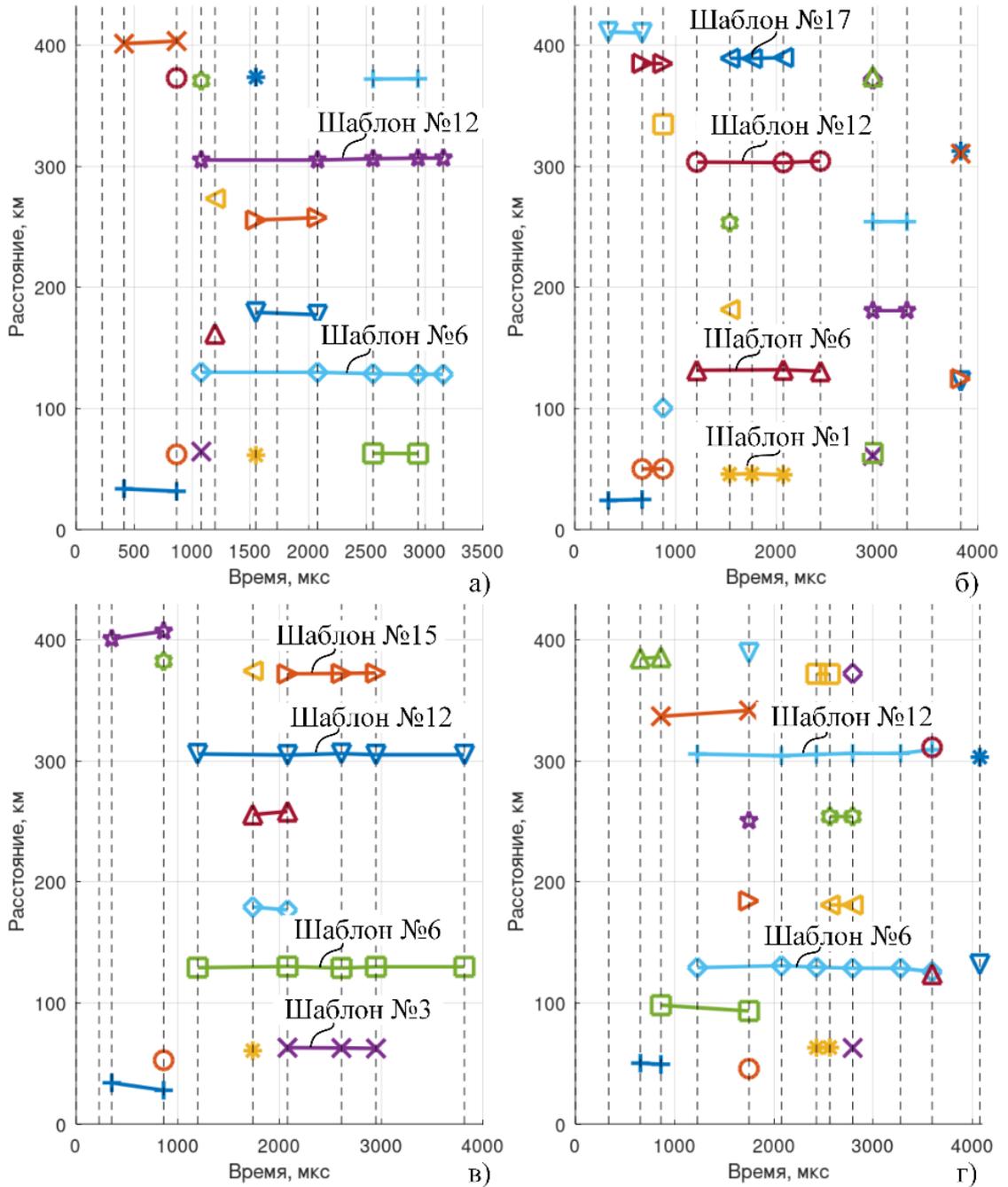


Рисунок 5.42 – К Одностороннему волновому ОМП реального повреждения

Для шаблонов №6 и №12 определены наборы волн, последовательно признанные успешными наибольшее число раз подряд. Эти шаблоны распространяются на секции $108,7 \text{ км} < x_f < 144,9 \text{ км}$ и $289,8 \text{ км} < x_f < 326,2 \text{ км}$ и соответствуют истинному месту повреждения.

Наличие двух возможных мест КЗ ожидаемо в силу зеркальности решений

относительно середины линии. На рисунке 5.42б наблюдаются также альтернативные решения по шаблонам №1 и №17, связанные, предположительно, с неоднородностями в электрической сети.

КЗ №1 расположено на расстоянии 127,1 км, КЗ №2 – на расстоянии 126,9 км от ПС Томмот. Метод волновых рядов позволил оценить расстояние до места повреждения с погрешностью 1 км, 3,5 км, 2,9 км, 1,3 км, или 0,2%, 0,8%, 0,7%, 0,3% относительно длины ЛЭП. Полученная погрешность существенно меньше средних значений для ОМП по параметрам аварийного режима на этой ЛЭП [146], но несколько больше погрешности двустороннего волнового ОМП [309].

5.5 Анализ результатов проектирования и эксплуатации устройств волнового определения места повреждения

5.5.1 Реализация алгоритмов волнового определения места повреждения в автоматических системах на основе автономных устройств

Результаты исследований и алгоритмы автора внедрены в устройствах TOP 300 ЛОК 550, разработанных под его руководством и производимых серийно в ООО «Релематика» с 2018 года. Терминал TOP 300 ЛОК 550 предназначен для ОМП воздушных и кабельно-воздушных линий напряжением 6-750 кВ протяженностью до 150 км. Основные функции терминала:

- волновое ОМП по двухстороннему замеру;
- ОМП по параметрам аварийного режима;
- диагностика измерительных цепей терминала.

Схема подключения терминала TOP 300 ЛОК 550 к измерительным преобразователям показана на рисунке 5.43.

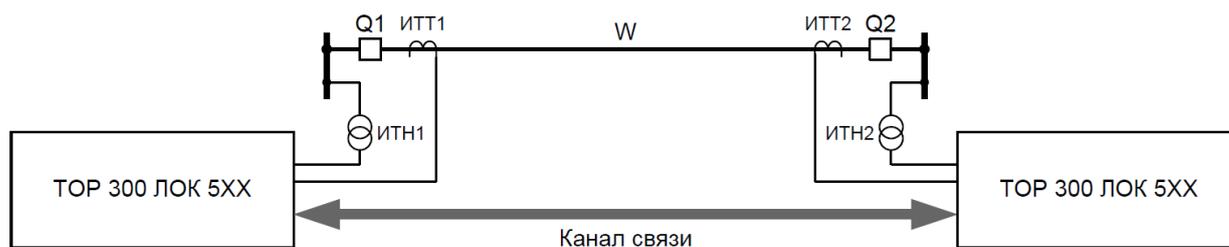


Рисунок 5.43 – Схема применения терминала ТОР 300 ЛОК 550

В рамках научно-исследовательской и опытно-конструкторской работы по заказу ПАО «ФСК ЕЭС» на тему «Создание системы волнового ОМП, подключенного к системе шин, с использованием цифрового обмена данными с устройствами защиты по протоколу МЭК 61850» был разработан терминал ТОР 300 ВОМП. Участниками проекта выступили АО «НТЦ ФСК ЕЭС», АО «ЭНИН» и ООО «Релематика». Особенностью разработанной системы волнового ОМП является использование контроля напряжения на шинах нескольких подстанций, к которым подключены контролируемые ВЛ, без использования контроля токов [309]. Техническое решение защищено патентом [295]. Измерительные органы по схеме автора прошли испытания и внедрены в терминалах ТОР 300 ВОМП, принятых к производству в 2023 году.

В ООО «Релематика» подготовлен к опытному производству терминал ТОР 300 ВОЛНА, разработанный под руководством автора, который будет реализовывать расширенные алгоритмы поиска фронта волны, а также метод волновых рядов. Внедрение подтверждено актами (Приложение Б).

5.5.2 Анализ результатов полигонных испытаний устройств ТОР 300 ВОМП

Для более полной проверки эффективности функционирования алгоритма системы волнового ОМП на базе терминалов ТОР 300 ВОМП

были проведены ее полигонные испытания [294] на основе специализированного стенда. Данные, полученные на математической модели сети, преобразовывались в аналоговую форму и подавались на входные цепи устройств ОМП. Расчет напряжений по концам ВЛ производился в модели при разных видах КЗ, фазовых углах и сопротивлениях в месте КЗ. По-разному формировались дискретные сигналы, предназначенных для пуска системы волнового ОМП при имитации срабатывания релейной защиты ЛЭП. Фиксировались результаты автономной функции определения расстояния до места КЗ на дисплеях терминалов волнового ОМП.

Программа испытаний включала проверку возможности пуска этих терминалов как непосредственно дискретным сигналом, так и посредством GOOSE-сообщений [170].

Программа полигонных испытаний предусматривала проверку функционирования системы волнового ОМП при КЗ на ВЛ 330 кВ Выборгская–Каменногорская (длина 54 км), ВЛ 330 кВ Выборгская–Восточная 1 цепь (длина 147 км) и ВЛ 330 кВ Выборгская–Восточная 2 цепь (длина 144 км) с использованием расчетной модели сети. Схема стенда приведена на рисунке 5.44. Подробное описание результатов испытаний приведено в [294].

На рисунке 5.45 представлены гистограммы распределения абсолютных значений погрешности с указанием количества опытов, в котором погрешности попадали в тот или иной временной интервал. Из гистограмм следует, что в большинстве опытов абсолютное значение погрешности не превысило 0,1 км.

Результаты полигонных испытаний показали, что погрешности определения расстояния до места повреждения практически не зависят от вида КЗ и изменения величины переходного сопротивления в месте замыкания фазы на землю от 0 до 50 Ом.

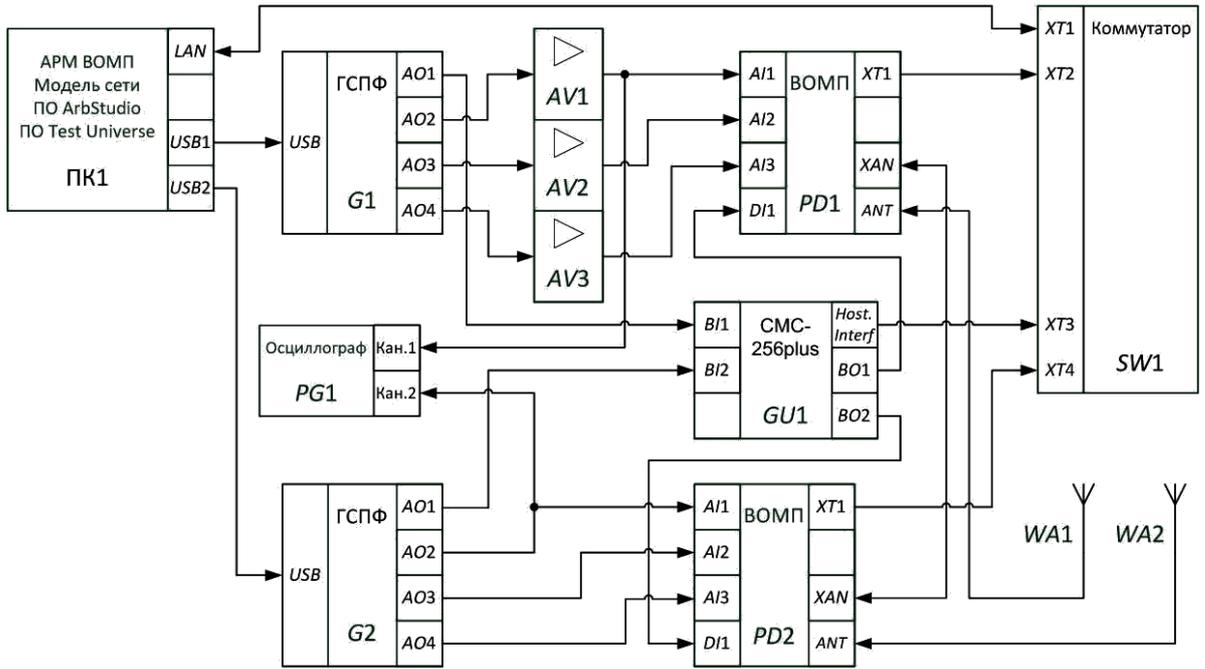


Рисунок 5.44 – Структурная схема стенда для испытаний системы ВОМП

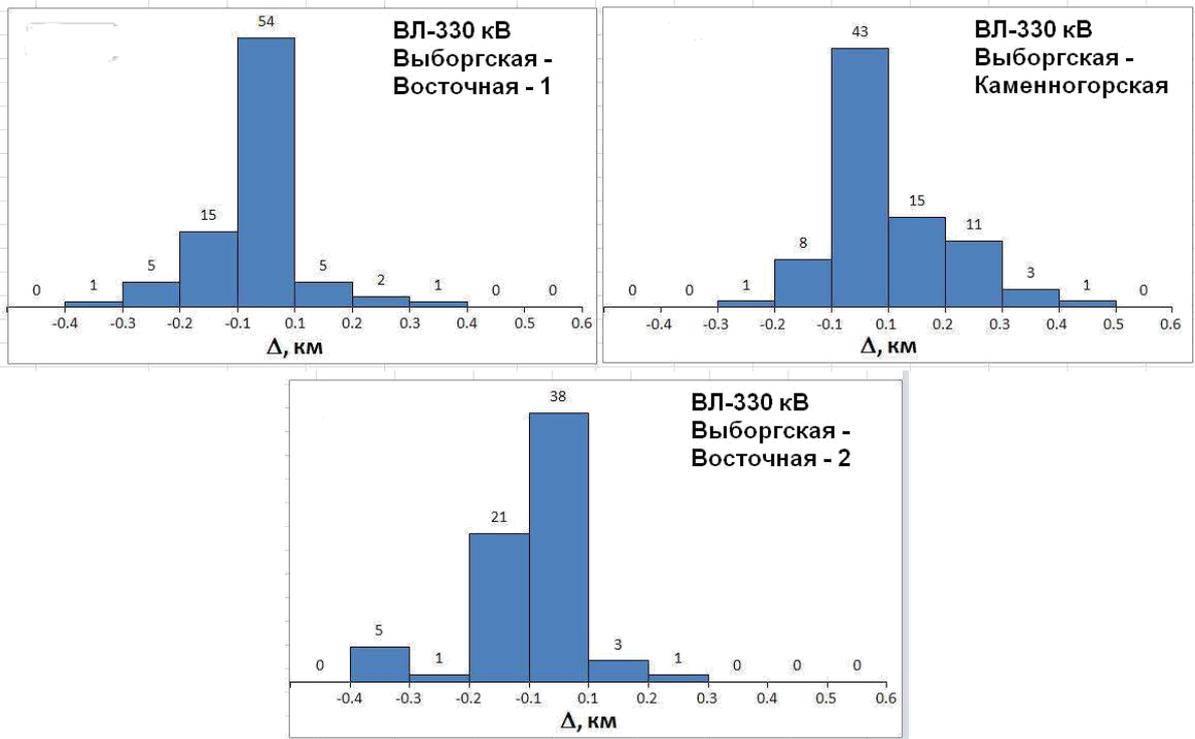


Рисунок 5.45 – Гистограммы распределения абсолютных значений погрешности ВЛ 330 кВ Выборгская–Восточная 1 цепь, ВЛ 330 кВ Выборгская–Восточная 2 цепь и ВЛ 330 кВ Выборгская–Каменногорская

5.5.3 Функционирование системы волнового определения места повреждения при искусственных и естественных повреждениях линии электропередачи

В соответствии с Распоряжением филиала ПАО «Россети ФСК ЕЭС» – МЭС Востока «О подготовке к проведению опыта КЗ на КВЛ 220 кВ Томмот–Майя» в 2021 году на КВЛ 220 кВ Томмот–Майя 1 филиала ПАО «Россети ФСК ЕЭС» – МЭС Востока (Амурское ПМЭС) с применением опытов КЗ проведены натурные испытания терминалов TOP 300 ВОМП системы волнового ОМП для проверки их точности функционирования.

Терминалы устройств определяли место повреждения на КВЛ 220 кВ Томмот–Майя 1 волновым методом на основе двухсторонних измерений напряжения на шинах подстанций, к которым подключена данная КВЛ (рисунок 5.46). Терминалы установлены в шкафы основных защит ЛЭП на релейных щитах ПС 220 кВ Томмот и ПС 220 кВ Майя (рисунок 5.47) и подключались по цепям измерения ко вторичным фазным обмоткам электромагнитных трансформаторов напряжения, первичные обмотки которых подключены к сборным шинам 220 кВ этих ПС. Настроена двухсторонняя передача меток измерений ОМП к системе связи по ЛЭП – технологической сети с использованием волоконно-оптической линии связи (ВОЛС). Цепи пуска от РЗА были соединены с исполнительными органами («сухой» контакт и канал передачи GOOSE-сообщений) дифференциальной защиты ЛЭП.

Полученные результаты ОМП терминалов TOP 300 ВОМП устройств системы волнового ОМП сравнивались с показаниями устройств ИМФ-ЗР, находящихся в промышленной эксплуатации на этой КВЛ и осуществляющих ОМП методом односторонних измерений по параметрам аварийного режима.

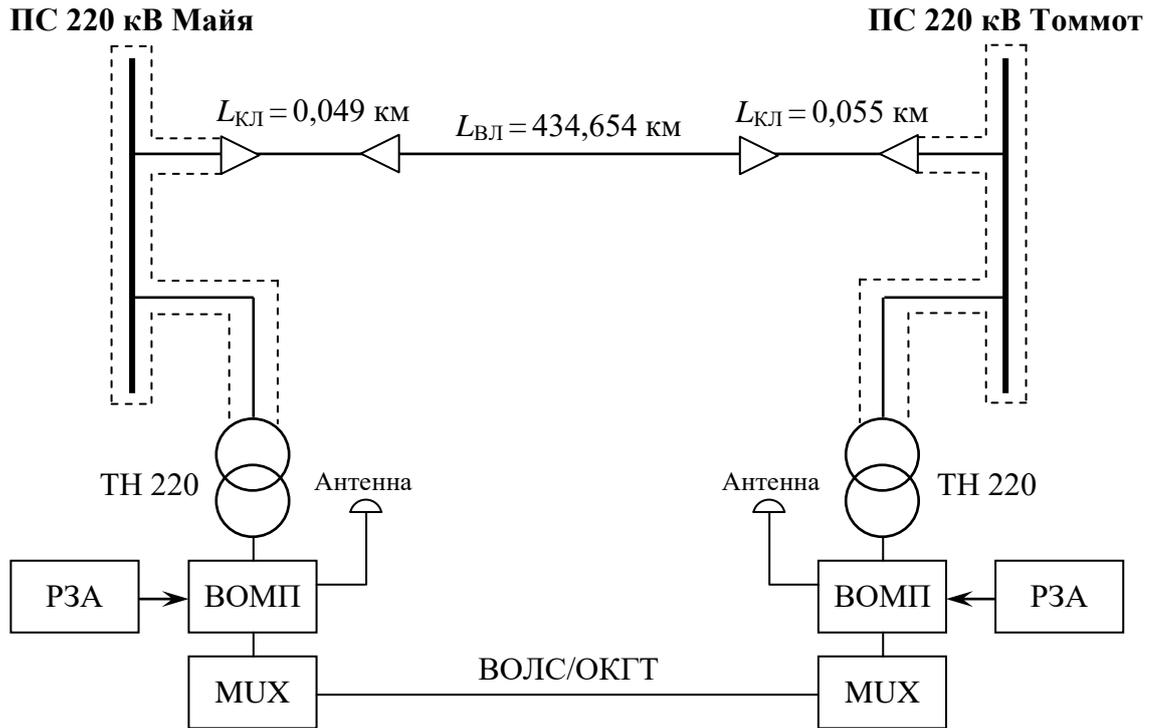


Рисунок 5.46 – Структурная схема подключения ВОМП на КВЛ 220 кВ Томмот–Майя 1 цепь

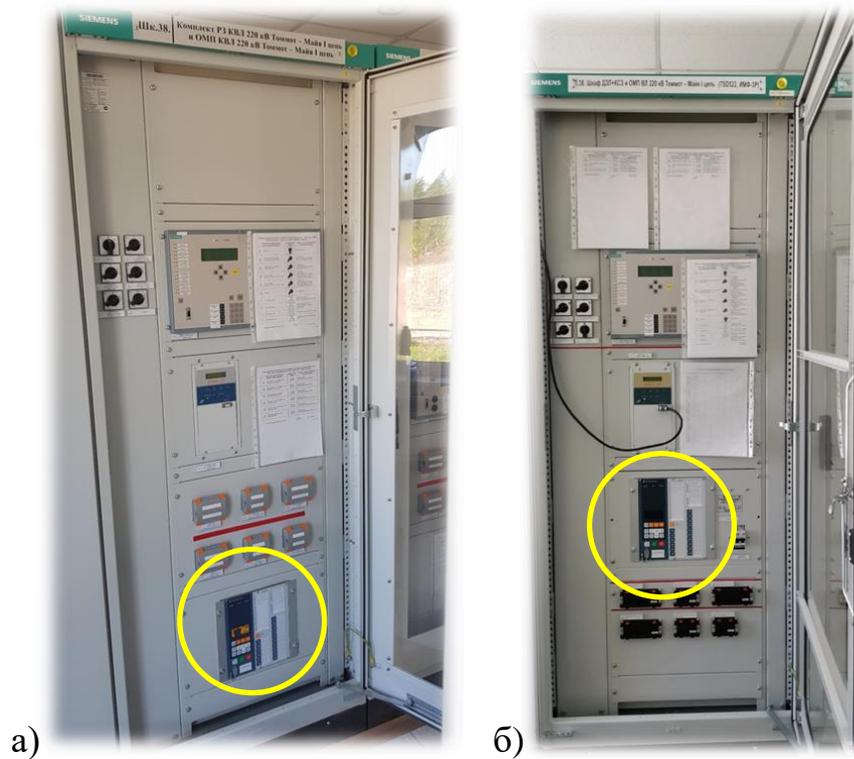


Рисунок 5.47 – Шкафы с терминалами ТОР 300 ВОМП на ПС 220 кВ Томмот (а) и ПС 220 кВ Майя (б)

Выполнены два опыта однофазных КЗ на землю: через металлическую опору №375 (рисунок 5.48) и в середине пролета между опорами №374 и №375 (рисунок 5.49) КВЛ 220 кВ Томмот–Мая 1 через установленное под первой цепью КВЛ специально срубленное дерево сосны при сохранении транзита по КВЛ 220 кВ Томмот–Мая 2.



Рисунок 5.48 – Опыт № 1, однофазное КЗ через металлическую опору

При однофазном КЗ на землю через металлическую опору №375 погрешность системы волнового ОМП со стороны ПС 220 кВ Томмот составила 0,570 км и со стороны ПС 220 кВ Мая – 0,626 км, а погрешность устройств ИМФ-ЗР – 4,98 км и 19,526 км соответственно. Большая погрешность ОМП по параметрам аварийного режима со стороны ПС 220 кВ Мая является следствием малой подпитки места КЗ от этой подстанции по сравнению с ПС 220 кВ Томмот, подтвержденной по аварийным осциллограммам.

В опыте КЗ в середине пролета между опорами №374 и №375

погрешность системы волнового ОМП не превысила 0,314 км, а погрешность устройств ИМФ-3Р составила – 3,272 км и 20,16 км. Результаты опытов сведены в таблицу 5.5.



Рисунок 5.49 – Опыт № 2, однофазное КЗ в середине пролета

Следует отметить, что погрешность системы волнового ОМП оказалась в пределах длины одного-двух пролетов КВЛ 220 кВ Томмот–Майя. Более высокая погрешность в опыте КЗ на опору может быть связана с несоответствием паспортных данных фактическим расстояниям до точек

проведения опытов на КВЛ, поскольку сумма расстояний по концам КВЛ, зафиксированных терминалами ТОР 300 ВОМП в обоих опытах, равна одной и той же величине, равной 434,7 км, практически не отличающейся в условиях эксплуатации от 434,654 км – паспортной длины КВЛ 220 кВ Томмот–Майя.

Таблица 5.5 – Результаты ОМП при опытных КЗ

Опыт	Опыт № 1		Опыт № 2	
	ПС Томмот	ПС Майя	ПС Томмот	ПС Майя
Подстанция				
Фактическое расстояние до КЗ, км	127,08	307,574	126,928	307,726
Показания ИМФ-ЗР, км	122,1	327,1	130,2	328,2
Показания ТОР 300 ВОМП, км	126,51	308,2	126,66	308,04
Погрешность ТОР 300 ВОМП, м	570	626	268	314
Погрешность ТОР 300 ВОМП, %	0,13	0,14	0,06	0,07

Устройства системы волнового ОМП в последующие годы срабатывали в автоматическом режиме при КЗ на наблюдаемой ЛЭП. Обследование ЛЭП после событий показало, что КЗ возникали на фоне грозových перекрытий изоляции [322], результаты ОМП показаны в таблице 5.6: x_f – фактически найденное место повреждения; \hat{x}_f и $x_{fП}$ – расчетное расстояние места повреждения волнового ОМП и ОМП по ПАР; $\Delta\hat{x}_f$ и $\Delta x_{fП}$ – относительные погрешности расчетных расстояний \hat{x}_f и $x_{fП}$. Видно, что подключение системы волнового ОМП к шинным трансформаторам напряжения позволило в равной мере выполнять ОМП обеих цепей ЛЭП между ПС 220 кВ Томмот и ПС 220 кВ Майя. Разработанные технические решения демонстрируют более высокую точность ОМП, что приводит к снижению затрат на проведение послеаварийных обходов ЛЭП [322].

Таблица 5.6 – Результаты работы устройств ОМП при грозовых перекрытиях

№	Наименование линии, дата и время отключения	x_f , км	\hat{x}_f , км	$x_{fП}$, км	$\Delta\hat{x}_f$, %	$\Delta x_{fП}$, %
1	Томмот - Майя II цепь, 22.05.2022; 12-50	61,8	61,0	57,9	1,29	6,31
2	Томмот - Майя II цепь, 03.07.2022; 13-41	314,1	314,5	335,9	0,13	6,95
3	Томмот - Майя I цепь, 03.07.2022; 16-41	208,2	210,9	212,1	1,28	1,87
4	Томмот - Майя I цепь, 03.08.2022; 07-36	181,3	181,5	182,4	0,11	0,61
5	Томмот - Майя II цепь, 03.08.2022; 09-56	181,3	181,5	182,5	0,11	0,66

5.6 Выводы

1. Переходный процесс, связанный с фронтом волны, имеет высокую неопределенность частотного спектра как в отслеживаемых режимах, так и в альтернативных им нормальных (доаварийных) режимах. Настройка волнового измерительного органа на основе частотных компонент сигнала затруднительна. Показано, что анализ измерений при выполнении пассивного волнового ОМП целесообразно выполнять с использованием статистических методов. На основе экспериментальных исследований предложена оценка интервала определения сигнала относительно среднеквадратического отклонения.

2. Предложен метод аналитического исследования срабатывания измерительных органов при выявлении фронта волны. Показано, что преобразование на базе коэффициента эксцесса проявляет адаптивность к фоновому шуму в сигнале и его распределению. Обоснован выбор

параметров расчета, обеспечивающий отношение сигнал-шум от 11 до 17 дБ, что вполне удовлетворяет требованиям РЗА. Уточнение метки времени начала процесса с использованием модели сигнала может достигать 13 мкс. Анализ показал, что вне зависимости от вида распределения выборок предшествующего режима поведение измерительного органа универсально описывается величиной отклонения при срабатывании.

3. Предложены дополнительные методы обработки входной информации волнового ОМП в следующих направлениях:

- компенсация искажений измерительных преобразователей с целью повышения чувствительности измерительных органов волнового ОМП (снижение погрешности на 87% в рассмотренных примерах);
- повышение селективности измерительных органов за счет адаптации к структуре электрической сети;
- обработка волновых рядов на основе имитационной модели ЛЭП (шаблонов).

4. Расчеты на осциллограммах реальных КЗ показали повышение устойчивости к помехам и уточнение оценки расстояния в одностороннем и двухстороннем вариантах применения методов ОМП.

5. Технические решения автора реализованы в микропроцессорных терминалах волнового ОМП. Опыт их эксплуатации продемонстрировал значительное повышение точности оценки координаты места повреждения в сравнении с другими средствами ОМП. Ожидается значительное снижение затрат на техническое обслуживание ЛЭП.

Глава 6 Совершенствование системотехнических решений активного волнового определения места повреждения линий электропередачи

6.1 Исследование метода активного волнового определения места повреждения трехпроводной линии электропередачи

6.1.1 Анализ принципов активной локации линий электропередачи

Под активной локацией, также называемой рефлектометрией, будем понимать процесс, состоящий из излучения в линию электропередачи импульса заданной формы и последующего наблюдения отражений от объекта в частотно-временной или пространственно-временной форме [112,113,323,324]. Полученный сигнал обрабатывается согласованным фильтром для создания рефлектограммы [325-327], также называемой портретом линии. Рефлектограмма связывает расстояние до места отражения сигнала и интенсивность этого отражения, а потому может использоваться для определения степени неоднородности параметров ЛЭП по длине и идентификации структуры электрической сети [328]. Существенное изменение оцениваемых параметров во времени свидетельствует об изменениях в ЛЭП, требующих внимания эксплуатации. Имеются устройства с непрерывным и импульсным зондированием. В [114] обосновано применение импульсных сигналов и их длительность от 2 до 12 мкс. В [324] показаны преимущества частотно-модулированных сигналов, главным из которых можно считать повышенную разрешающую способность. Локация с использованием сигналов этого вида будет рассмотрена в данной работе.

Существует практика подключения устройства зондирования (УЗ) к линии электропередачи совместно с аппаратурой связи через

высокочастотное присоединение в соответствии с рисунком 6.1, где ВЗ – высокочастотный заградитель, КС – конденсатор связи, ФП – фильтр присоединения. Излучение и измерение сигнала отражения производится в одной точке подключения.

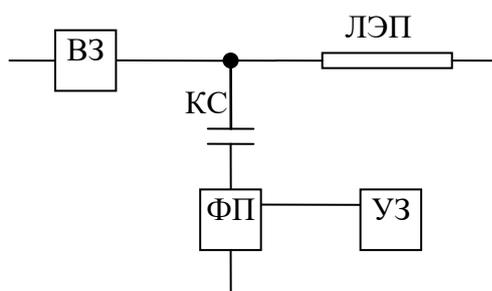


Рисунок 6.1 – Схема подключения активного локационного устройства

Сигнал с линейной частотной модуляцией от начальной f_H до конечной f_K частоты в диапазоне до 3 МГц и колоколообразной огибающей $U(t)$ описывается уравнением:

$$u(t) = U(t) \cos(2\pi f_H t + \beta t^2 / 2),$$

где $\beta = \Delta f / \tau_{И}$:

$\Delta f = f_K - f_H$ – девиация частоты;

$\tau_{И}$ – длительность импульса.

Задается структура сигнала, которая позволяет отнести его к классу сигналов с большой базой $B = \tau_{И} \Delta f$. База рассматриваемого сигнала [324] $B > 30$. Огибающая сигнала задает его спектральные свойства. Основная энергия сигнала, как видно из рисунка 6.2, приходится на частоты от 0,7 до 2,1 МГц.

Согласованная фильтрация [325] приводит к уменьшению длительности импульса после обработки. Таким образом, путем частотной обработки сигнала в приемнике получают диаграмму амплитуд во времени,

которую называют рефлектограммой.

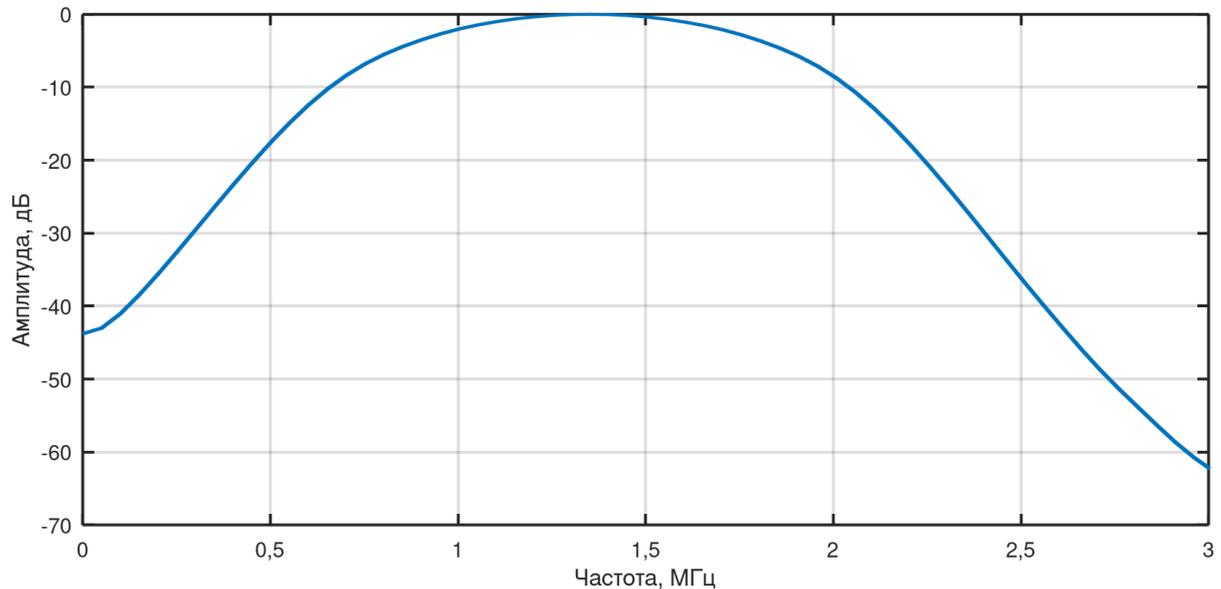


Рисунок 6.2 – Нормированная амплитудно-частотная характеристика зондирующего импульса

Автокорреляционная функция излучаемого сигнала иллюстрирует эффект сжатия: ширина главного лепестка огибающей обратно пропорциональна девиации частоты и приблизительно равна $5/\Delta f$. Это приводит к тому, что ширина импульса после фильтрации на уровне -3 дБ составляет не более $0,8$ мкс, а на уровне -30 дБ – не более $2,3$ мкс, то есть не более 15% от длительности зондирующего импульса. На рисунке 6.3 показан результат свертки излучаемого сигнала с приведением максимума к нулевому моменту времени.

Кроме задач ОМП, активные локационные методы могут быть использованы, например, для оценки гололедообразования на проводах воздушных линий [329,330].

В двухпроводной линии зондирование выполняется по единственному контуру, образованному прямым и обратным проводами. В трехпроводной ЛЭП контуров распространения волны несколько: каждый из проводов линии по отношению к земле и по отношению друг к другу. Для достижения

максимального сигнала в каждом из этих контуров требуется свое подключение зондирующего оборудования, например, к разным фазам ЛЭП. Такое переключение может выполняться непосредственно в устройствах зондирования. Тем не менее, с целью экономии кабелей и оборудования высокочастотного оборудования целесообразно исследовать возможности зондирования в одной схеме подключения, по одному контуру ЛЭП.

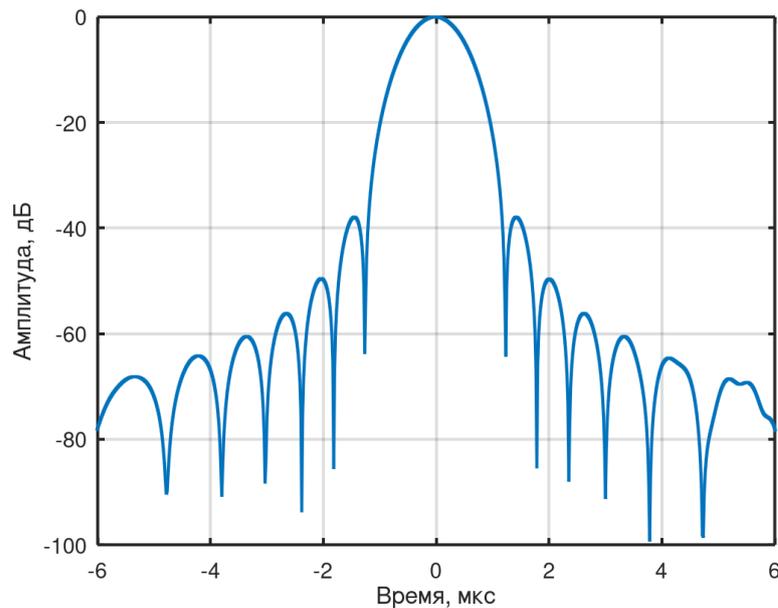


Рисунок 6.3 – Результат автокорреляционной обработки зондирующего импульса

6.1.2 Анализ особенностей зондирования линии электропередачи по одной фазе

В качестве инструмента расчета волновых процессов в симметричных многопроводных ЛЭП принято использовать метод модальных каналов [303]. Для симметричной трехпроводной ЛЭП требуется рассмотреть только три независимых модальных составляющих. Удобный переход между фазными составляющими и модальными каналам был предложен Э.Кларк [331]:

$$\mathbf{i}_{(s)} = \mathbf{T}_I^{-1} \mathbf{i}. \quad (6.1)$$

где $\mathbf{T}_I^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 2 & -1 & -1 \\ 0 & \sqrt{3} & -\sqrt{3} \end{bmatrix}$ – матрица фазно-модального преобразования

токов;

$\mathbf{i} = [i_A, i_B, i_C]^T$ – вектор мгновенных значений фазных токов в заданный момент времени,

$\mathbf{i}_{(s)} = [i_0, i_1, i_2]^T$ – вектор токов в модальных каналах (0, 1 и 2).

Преобразование Кларк является предельным случаем идеально симметричной ЛЭП, когда все провода находятся в одинаковых условиях.

Аналогичные преобразования для фазных напряжений \mathbf{u} в модальные составляющие $\mathbf{u}_{(s)}$ [303]:

$$\mathbf{u}_{(s)} = \mathbf{T}_U^{-1} \mathbf{u}; \quad (6.2)$$

$$\mathbf{T}_U = (\mathbf{T}_I^{-1})^T.$$

В рассматриваемой схеме устройство активного волнового ОМП прикладывает к ЛЭП импульс напряжением E и током I (эти величины связаны волновыми сопротивлениями линии) по фазе А (рисунок 6.4).

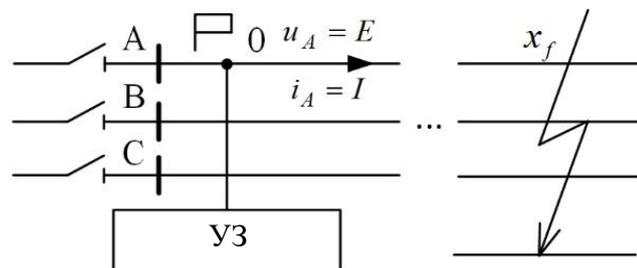


Рисунок 6.4 – Однофазная подача зондирующего сигнала

Длительность импульса меньше времени пробега волны до места повреждения. Далее устройство переходит в режим измерения с согласованным внутренним сопротивлением и обрабатывает сигнал,

отраженный от места повреждения с координатой x_f .

С учетом граничных условий $i_B = i_C = 0$ и $u_B = u_C = 0$ в месте приложения зондирующего сигнала происходит его распределение по волновым каналам:

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_1 \\ i_2 \end{bmatrix} = \mathbf{T}_I^{-1} \mathbf{i} = \begin{bmatrix} \frac{1}{3} I \\ \frac{2}{3} I \\ 0 \end{bmatrix}; \quad \begin{bmatrix} u_0 \\ u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \mathbf{T}_U^{-1} \mathbf{u} = \begin{bmatrix} E \\ E \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (6.3)$$

Таким образом, зондирующий сигнал распространяется по модальным каналам 0 и 1, что соответствует [332]. Скорость распространения волн в каналах различна, быстрее всего будет обнаружен сигнал в первом модальном канале, а потому разрешающую способность при зондировании можно связать с каналом 1. Суммарный сигнал, регистрируемый в каждый заданный момент времени и соотносимый с определенной точкой на ЛЭП, представляет собой наложение всех составляющих.

Каждый тип КЗ характеризуется своими граничными условиями (на рисунке 6.5 показан пример вспомогательной схемы), на основе которых проводится анализ амплитуды отражения с целью определения чувствительности к повреждениям. Как показано в [333], при несимметричных видах КЗ происходит переход волн из одних модальных каналов в другие. Например, падающая по нулевому каналу волна может отразиться по нулевому, первому и второму каналам (рисунок 6.6). Исследования показали, что амплитуда модального канала 1 имеет наибольшую величину, но зависит от вида КЗ. Так, при КЗ фаз В и С распознавание невозможно из-за отсутствия составляющей модального канала 2 в излучаемом сигнале.

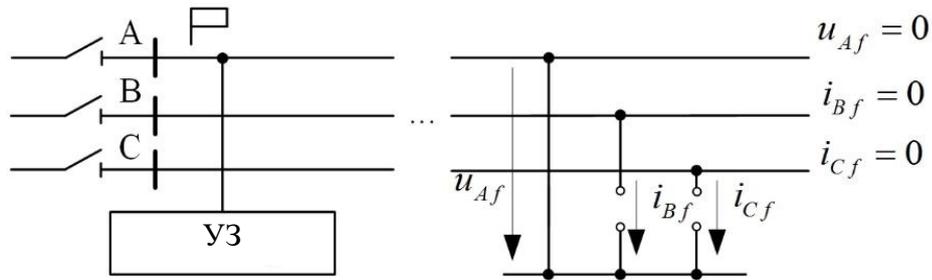


Рисунок 6.5 – Граничные условия для однофазного КЗ фазы А на землю

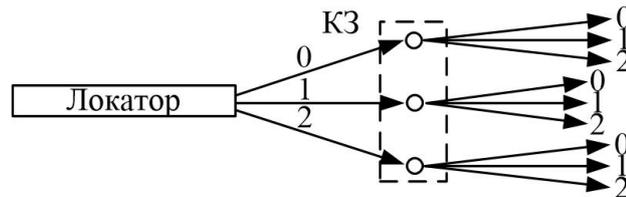


Рисунок 6.6 – Переход волн между модальными каналами

6.1.3 Разработка алгоритма зондирования секционированных линий электропередачи распределительных сетей

ЛЭП 6-35 кВ распределительных сетей характеризуются высокой степенью неоднородности, могут содержать кабельные вставки. На секционированных линиях устанавливают дополнительную автоматику быстрой реконфигурации сети для отделения «здоровой» ее части от поврежденного участка. Такая автоматика срабатывает в масштабе времени от 0,1 до 10 с и может вмешиваться в работу активного волнового ОМП, включаемого вслед за обнаружением КЗ.

Разработан алгоритм согласованной работы зондирования ОМП и автоматики управления секционированной линией электропередачи [334].

Для примера на рисунке 6.7 представлена схема секционированной ЛЭП напряжением 10 кВ, приближенная к реальной. Каждая секция содержит участки воздушного и кабельного исполнения. Для наглядности выбраны одинаковые длины участков ЛЭП. На рисунке 6.8 показаны коммутационные аппараты, работа которых ожидается при возникновении КЗ в заданной точке.

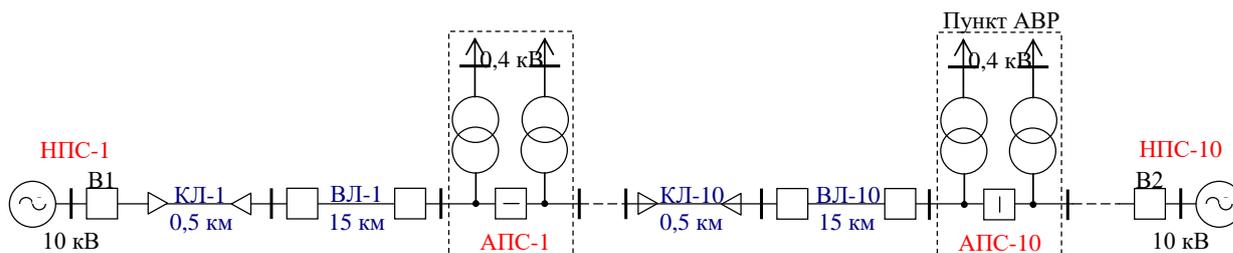


Рисунок 6.7 – Секционированная линия электропередачи

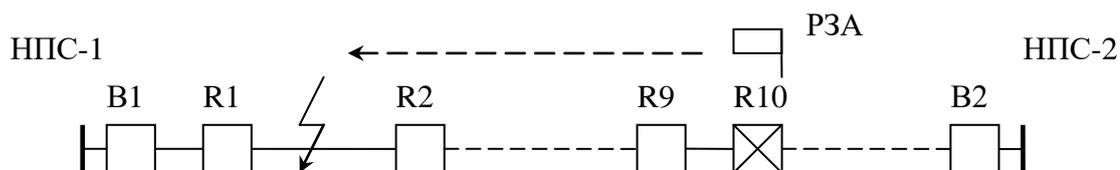


Рисунок 6.8 – Схема расположения коммутационных аппаратов ЛЭП

Отключение поврежденного участка осуществляется ближайшим реклоузером R1, установленным со стороны питания (НПС-1). После неуспешного однократного цикла АПВ реклоузер отключается действием максимальной токовой защиты (МТЗ) с блокировкой АПВ. Далее через заданную выдержку времени включается реклоузер R10 в пункте автоматического ввода резерва (АВР), а поврежденный участок изолируется отключением реклоузера R2. Отключение поврежденного участка при однофазном замыкании на землю происходит аналогично, действием защиты от ОЗЗ без последующего АПВ. Селективность действия защит достигается ступенчатым выбором выдержек времени срабатывания.

Рассмотренная линия электропередачи характеризуется высокой степенью неоднородности. Это значительно осложняет активное волновое ОМП и может приводить к повышению погрешности. Расчет затухания зондирующего сигнала в воздушных и кабельных участках ЛЭП производится по известным формулам [303]. Оценке подлежит дополнительное ослабление сигнала при переходе между кабельными и воздушными участками. Волна дважды за секцию переходит из кабельного в воздушный участок в прямом направлении, и дважды – в обратном. Это

приводит к коэффициенту дополнительного затухания на одной секции ЛЭП:

$$\alpha_{\text{секц}} = 2 \cdot 2 \cdot \alpha_{\text{КЛ-ВЛ}} = 4 \cdot 20 \lg \frac{2Z_{\text{ВЛ}}Z_{\text{ВЛ}}}{(Z_{\text{ВЛ}} + Z_{\text{КЛ}})^2}, \quad (6.4)$$

где $\alpha_{\text{КЛ-ВЛ}}$ – коэффициент затухания на одном кабельно-воздушном переходе;

$Z_{\text{ВЛ}}$ и $Z_{\text{КЛ}}$ – волновое сопротивление модального канала зондирующего сигнала в воздушном и кабельном участках соответственно.

На рисунке 6.9 показана зависимость дополнительного затухания зондирующего сигнала от числа секций ЛЭП. В рассматриваемой ЛЭП зондирующий сигнал при пробеге от устройства активного волнового ОМП до места повреждения и обратно составляет терять дополнительно 32 дБ.

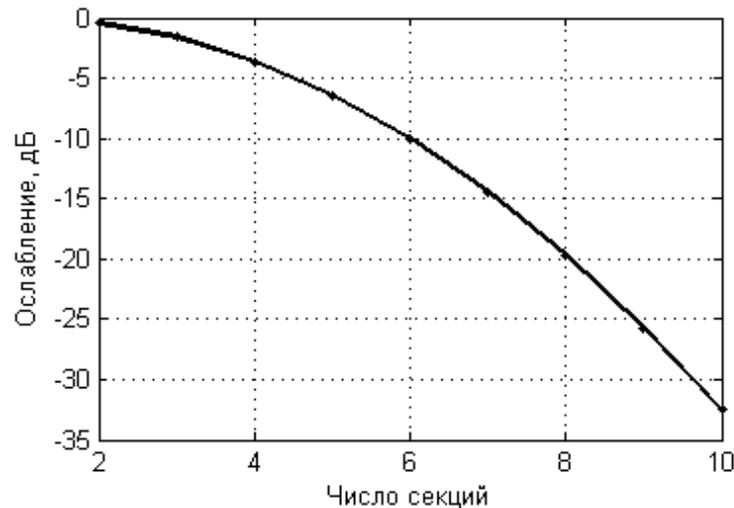


Рисунок 6.9 – Ослабление волны в секционированной линии

Важно, чтобы в момент локации устройство зондирования и место повреждения были связаны электрически. Такой путь нарушается на секционированных линиях, где отключение повреждения осуществляется не головным выключателем линии, а ближайшими к месту повреждения реклоузерами. Поэтому предложено разместить устройство активного ВОМП в пункте секционирования (рисунок 6.8). Анализ временной диаграммы

работы релейной защиты и автоматики показывает целесообразность пуска ВОМП до включения реклоузера R10 от АВР. Здесь учтено, что затягивание отключения повреждения для целей ОМП недопустимо. Вместо этого выполняется увеличение задержки АВР перед подачей питания.

6.2 Исследование распространения зондирующего сигнала в линии электропередачи

6.2.1 Анализ закономерностей отражения сигнала от однородной линии электропередачи

Ставится задача исследования процесса распространения зондирующих сигналов, излученных в линию электропередачи, и их наблюдения средствами диагностики [335]. Выше принималось, что распространение сигналов в однородной ЛЭП происходит без искажения и отражения. Исследования [114,303] сосредоточивают внимание на вносимом в волновой канал затухании и изменении групповой скорости волн при различных внешних параметрах. Тем не менее, практика применения локационных устройств показывает, что немаловажное значение для частотно-временной характеристики линии имеют и отражения от участков, которые при других условиях принято считать однородными. Эти протяженные участки воздушной линии характеризуются, например, постоянством типов опор, марки проводов, коридора и, как следствие, погонных электрических продольных сопротивлений и поперечных проводимостей. Однако обнаруживаемые отражения могут быть обусловлены локальной неоднородностью параметров в рамках пролета линии вблизи опор, несущих фазные провода, а также непостоянством высоты подвеса проводов вследствие их провиса. Эти эффекты исследованы в [303]. Плавное непрерывное изменение параметров линии при провисе

проводов сказывается на передаточной характеристике пролета, однако дает пренебрежимо малое отражение из-за малого градиента электрических параметров. Для сигнала, фиксируемого локационным устройством, представляется более значимым эффект отражения от опор линии электропередачи. Таким образом, ставится задача исследования свойств преломления и отражения локационных сигналов на воздушных опорах линий электропередачи.

Распространение электромагнитной волны по трехфазной линии электропередачи описывается телеграфными уравнениями [303]. Для расчетов удобно перейти к рассмотрению отдельных модальных составляющих. Далее рассматривается схема первого волнового канала однородной линии. Определяющими параметрами распространения волны являются волновое сопротивление и коэффициент распространения $\gamma = \alpha + j\beta$. Действительная часть α коэффициента распространения определяет величину затухания в линии, а мнимая часть β – фазовую скорость. Вне области резонансных частот для пролета линии величину коэффициента распространения можно принять постоянной [303], что говорит об отсутствии отражений, которые могли бы наблюдаться устройством локации.

В соответствии с [303], изоляторы на опорах, а также тело опор оказывают значительное влияние на распространение волн из-за локального увеличения собственных частичных емкостей проводов на землю и уменьшения взаимных частичных емкостей проводов. Схема замещения сегмента линии изображена на рисунке 6.10. Она характеризует распространение волны из одного пролета в другой. Изолятор и опора линии электропередачи представлены сосредоточенной емкостью C и активным сопротивлением R_y , имитирующим утечки (активные потери). Емкость C принимается в диапазоне от 20 до 80 пФ, активное сопротивление R_y – в

диапазоне от 350 до 650 кОм [303].

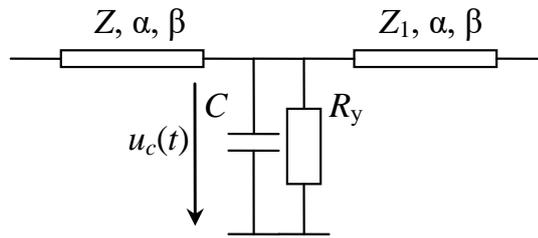


Рисунок 6.10 – Схема участка линии

Участки линии по обеим сторонам опоры одинаковые, они описываются параметрами передачи α и β , а также равными волновыми сопротивлениями, условно обозначенными для наглядности разными величинами Z и Z_1 соответственно. Волновое сопротивление в заданном диапазоне очень мало зависит от частоты [336]. Переходный процесс, возникающий при падении волны на опору из участка Z , описывается дифференциальным уравнением:

$$C \frac{du_c(t)}{dt} + \left(\frac{1}{Z} + \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{R_y} \right) u_c(t) = \frac{1}{Z} 2u(t), \quad (6.5)$$

где $u(t)$ – напряжение падающей волны как функция времени;

$u_c(t)$ – напряжение на емкости C , совпадающее с напряжением преломленной волны.

Отраженный сигнал напряжения соответствует выражению:

$$u_{\text{отр}}(t) = u_c(t) - u(t).$$

Обозначим величиной Z'_1 эквивалент сопротивлений Z_1 и R_y :

$$\frac{1}{Z'_1} = \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{R_y}.$$

Тогда дифференциальное уравнение (6.5) примет вид:

$$\frac{du_c(t)}{dt} + \left(\frac{1}{ZC} + \frac{1}{Z_1' C} \right) u_c(t) = \frac{2}{ZC} u(t).$$

Воспользуемся преобразованием Лапласа и запишем уравнение в операторной форме, принимая изображения $u(t) \sim X(p)$ и $u_c(t) \sim Y(p)$:

$$Y(p) = \frac{2}{p\tau + 1} \frac{Z_1'}{Z + Z_1'} X(p), \quad (6.6)$$

где $\tau = \frac{CZZ_1'}{Z + Z_1'}$ – постоянная времени переходного процесса.

При типовых [303] значениях емкости $C = 40$ пФ, волнового сопротивления $Z = Z_1 = 450$ Ом, сопротивления утечки изолятора $R_{и} = 400$ кОм получим постоянную времени $\tau = 9$ нс, тогда как полный возможный диапазон постоянных времени составляет от 3,5 до 26 нс. Эти величины много меньше периода сигналов, используемых при активной локации, однако именно переходный процесс, описываемый (6.5), является базой «фонового» отражения на рефлектограмме ЛЭП, зафиксированного, например, в [324,325,330], и заслуживает дальнейшего исследования.

6.2.2 Синтез и сравнительный анализ численных моделей отражения и преломления волны в линии электропередачи

Существует необходимость численного моделирования участка электрической сети с целью учета реальной топологии ЛЭП, видов неоднородностей, вида зондирующего сигнала. Выражение (6.5) можно рассматривать как аналоговый фильтр нижних частот. Получим его описание в форме разностного уравнения [280]:

$$\sum_{k=0}^{N-1} a_k x_{n-k} = \sum_{k=0}^{M-1} b_k y_{n-k}, \quad (6.7)$$

где x_i и y_i – выборки входной и выходной последовательностей, то есть выборки падающего и преломленного напряжений;

a_k и b_k – коэффициенты, определяющие свойства системы (фильтра);

N и M определяют число коэффициентов фильтра.

Численное интегрирование уравнения (6.6) может производиться с использованием аппроксимации Эйлера (левой производной) [257] с переходом к разностному уравнению, из которого после z -преобразования можно получить:

$$Y(z) = \frac{2}{\tau} \frac{Z'_1}{Z + Z'_1} \frac{1}{\left(\frac{1}{T} + \frac{1}{\tau}\right) - \frac{1}{T} z^{-1}} X(z),$$

где $X(z)$ и $Y(z)$ – преобразования последовательностей падающей и преломленной волн.

Переход описывается заменой $p \rightarrow (1 - z^{-1})/T$, где T – период (шаг) интегрирования, равный периоду дискретизации последовательностей. Здесь коэффициенты уравнения (6.7):

$$a_0 = \frac{2}{\tau} \frac{Z'_1}{Z + Z'_1}; \quad b_0 = \frac{1}{T} + \frac{1}{\tau}; \quad b_1 = -\frac{1}{T}. \quad (6.8)$$

Коэффициент передачи цифрового фильтра [280]

$$K_z(z) = \frac{\sum_{k=0}^{N-1} a_k z^{-k}}{\sum_{k=0}^{M-1} b_k z^{-k}}.$$

В данном случае фильтр будет иметь достаточное приближение только в случае, если $1/T$ намного меньше полосы пропускания аппроксимируемой аналоговой системы [257]. Это требует задания шага T

менее τ , что предъявляет высокие требования к моделирующей системе, целесообразный шаг которой видится лишь на порядок меньше периода максимальной частоты зондирующего сигнала.

Сравнение амплитудно-частотной (АЧХ) и фазочастотной (ФЧХ) характеристик цифрового фильтра, описанного (6.7) и (6.8), и его аналогового прототипа (6.6) на рисунке 6.11а показывает, что при наблюдаемой высокой точности ФЧХ повторить АЧХ не удалось, причем погрешность АЧХ зависит от величины использованного шага расчета T . Отметим, что АЧХ цифрового фильтра интересует лишь в узком диапазоне до 3 МГц, а потому достаточно выровнять характеристику в этих пределах. Стандартное преобразование полосы частот [280] через замену $z^{-1} \rightarrow (z^{-1} - \alpha)/(1 - \alpha z^{-1})$ в данном случае нерезультативно по причине того, что подавление фильтра в заданном диапазоне частот изменяется незначительно.

Поэтому применено преобразование спектра в аналоговом фильтре, что позволило выровнять АЧХ в соответствующем ему цифровом фильтре, сформированному аналогично (6.8). Используем замену $p \rightarrow kp$. Коэффициент k выберем из условия равенства коэффициента передачи проектируемого цифрового фильтра и исходного аналогового фильтра (6.6) на частоте $f_0 = 2$ МГц:

$$|K(j2\pi f_0)| = |K_z(e^{j2\pi f_0 T})|,$$

где $K(j\omega) = Y(j\omega)/X(j\omega)$ – коэффициент передачи фильтра (6.6) на частоте $j\omega$;

$K_z(e^{j\omega T})$ – коэффициент передачи дискретного фильтра (6.7), (6.8) с постоянной времени $k\tau$.

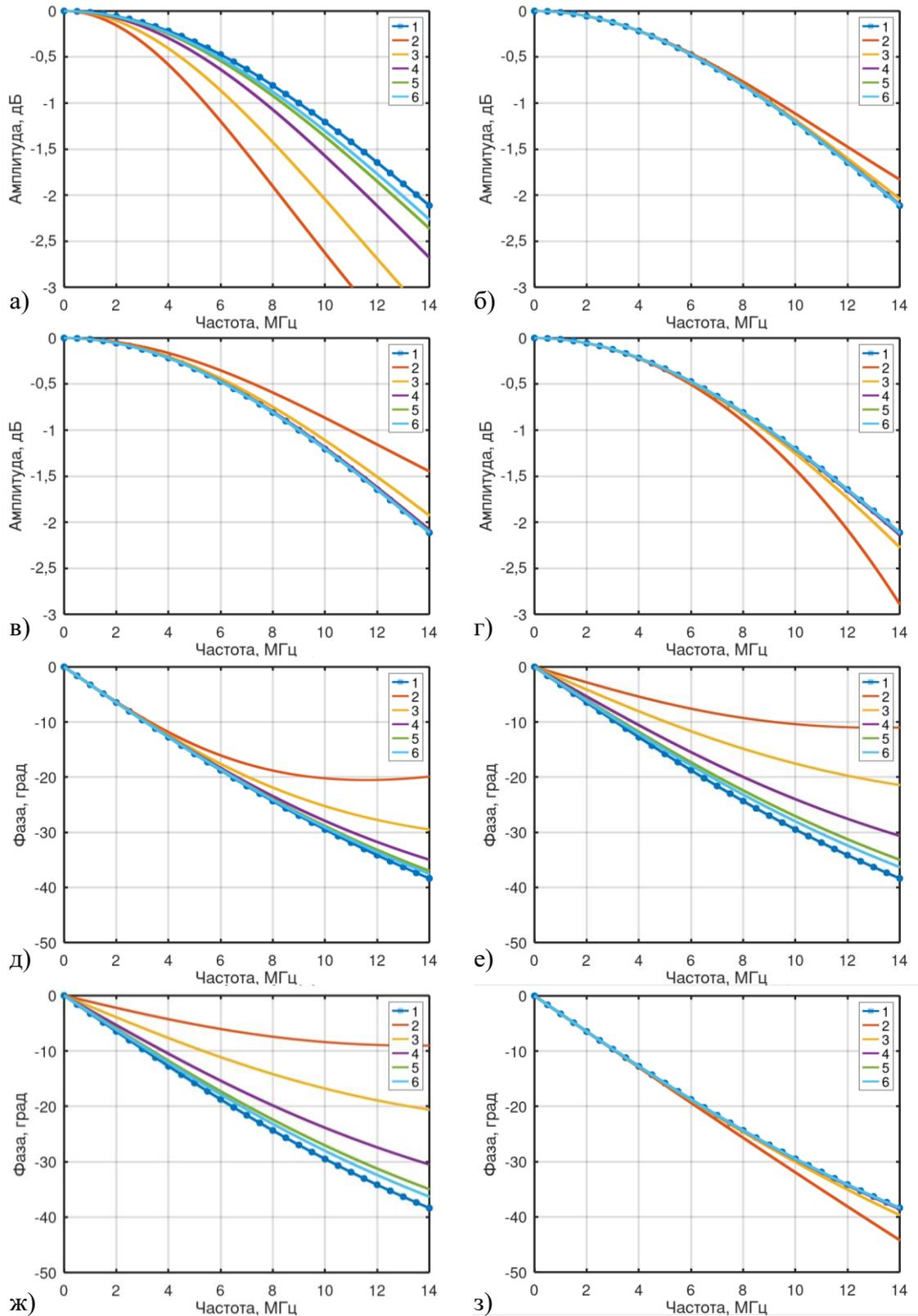


Рисунок 6.11 – АЧХ (а, б, в, г) и ФЧХ (д, е, ж, з) фильтров: а, д – (6.8), б, е – (6.10), в, ж – (6.12), г, з – (6.14):
 кривая 1 – фильтр (6.6), кривые 2, 3, 4, 5, 6 – цифровые фильтры при шаге моделирования 1/60, 1/120, 1/300, 1/720, 1/1200 мкс

Частота f_0 выбрана ниже максимальной частоты рассматриваемого диапазона, что обеспечивает меньшее среднее отклонение характеристик во всем диапазоне.

Можно получить

$$k = \frac{T}{2} \left(-1 + \sqrt{\frac{1}{\tau^2} + \frac{\omega_0^2}{\sin^2 \frac{\omega_0 T}{2}}} \right), \quad (6.9)$$

где $\omega_0 = 2\pi f_0$.

Тогда коэффициенты модифицированного фильтра:

$$a_0 = \frac{2}{k\tau} \frac{Z_1'}{Z + Z_1'}; \quad b_0 = \frac{1}{T} + \frac{1}{k\tau}; \quad b_1 = -\frac{1}{T}. \quad (6.10)$$

При различной величине шага моделирования T фильтр обеспечивает АЧХ в соответствии с аналоговым прототипом (6.6), что показано на рисунке 6.11. Вследствие выбранного способа преобразования частот ФЧХ фильтра имеет погрешность. Нужно отметить, что ФЧХ фильтров (6.7) и (6.8) в заданном диапазоне частот линейная, как и в (6.6), а потому величина максимума свертки сигналов и ширина импульса после фильтрации остаются неизменными.

Для малых $\omega_0 T$, как в рассмотренном случае, выражение (6.9) дает связь между постоянной времени фильтра τ и шагом моделирования:

$$T = \frac{1-k^2}{k} \tau. \quad (6.11)$$

Если понимать под $(1-k) \cdot 100\%$ относительную погрешность АЧХ фильтра (6.8), то из (6.11) можно получить величину шага, которая обеспечит приемлемую точность модели (6.8). Например, при $(1-k) \cdot 100\% = 1\%$ необходимый шаг моделирования составит $T = \frac{1}{50} \tau$ – неоправданно малую

величину. Значит, поиск иных способов моделирования целесообразен.

Для приближения (6.6) использовано также прямое преобразование z -преобразование [280] с заменой $(p + a) \rightarrow (1 - e^{-aT} z^{-1})$. Тогда коэффициенты цифрового фильтра:

$$a_0 = \frac{2Z'_1}{Z + Z'_1} (1 - e^{-T/\tau}); \quad b_0 = 1; \quad b_1 = -e^{-T/\tau}. \quad (6.12)$$

Характеристики фильтра (6.12) на рисунке 6.11 демонстрируют несколько большие отклонения от (6.6) по фазе и амплитуде, чем (6.10), при том же шаге моделирования.

Еще один вариант приближения (6.6) – билинейное преобразование [257], осуществляемое заменой $p \rightarrow \frac{2(1 - z^{-1})}{T(1 + z^{-1})}$.

Тогда передаточная функция приобретает вид:

$$K_z(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{2Z'_1}{Z + Z'_1} \beta \frac{1 + z^{-1}}{1 - z^{-1}(1 - 2\beta)}, \quad (6.13)$$

где $\beta = 1/(1 + \alpha)$, $\alpha = 2\tau/T$.

Коэффициенты фильтра определяются равенствами:

$$a_0 = a_1 = \beta \frac{2Z'_1}{Z + Z'_1}; \quad b_0 = 1; \quad b_1 = 2\beta - 1. \quad (6.14)$$

Соответствующий фильтр сохранил первый порядок, однако вырос порядок числителя, что означает образование нуля, не характерного для исходного фильтра. Тем не менее, в заданном диапазоне частот [0; 3 МГц] фильтр имеет высокую сходимость как АЧХ, так и ФЧХ, что иллюстрирует рисунок 6.11.

Таким образом, исследованы четыре цифровые реализации аналогового фильтра (6.6). Максимальная погрешность ΔA АЧХ фильтров в

рабочем диапазоне приведена в таблице 6.1. Наименее применимым видится фильтр (6.8), требующий высокую частоту дискретизации для приемлемой точности АЧХ. В таблице 6.2 представлены результаты поиска максимального шага расчета T , при котором фильтры обеспечивают погрешность не более 0,01 дБ по амплитуде и $1,0^\circ$ по фазе в диапазоне частот $[0; 3 \text{ МГц}]$. Таким образом, фильтр (6.14) на основе билинейного преобразования демонстрирует наиболее высокую точность, а нижней допустимой частотой расчета можно принять $1/T = 30 \text{ МГц}$.

Таблица 6.1 – Зависимость погрешности АЧХ фильтра от шага моделирования

ΔA , дБ	Шаг моделирования, мкс			
T , мкс	1/10	1/15	1/30	1/60
Фильтр (6.8)	0,869538	0,710912	0,411310	0,216651
Фильтр (6.10)	0,019242	0,008735	0,002211	0,000555
Фильтр (6.12)	0,123054	0,119580	0,080484	0,030349
Фильтр (6.14)	0,135483	0,040763	0,008457	0,002026
	Шаг моделирования, мкс			
T , мкс	1/120	1/300	1/720	1/1200
Фильтр (6.8)	0,110592	0,044711	0,018700	0,011232
Фильтр (6.10)	0,000139	0,000022	0,000004	0,000001
Фильтр (6.12)	0,008561	0,001419	0,000248	0,000089
Фильтр (6.14)	0,000501	0,000080	0,000014	0,000005

Таблица 6.2 – Максимальный допустимый шаг моделирования фильтра

Вид фильтра	T , мкс
Фильтр (4)	менее 1/1200
Фильтр (6)	1/720
Фильтр (8)	1/720
Фильтр (10)	1/30

6.2.3 Анализ влияния отражения и преломления волны в линии электропередачи на оценку ее состояния

Для оценки качества полученных моделей в задаче активной локации линий электропередачи выполнено моделирование множества отражений и преломлений. Контролировались значимые для локации величины: затухание при преломлении, сдвиг фаз и изменение ширины импульса при отражении. Оценивались как амплитудные параметры сигналов, так и результаты их согласованной фильтрации, используемой при расчете рефлектограмм.

Преломление зондирующих сигналов происходит с малым искажением формы падающей волны. Затухание при преломлении целесообразно оценивать на серии волн, имитируя распространение волны в длинной линии. При этом отмечено, что величина затухания при каждом преломлении не является постоянной величиной, что иллюстрируют рисунки 6.12 и 6.13.

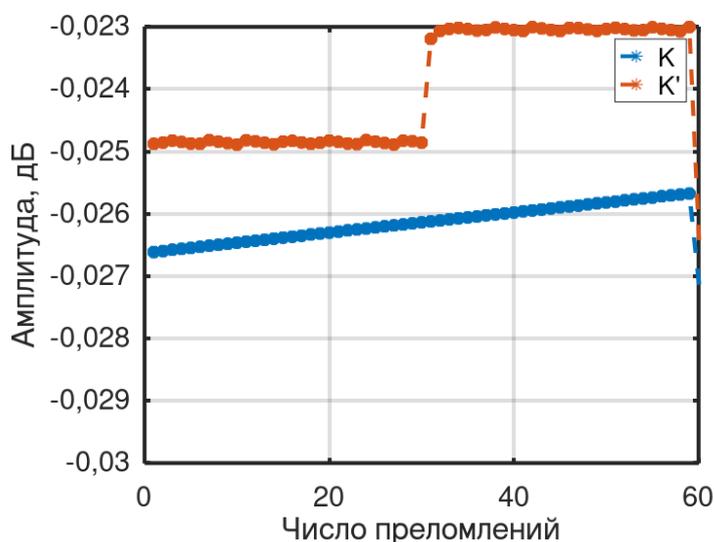


Рисунок 6.12 – Коэффициент передачи амплитуды K' и рефлектограммы K при накоплении преломлений до отражения

Различают затухание амплитуды сигнала K' и затухание амплитуды импульса после согласованной фильтрации K . Обе величины изменяются с

накоплением числа преломлений. Причем затухание амплитуды сигнала K' близко к постоянному, а затем может изменяться скачком, как в данном расчете, что связано с частотной и амплитудной модуляцией зондирующего импульса.

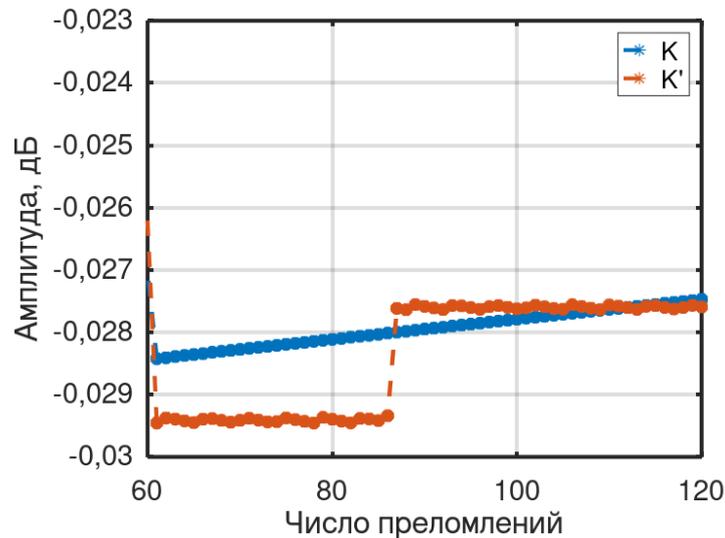


Рисунок 6.13 – Коэффициент передачи амплитуды K' и рефлектограммы K при накоплении преломлений после отражения

Ширина импульса после согласованной фильтрации практически не зависит от использованной модели линии и с накоплением отражений изменяется не более 1–3 %, что меньше типичного шага расчета и измерения в устройствах активной локации.

Наблюдается смещение максимума импульса после фильтрации на 0,5 мкс на каждые 60 сегментах линии. Модели (6.8) и (6.14) верно воспроизводят этот эффект, тогда как при недостаточной частоте расчета модель (6.10) дает ошибку до 0,3 мкс на том же участке линии. При значительной длине пролета более 300 м между опорами ошибка ОМП при такой симуляции может достигать 0,8 % от расстояния до оцениваемого отражения.

При отражении также наблюдается изменение амплитуды импульса и рефлектограммы при накоплении как числа предшествующих преломлений,

так и отражений, что иллюстрируют рисунки 6.14 и 6.15.

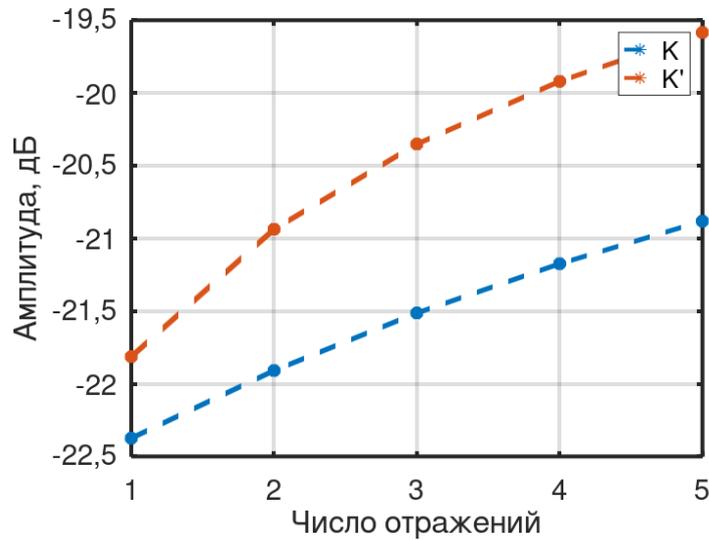


Рисунок 6.14 – Коэффициенты передачи амплитуды K' и рефлектограммы K при накоплении отражений

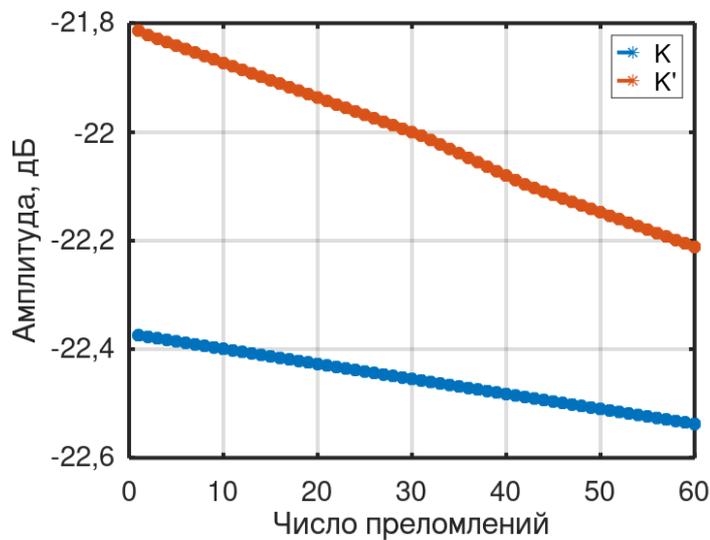


Рисунок 6.15 – Коэффициенты передачи амплитуды K' и рефлектограммы K при накоплении преломлений

Эффект гораздо более выраженный, чем при преломлении. Это связано с изменением спектра сигнала при отражении, как показано на рисунке 6.16 (номер кривой соответствует номеру отражения). При этом из рисунка видно сужение спектра сигнала с каждым отражением. Также наблюдается смещение максимума спектра в сторону верхних частот при

каждом повторном отражении. Оценка этого смещения Δf дана на рисунке 6.17. Можно видеть, что за пять отражений смещение максимума составило 0,54 МГц.

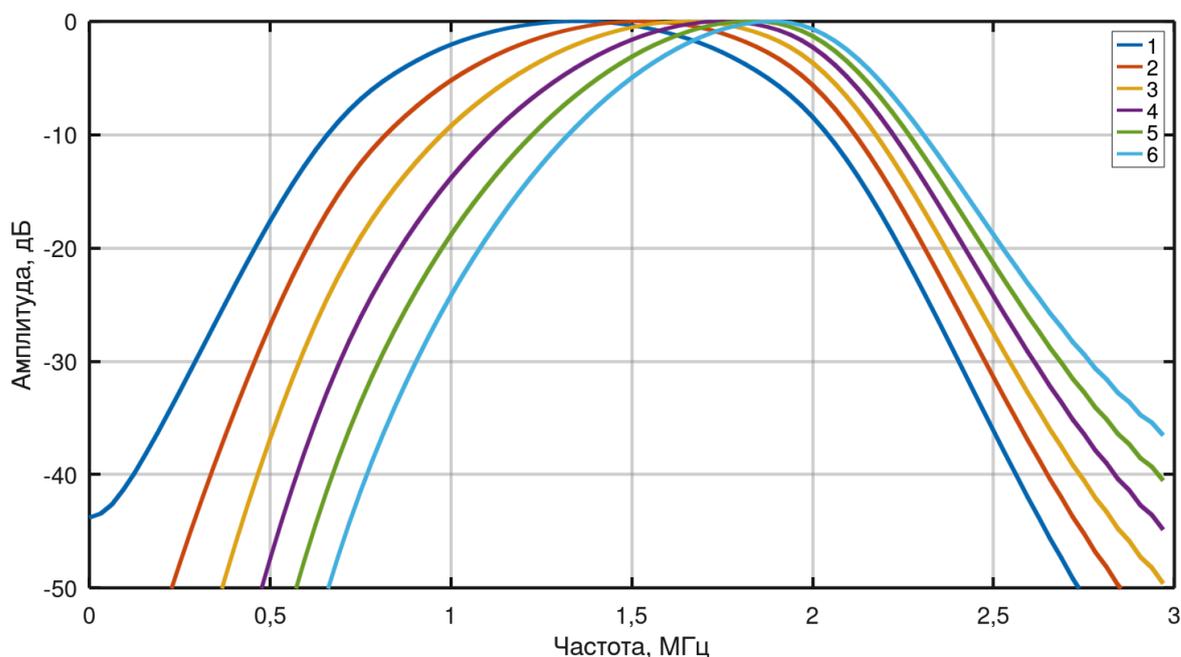


Рисунок 6.16 – Нормированные спектры сигнала при повторных отражениях

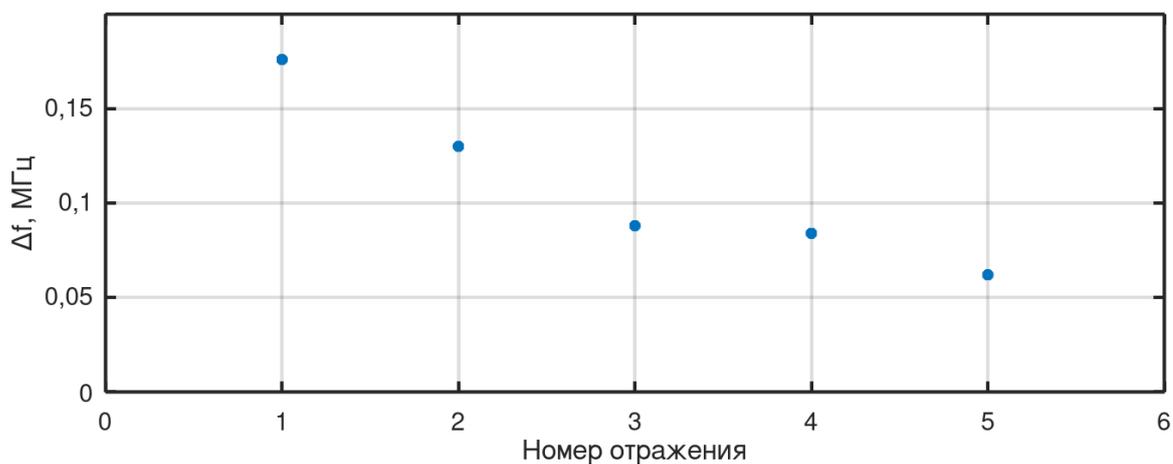


Рисунок 6.17 – Величина смещения частоты максимума спектра при накоплении числа отражений

Отмеченные изменения спектра зондирующего сигнала следуют из того, что АЧХ отражения изменяется в широких пределах в рабочем диапазоне частот, что иллюстрирует АЧХ отражения на рисунке 6.18.

Изменение спектра импульса при отражении привело к ступенчатому изменению коэффициентов передачи при преломлении после отражения. На рисунке 6.13 показано резкое отличие затухания от рисунка 6.12, что связано с отражением, которое условно моделировалось между преломлениями с номерами 59 и 60.

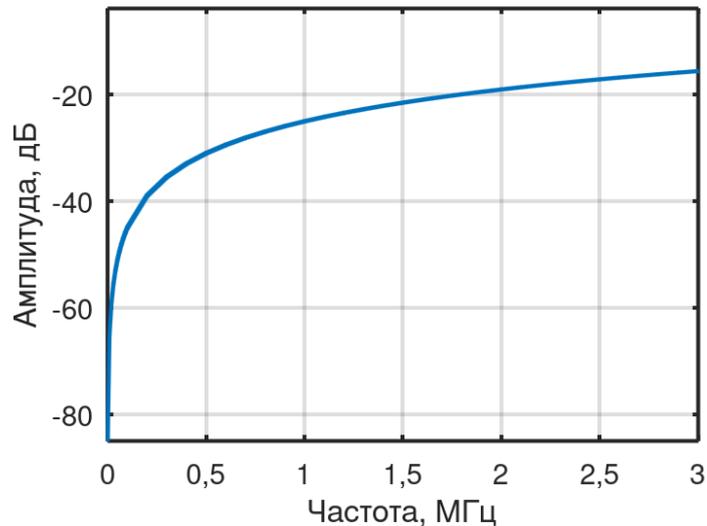


Рисунок 6.18 – Нормированная АЧХ отражения от опоры линии

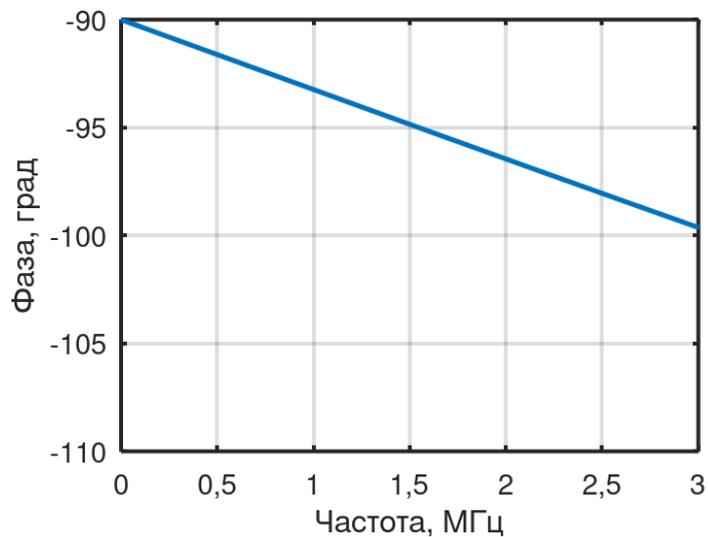


Рисунок 6.19 – ФЧХ отражения от опоры линии

ФЧХ отражения на рисунке 6.19 показывает значительное смещение фазы во всем рабочем диапазоне частот, причем с увеличением частоты

сдвиг возрастает. Хотя итоговый сдвиг во времени максимума импульса отражения (после согласованной фильтрации) и незначительный (сравним с преломлением), отражение, тем не менее, приводит к значительному возрастанию ширины импульса $d_{\text{имп}}$ на рефлектограмме в соответствии с рисунком 6.20.

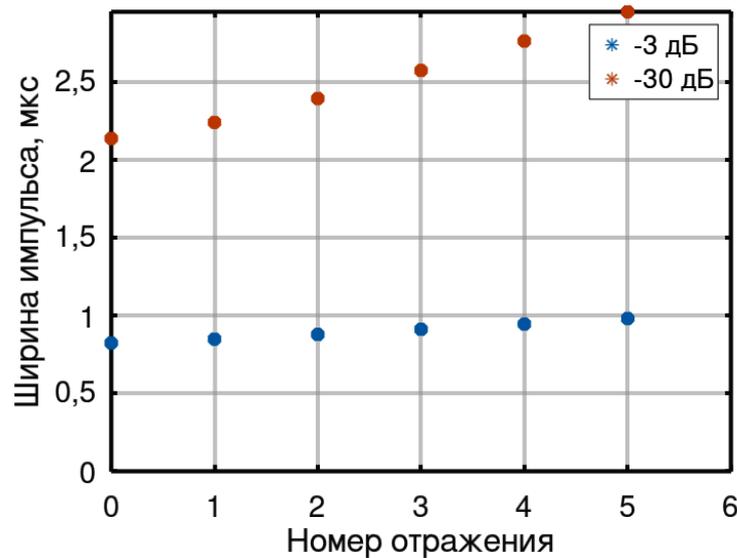


Рисунок 6.20 – Изменение ширины импульса $d_{\text{имп}}$ при отражении

Из перечисленных свойств распространения сигналов для предложенных упрощенных моделей следует, что после однократного отражения зондирующего импульса численно изменяется его дальнейшее преобразование в линии:

- последующее преломление происходит с возросшим затуханием из-за смещения спектра;

- возрастает разница между коэффициентами передачи амплитуды K' и рефлектограммы K .

Увеличение постоянной времени τ способствует обострению эффектов смещения спектра и повышению скорости изменения коэффициентов передачи и отражения вдоль линии.

Таким образом, наблюдаемое на рефлектограмме реального объекта изменение величины затухания отражения от однородных участков линии (например, на рисунке 6.22) получает свое подтверждение в упрощенных аналитических моделях линии электропередачи.

6.3 Синтез структуры измерительного органа активного волнового определения места повреждения с повышенной чувствительностью

Выявлены закономерности изменения затухания зондирующего сигнала после отражения и преломления в ЛЭП в связи со смещением спектра. Получено, что расчетная величина отражения из описанной модели входит в диапазон отражений на экспериментальных рефлектограммах. Дополнительное искажение измеренного затухания, соотнесенного с заданной координатой x_H , возникает из-за интерференции множества импульсов, обусловленных переотражениями локационного сигнала в ЛЭП при $x < x_H$. Исследование на моделях с последовательным соединением секций показало искажение отражения до 0,15 дБ/км на однородных участках ЛЭП. Причем эта величина может возрастать кратно, если на ЛЭП присутствуют узлы с высоким отражением: ответвления, угловые опоры и другие. Эти обстоятельства затрудняют расчет места повреждения методом рефлектометров [337], так как величина отражения от конструкций ЛЭП имеет высокую неопределенность. В результате распознавание имеет низкую чувствительность (отношение сигнал-шум) и, как следствие, короткую зону действия. Использование имитационной модели ЛЭП [303] оказывается эффективным только в случае ее высокой адекватности реальному объекту. В таком случае целесообразно построение модели по принципам идентификации объекта, например, [304].

Эти недостатки преодолены, например, в [338], где измерительный орган локационного ОМП использует дифференциальный принцип и

контролирует наиболее раннее превышение порога пространственной функцией разности рефлектограмм текущего режима $R(x)$ и предварительно записанного в память устройства $R_0(x)$ – дефектограмму $D(x)$:

$$D(x) = R(x) - R_0(x). \quad (6.15)$$

Такой подход расширяет объем используемой информации об объекте и призван реализовать работу в чисто аварийном режиме, где структурные изменения объекта проявляются наиболее явно.

Под руководством автора разработан макетный образец микропроцессорного терминала TOP 300 ВОЛНА, реализующий методы активного волнового ОМП. Опытно-промышленная эксплуатация устройств TOP 300 ВОЛНА проводилась на ЛЭП в различных предприятиях электрических сетей России в период с 2013 по 2023 годы. Собран большой объем данных, имеющих важное значение для апробации и обоснования технических решений с использования зондирования.

Так, опытный образец устройства активного волнового ОМП установлен для наблюдения воздушной ЛЭП (ВЛ) напряжением 35 кВ Алакуртти–Кайралы протяженностью 39,22 км. Подключение устройства выполнено с применением специально смонтированного высокочастотного присоединения к одной из фаз линии в соответствии с рисунком 6.1. Наблюдаемая ВЛ выполнена одготипными опорами ПС110-11 с применением угловых опор в местах изменения направления трассы и переходов через препятствия. На расстоянии 19,8 км от подстанции расположен отпаечный трансформатор, имеющий высокий коэффициент отражения зондирующего сигнала. Такое отражение согласуется с результатами других исследователей [339]. За время опытной эксплуатации устройства накоплена база рефлектограмм ВЛ в различных условиях и режимах.

Для иллюстрации дифференциального принципа на рисунках 6.22 и

6.24 кривыми 1 и 2 показаны рефлектограммы, записанные в нормальном режиме ЛЭП. В структуре отраженного сигнала наиболее различимы отражения от сосредоточенных неоднородностей ВЛ: повороты трассы, транспозиция проводов, отпайка. Их местоположение уточнено с использованием картографических данных и паспорта линии. Кривая 3 на этих рисунках показывает дефектограммы (6.15), для которых кривая 2 принята в качестве опорной. Как видно, дефектограмма варьирует в широких пределах, что связано с резким характером локального изменения рефлектограмм по длине: более 60 дБ на 50 м. Причем это изменение наблюдается в области фонового отражения от ЛЭП. В приведенном примере максимум составил 17,4 дБ, от которого необходима отстройка измерительного органа ОМП.

Автором разработан новый измерительный орган с применением аппарата алгоритмических моделей для обработки пространственно-временных данных зондирования. Адаптация к уровню фонового отражения в точке с координатой x осуществляется операциями интегрирования (\int) и дифференцирования ($-$) с заданной величиной задержки (T). Такая схема дает оценку величины отражения на сегментах ЛЭП от 0,5 до 5,0 км. Дальнейшая обработка производится вычитанием аналогичной оценки, рассчитанной для опорной рефлектограммы, с получением модифицированной дефектограммы $D'(x)$. Общая схема измерительного органа показана на рисунке 6.21.

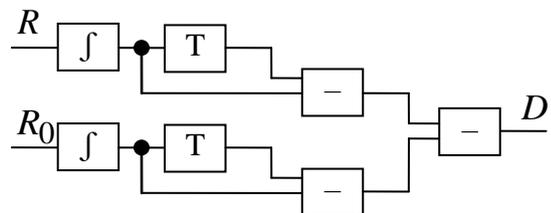


Рисунок 6.21 – Схема локационного измерительного органа

Расчетная величина $D'(x)$ при сравнении рефлектограмм нормального

режима, приведенных на рисунках 6.22 и 6.24, иллюстрируется графиками на рисунках 6.23 и 6.25 соответственно. Максимальное отклонение модифицированной дефектограммы значительно ниже, не превышает 0,7 дБ.

На рисунке 6.26 приведены опорная рефлектограмма (до повреждения) и рефлектограмма, измеренная при однофазном замыкании на землю. Как видно, отличие значений в точке ОЗЗ на расстоянии 35,0 км составило более 40 дБ, что указывает на повреждение линии в этом месте. Дополнительная ветвь, появляющаяся в схеме линии при ОЗЗ, – структурное изменение в ЛЭП, которое дает значительное отражение, соизмеримое с отражением от конца наблюдаемого объекта. Модифицированная дефектограмма этого же повреждения показана на рисунке 6.27, максимум составляет от 14 до 25 дБ в зависимости от параметров измерительного органа.

При $x > x_f$ функция $D(x)$ демонстрирует ожидаемое рассогласование рефлектограмм вследствие отличия структуры ЛЭП и, соответственно, появления дополнительной точки отражения и преломления электромагнитной волны. Отличие портрета наблюдается как в режиме под напряжением, так и со снятием рабочего напряжения с линии. Тем не менее, истинной координате повреждения соответствует максимум $D(x)$. Функция $D'(x)$ при $x > x_f$ также имеет возрастающий характер, однако точка перегиба при $x = x_f$ указывает на большое число дополнительных отражений, не характерных для неповрежденной ЛЭП.

В натурных испытаниях на той же ЛЭП при ОЗЗ и междуфазных КЗ в различных точках ЛЭП наблюдались значимые величины $D(x_f)$ от 30 до 50 дБ, а погрешность ОМП не превысила 0,3 км (таблица 6.3). Важно, что определены повреждения как под напряжением, так и без рабочего напряжения на ЛЭП.

Внедрение новой схемы измерительного органа позволило понизить

его уставку и повысить чувствительность на 10 дБ и более по сравнению с реализацией (6.15).

Таблица 6.3 – Результаты натуральных испытаний активного волнового ОМП

№	Вид повреждения	x_f , км	\hat{x}_f , км	$ \hat{x}_f - x_f $, км
1-3	ОЗЗ фазы А, без напряжения	9,15	9,1-9,3	0,05-0,15
4-5	ОЗЗ фазы В, без напряжения	9,15	9,1-9,2	0,05
6	ОЗЗ фазы С, без напряжения	9,15	9,2	0,05
7-8	КЗ фаз В и С, без напряжения	9,15	9,2-9,3	0,05-0,15
9	ОЗЗ фазы А, без напряжения	35,00	34,8	0,20
10	ОЗЗ фазы В, без напряжения	35,00	34,8	0,20
11	ОЗЗ фазы С, без напряжения	35,00	34,9	0,10
12	ОЗЗ фазы С, без напряжения	22,85	22,7	0,15
13	ОЗЗ фазы С, под напряжением	22,85	22,7	0,15
14	ОЗЗ фазы В, без напряжения	22,85	22,7	0,15
15	ОЗЗ фазы В, под напряжением	22,85	22,7	0,15

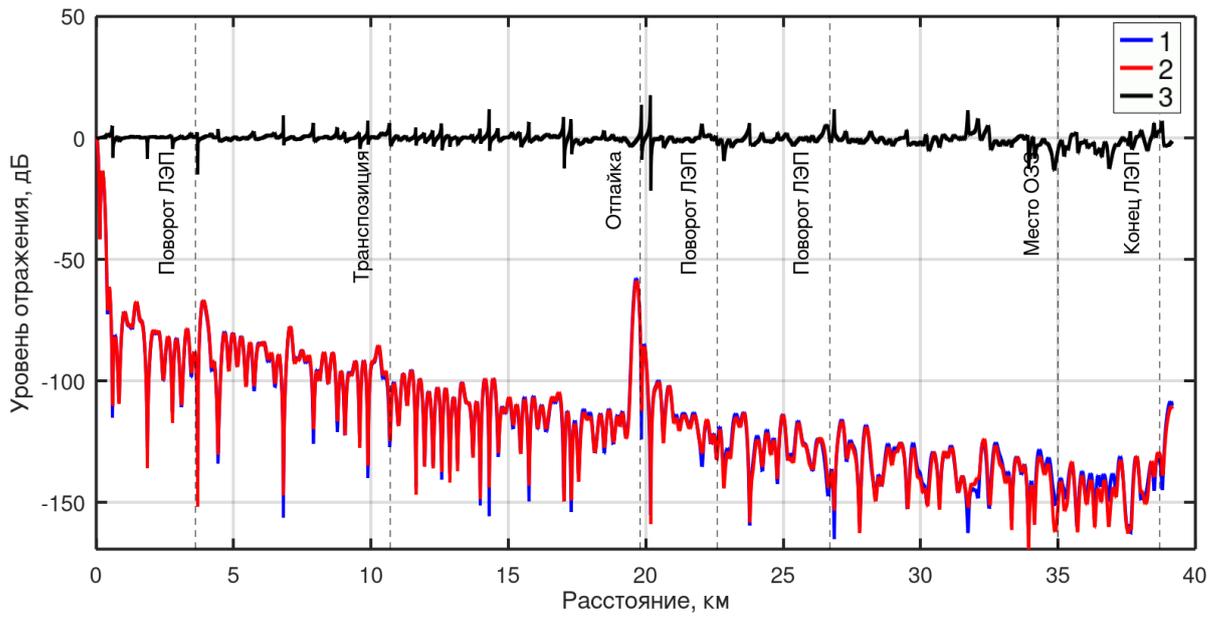


Рисунок 6.22 – Рефлектограммы и дефектограмма неповрежденной ЛЭП, режим 1

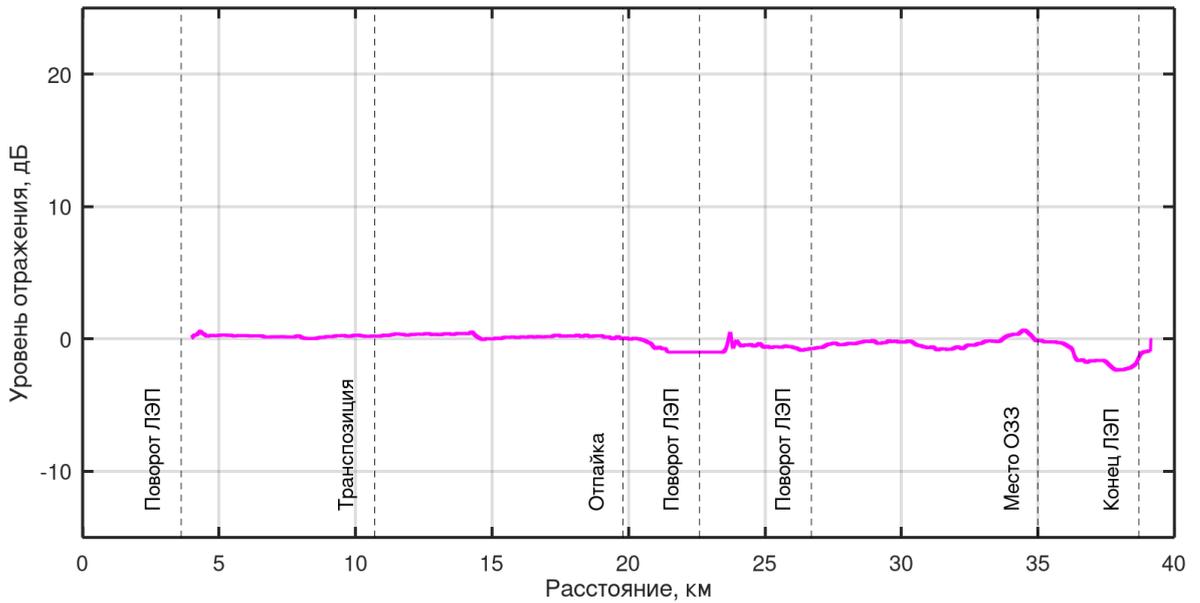


Рисунок 6.23 – Расчет D' неповрежденной ЛЭП, режим 1

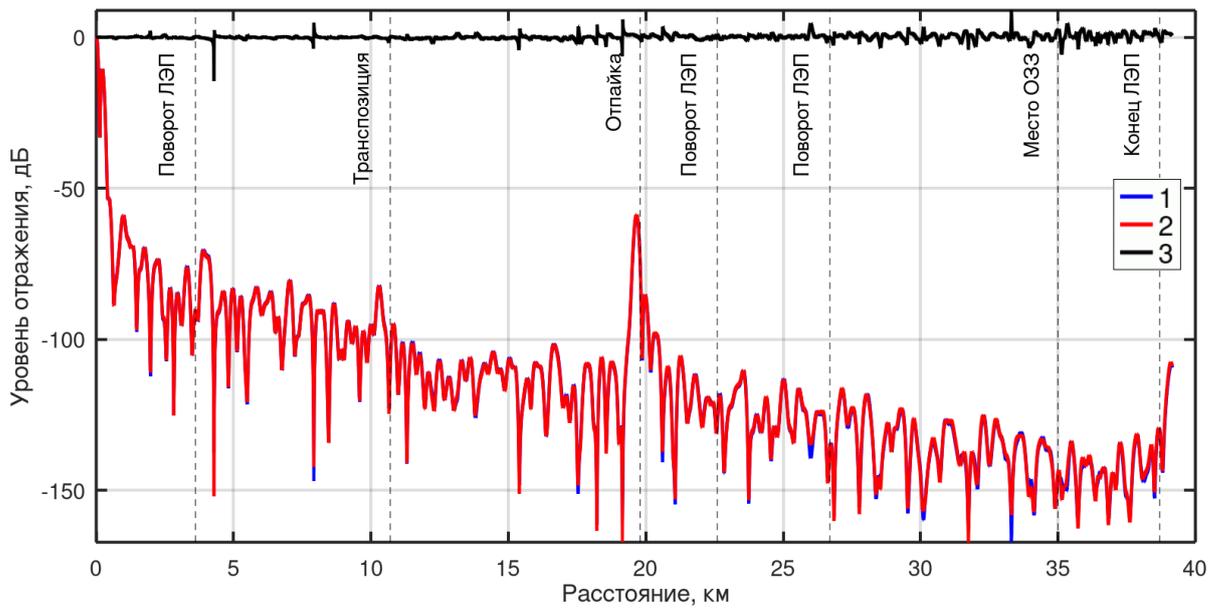


Рисунок 6.24 – Рефлектограммы и дефектограмма неповрежденной ЛЭП, режим 2

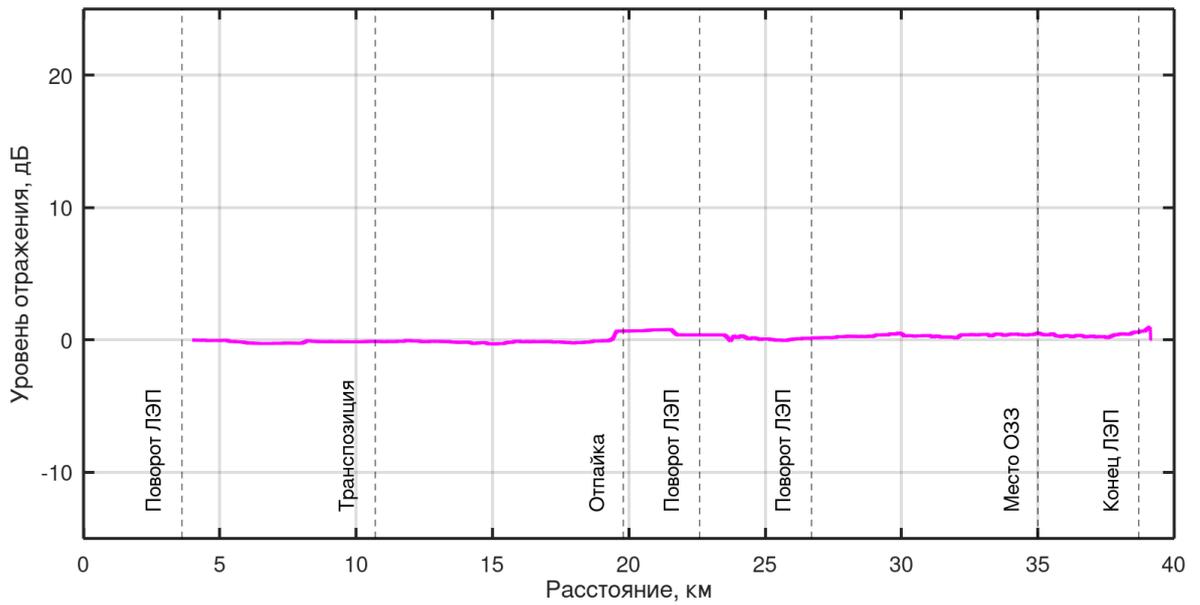


Рисунок 6.25 – Расчет D' неповрежденной ЛЭП, режим 2

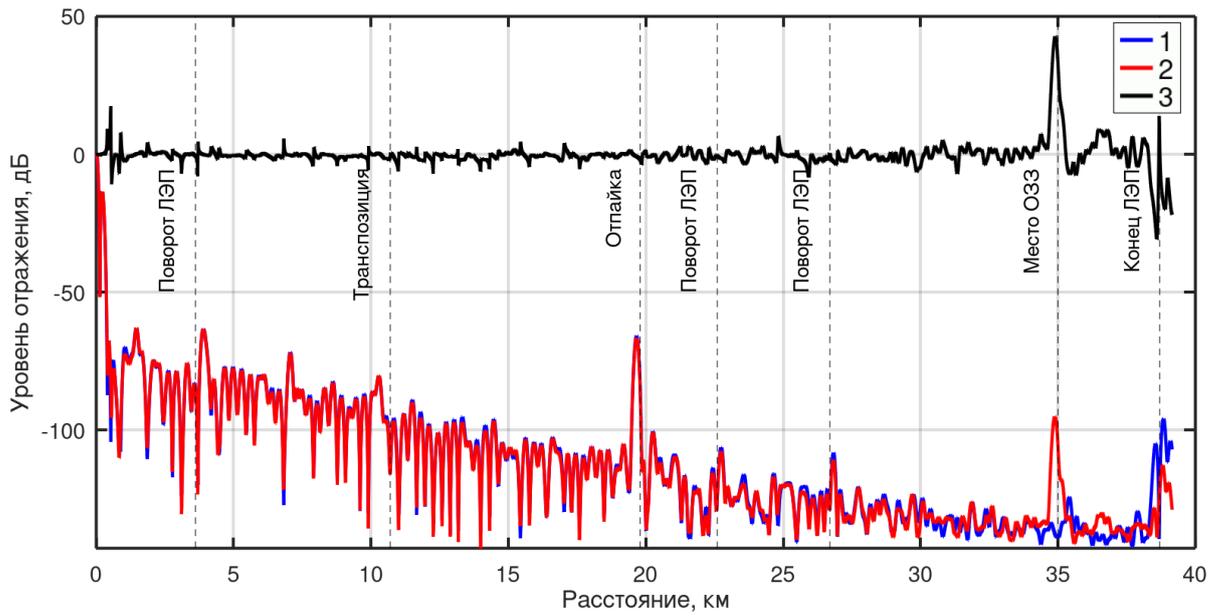


Рисунок 6.26 – Рефлектограммы и дефектограмма ЛЭП при однофазном замыкании на землю

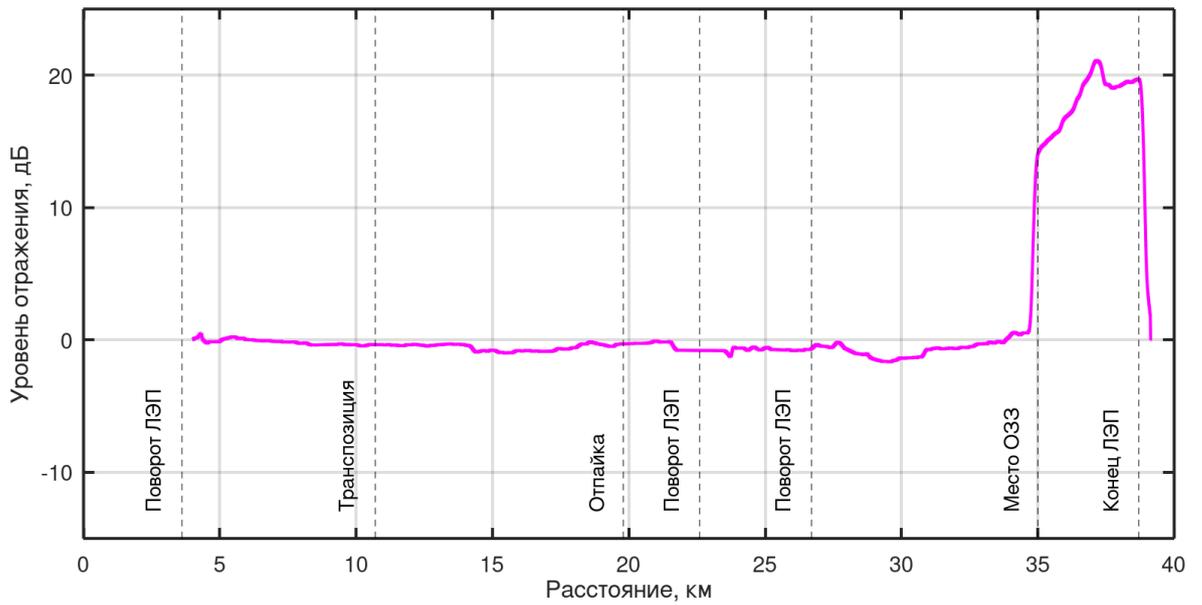


Рисунок 6.27 – Расчет D' ЛЭП при однофазном замыкании на землю

6.4 Оценка состояния линии электропередачи средствами активного волнового определения места повреждения в условиях гололеда

Ранее показано, что структурные изменения в ЛЭП отражаются на рефлектограмме в виде локального повышения уровня отражения, а устройство успешно выявляет факт их возникновения и местоположение путем сравнения рефлектограмм поврежденной и неповрежденной сети.

Дополнительная функция опытного устройства состоит в диагностике и оценке интенсивности гололедно-изморозевых отложений на ВЛ. Влияние ГИО проявляется главным образом в повышении затухания [303] и увеличении электрической длины ЛЭП за счет удлинения проводов под дополнительной механической нагрузкой [114,329]. Могут изменяться и геометрические параметры проводов под воздействием ветровой нагрузки [340]. Указанные эффекты приводят к снижению амплитуды и увеличению времени возврата отраженного от неоднородностей ЛЭП сигнала в устройство активного волнового ОМП.

Существующие решения оценки ГИО часто связаны с оценкой физических параметров проводов (например, [341]). Этими методами выполняют выборочную оценку гололедной обстановки в местах установки датчиков, что может приводить к ошибке в случае неравномерности ГИО по длине и значительным затратам на установку и обслуживание такой распределенной системы. К достоинствам этих решений можно отнести непосредственную и весьма точную оценку нагрузки проводов в контролируемых пролетах ЛЭП.

Оценка удлинения ВЛ при ГИО выполнена в [329]. Удлинение проводов в пролете может достигать 0,3% [342]. Этот эффект целесообразно учитывать, например, при оценке удаленности повреждений в задаче ОМП на фоне ГИО. Кроме того, удлинение приводит к смещению отражений от опор ЛЭП на рефлектограмме, в том числе на локальные минимумы

сравниваемой рефлектограммы, а потому возможно излишнее срабатывание измерительного органа, выявляющего локальные изменения на ЛЭП. Так, на рисунке 6.28 показано значительное возрастание дефектограммы до 50 дБ. В таких условиях разработанный измерительный орган на основе модифицированной дефектограммы не обнаруживает срабатывание на рисунке 6.29, поскольку производит сглаживание локальных минимумов отражения за счет операции интегрирования. В результате не возникают условия, когда максимум отражения сравнивается с локальным минимумом опорной рефлектограммы.

В работе выполнен анализ данных осенне-зимнего периода, когда на ЛЭП 35 кВ Алакуртти–Кайралы были зарегистрированы опасные гололедно-изморозевые отложения (ГИО) [343]. Реальная величина отложений фиксировалась службой линий при очистке в 2022-2023 годах. Фотография одного из случаев на рисунке 6.30 предоставлена эксплуатирующей организацией.

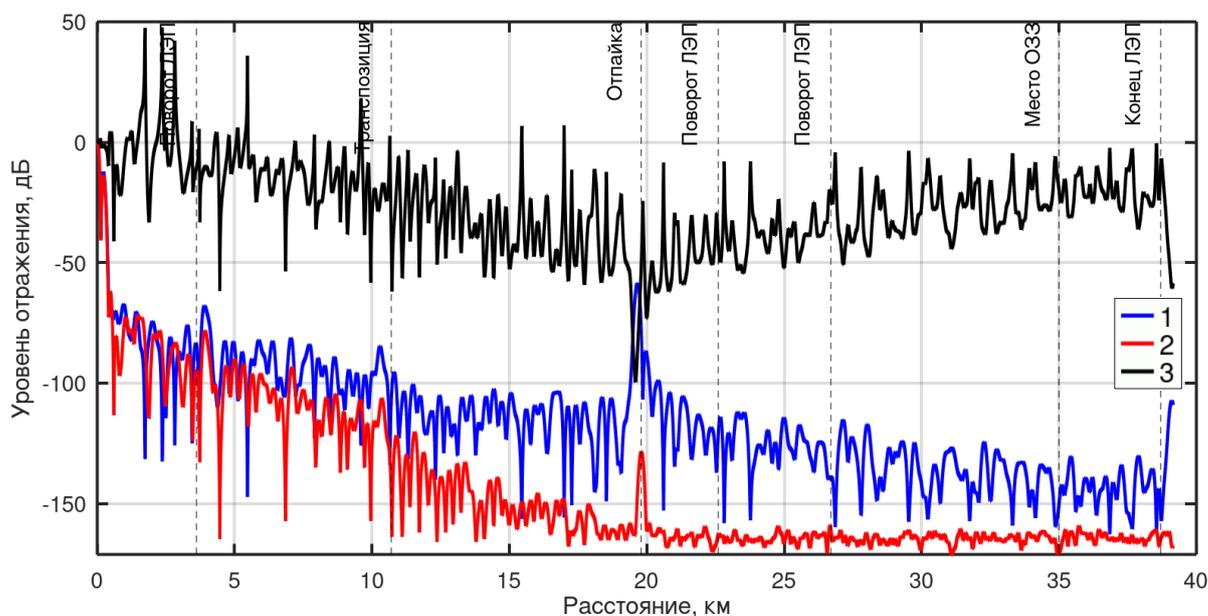


Рисунок 6.28 – Рефлектограммы и дефектограмма неповрежденной ЛЭП в условиях ГИО

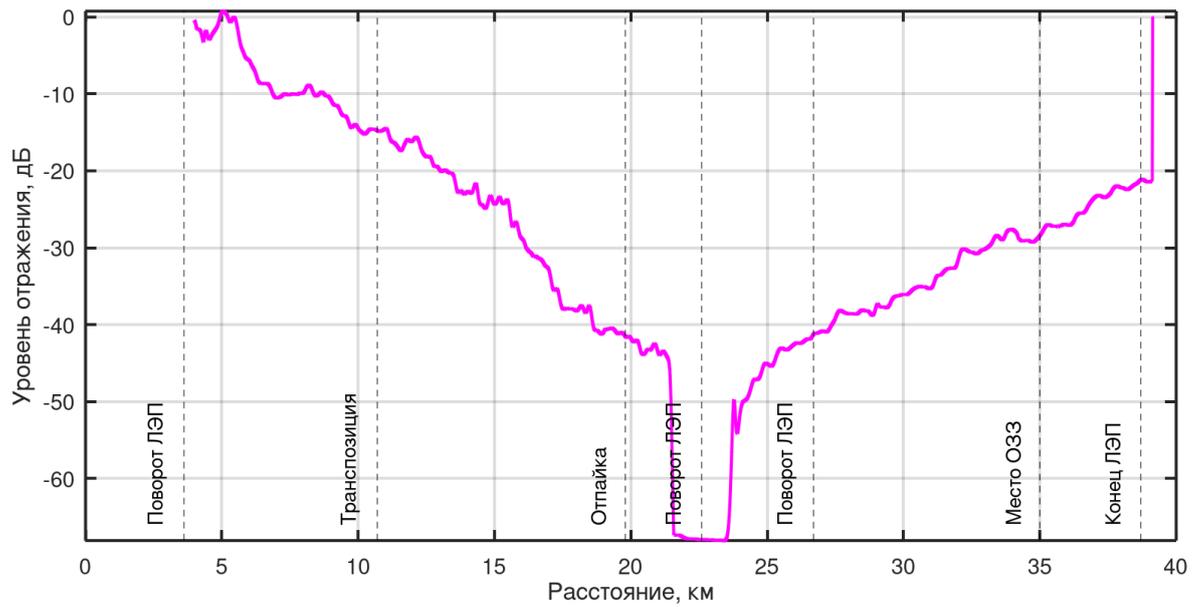


Рисунок 6.29 – Расчет D' неповрежденной ЛЭП в условиях ГИО



Рисунок 6.30 – Гололедно-изморозевые отложения на фазных проводах наблюдаемой линии

Вносимое ГИО затухание α зависит от ряда факторов [344], в том

числе от частоты передаваемого сигнала (6.2). В рассматриваемом устройстве испускаются импульсы широкого спектра, а амплитуда рефлектограммы определяется совокупной характеристикой по всему спектру.

Из [303] известна зависимость затухания α распространяющегося по проводнику сигнала от толщины стенки ГИО $d_{\text{ГИО}}$ в предположении цилиндрической формы проводника:

$$\alpha = K(f, Z, T) \lg\left(1 + \frac{d_{\text{ГИО}}}{r_{\text{П}}}\right), \quad (6.16)$$

где $K(f, Z, T)$ – функция частоты зондирующего сигнала f , волнового сопротивления линии Z и температуры льда T , значения которой заданы на основе экспериментальных и аналитических исследований [303];

$r_{\text{П}}$ – радиус провода, мм.

Пример такой функции изображен на рисунке 6.31 в соответствии с [303] для $d_{\text{ГИО}} = 20$ мм.

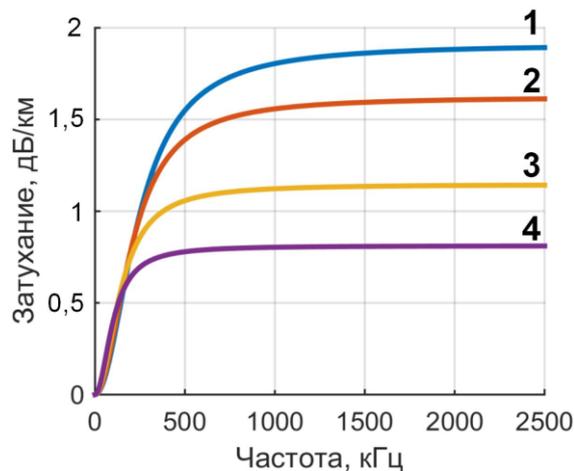


Рисунок 6.31 – Теоретическое затухание, вносимое ГИО, в зависимости от частоты сигнала при температуре 0 °С (кривая 1), –3 °С (кривая 2), –6 °С (кривая 3), –10 °С (кривая 4)

Как видно, для $K(f, Z, T)$ зависимость от температуры является

определяющей.

В полосе частот наибольшей энергии зондирующего импульса устройства ОМП от f_1 (несколько сотен килогерц) до f_2 (несколько мегагерц) получены усредненные значения $\alpha_{\text{расч.ср}}$ по формуле:

$$\alpha_{\text{расч ср}} = \frac{1}{f_2 - f_1} \int_{f_1}^{f_2} \alpha(f) df.$$

Уточненные значения $\alpha_{\text{расч}}$ получены с использованием огибающей спектральной плотности $A(f)$ зондирующего сигнала:

$$\alpha_{\text{расч}} = \frac{\int_{f_1}^{f_2} A(f)\alpha(f) df}{\int_{f_1}^{f_2} A(f) df}.$$

Используем значения $\alpha_{\text{расч}}$ как эквивалентное затухание всего широкополосного зондирующего сигнала. В таблице 6.4 приведены исходные данные и расчетные затухания для условий двух измерений из эксплуатации.

Таблица 6.4 – Расчетные затухания, вносимые ГИО

№ измерения	$d_{\text{ГИО}}$, мм	T , °C	$\alpha_{\text{расч}}$, дБ/км
1	70	-6,5	2,01
2	20	-7,0	1,11

На рисунке 6.28 показаны рефлектограммы ЛЭП до и после образования ГИО на проводах. Видимость ВЛ ограничена затуханием в линии: уже на расстоянии 18 км величина отражений от основных конструкций ЛЭП опускается до уровня шумов. Однако интенсивные

отражения от места отпайки позволяют расширить зону наблюдения до 19,7 км.

Поскольку величина затухания зондирующего сигнала в неповрежденной ВЛ в общем случае неизвестна, то для оценки дополнительного затухания при ГИО предложено использование приращения отклонения текущей рефлектограммы от рефлектограммы без ГИО, то есть разности значений дефектограммы на концах рассматриваемого участка с координатой начала x и длиной $x_{\text{Л}}$:

$$\alpha_{\text{изм}} = \frac{D(x + x_{\text{Л}}) - D(x)}{2x_{\text{Л}}}. \quad (6.17)$$

Величина (6.17) дает усредненную удельную оценку с учетом двойного затухания при прямом и обратном распространении сигнала по участку ВЛ. Для определения достоверности оценки (6.17) выполнено дробление наблюдаемого участка на n участков меньшей длины, где длина каждого участка $x_k - x_{k-1} = x_{\text{Л}}/n$, $k = 1, 2, \dots, n$. Тогда оценка дополнительного затухания каждого участка оценивается по формуле

$$\alpha_{\text{изм}k} = \frac{D(x_k) - D(x_{k-1})}{2(x_k - x_{k-1})}.$$

В таблице 6.5 показаны оценки $\alpha_{\text{изм}k}$ для различной степени дробления наблюдаемого участка для рефлектограммы по рисунку 6.28. Видно, что при $n \leq 8$ предложенная оценка неоднородна. Это отчасти может объясняться вариацией толщины стенки ГИО вдоль ВЛ: такой факт отмечен службой линии, проводившей очистку проводов. С другой стороны, в измерениях отражений в точках x_k присутствует значительная ошибка, связанная с разбросом малых отражений от конструкций ЛЭП, что иллюстрирует рисунок 6.22. Обратим внимание, что разброс дефектограммы значительно меньше в точках, относящихся к структурным особенностям

ЛЭП (ответвления, повороты коридоров), чем на однородных ее частях. Дополнительный разброс может значительно исказить проведенную оценку $\alpha_{\text{изм}k}$. К сожалению, оценить разброс измерений в условиях ГИО по имеющимся данным не представляется возможным из-за изменения гололедной обстановки в периоды между измерениями.

Таблица 6.5 – Оценка $\alpha_{\text{изм}k}$

n	$\alpha_{\text{изм}1}$, дБ/км	$\alpha_{\text{изм}2}$, дБ/км	$\alpha_{\text{изм}3}$, дБ/км	$\alpha_{\text{изм}4}$, дБ/км	$\alpha_{\text{изм}5}$, дБ/км	$\alpha_{\text{изм}6}$, дБ/км	$\alpha_{\text{изм}7}$, дБ/км	$\alpha_{\text{изм}8}$, дБ/км
1	2,22	-	-	-	-	-	-	-
2	0,73	3,71	-	-	-	-	-	-
3	1,25	1,32	4,09	-	-	-	-	-
4	0,53	0,93	3,12	4,31	-	-	-	-
5	1,28	0,58	1,20	2,48	5,56	-	-	-
6	1,51	0,99	-0,32	2,96	2,45	5,73	-	-
7	0,45	1,14	0,55	2,38	1,79	2,76	6,47	-
8	-0,20	1,26	0,44	1,41	3,26	2,98	0,09	8,52

Таким образом, в качестве границ участков приняты характерные точки линии в соответствии с таблицей 6.6. Это разделение позволило стабилизировать дополнительное затухание (6.17).

Таблица 6.6 – Опорные точки участков гололеда

k	Расстояние от начала ВЛ x_k , км	Описание
0	0	Место измерения
1	3,9	Поворот ЛЭП
2	10,3	Транспозиция
3	19,7	Отпайка

По полученным в эксплуатации данным выполнена оценка $\alpha_{\text{изм}k}$ на длительном интервале времени. Соответствующие величины представлены на рисунке 6.32 с дискретностью 6 часов. Прослеживаются три периода гололеда, завершившиеся на 4, 10 и 17 сутки наблюдения. Затухание вдоль линии неоднородно во все периоды. Измеренные затухания на рисунке 6.32 имеют тот же порядок, что и теоретические затухания таблицы 6.4.

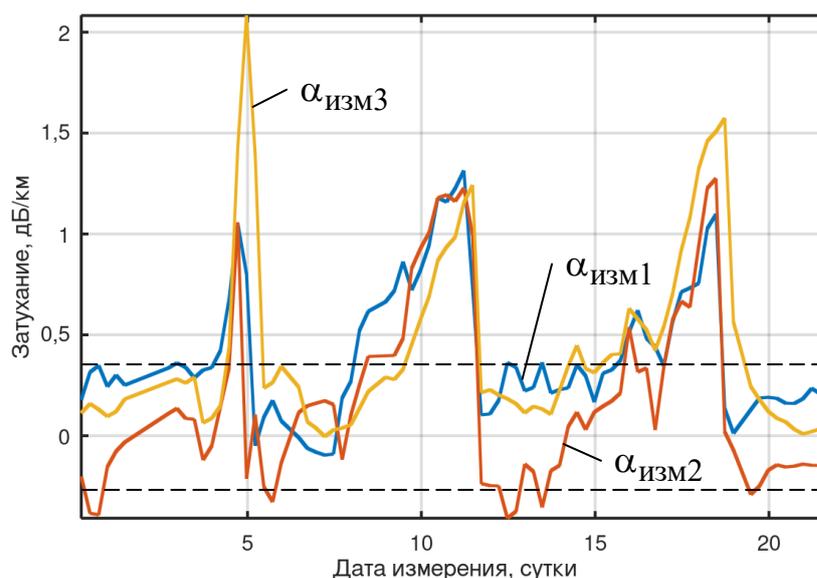


Рисунок 6.32 – Удельное затухание $\alpha_{\text{изм}k}$ по участкам ВЛ

Оценен и представлен на рисунке 6.33 разброс оценок удельных затуханий $\Delta\alpha_{\text{изм}k} = \alpha_{\text{изм}k} - \overline{\alpha_{\text{изм}k}}$ в зависимости от $\overline{\alpha_{\text{изм}k}}$ на участках ЛЭП в условиях относительной стабильности параметров ВЛ в летний и весенний периоды без ГИО с длительностью наблюдения не менее шести последовательных дней. По оси абсцисс отложена величина. В таблице 6.7 представлены максимальные абсолютные отклонения, максимальное значение не превысило 0,36 дБ/км.

Измеренный разброс $\alpha_{\text{изм}k}$ можно отнести к инструментальной погрешности метода оценки дополнительного затухания. Эти данные изображены пунктирной линией на рисунке 6.32. Отметим, что в периоды

гололеда дополнительное затуханиекратно превышает эти пороги.

Таблица 6.7 – Оценка уровня отражения от неоднородностей ВЛ

k	1	2	3
$\Delta\alpha_{\text{изм}k}$, дБ/км	0,23	0,36	0,26

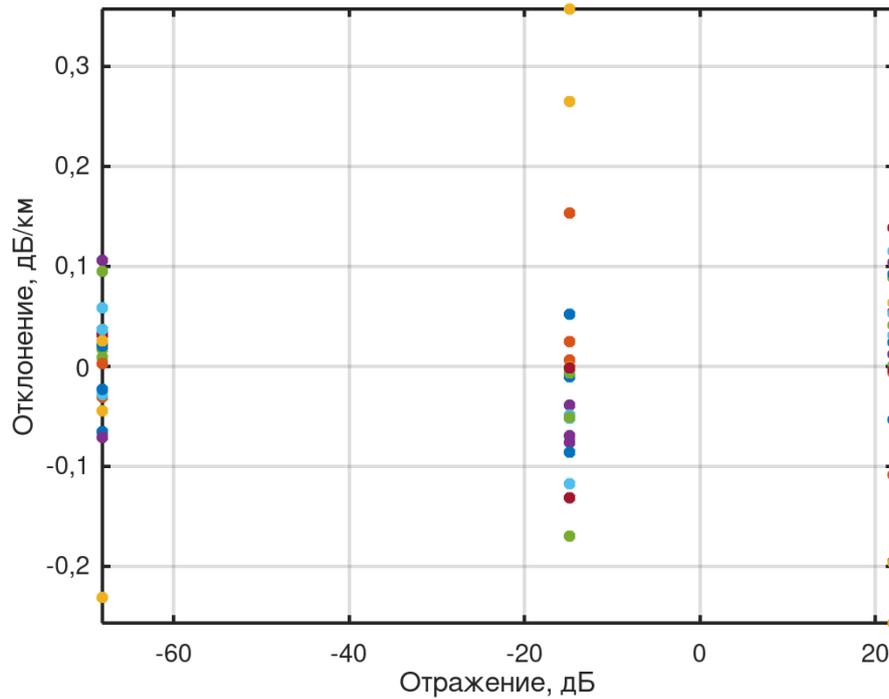


Рисунок 6.33 – Разброс измерений в нормальном режиме

Оценка толщины стенки ГИО $d_{\text{гио}}$ возможна на основе (6.16) при известной функции $K(f,Z,T)$. Зависимость функции K от частоты f и волнового сопротивления линии Z носит дробно-рациональный характер. Более сложная температурная зависимость определяется критической частотой, соответствующей максимуму тангенса угла диэлектрических потерь в слое льда. В [303] эта зависимость задана в табличном виде для ограниченного набора температур. Для получения непрерывных характеристик $\hat{K}(f,Z,T)$ выполнена аппроксимация температурной зависимости полиномом второй степени. Относительная погрешность оценки для пяти табличных значений температуры в диапазоне от -20°C до 0°C не

превысила 3,7%, что указывает на успешность аппроксимации. Результирующая оценка толщины стенки ГИО для произвольной температуры на заданном сегменте выполняется на основе уравнения:

$$d_{\text{ГИО}k} = r_{\text{II}} (10^{\alpha_{\text{изм}k} / \hat{K}(f, Z, T)} - 1).$$

Кривые на рисунке 6.34 показывают возможный диапазон толщины стенки гололеда при заданном удельном затухании. Расчетная величина $d_{\text{ГИО} \text{ расч}}$ представлена из предположения температуры -6°C . Если известна иная температура, то истинная величина стенки гололеда $d_{\text{ГИО} \text{ ист}}$ может быть оценена по соответствующему графику с высокой точностью.

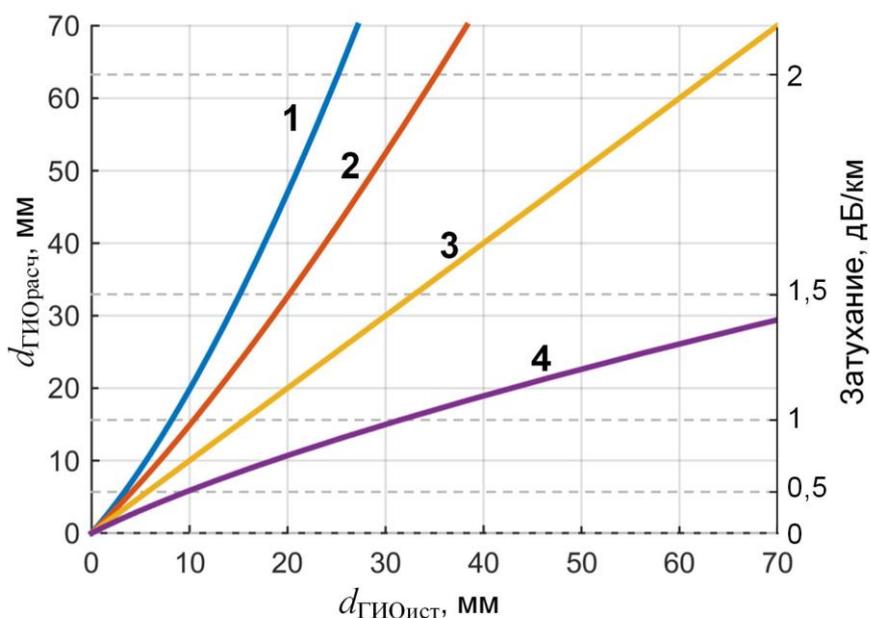


Рисунок 6.34 – Оценка толщины стенки ГИО при температуре 0°C (кривая 1), -3°C (кривая 2), -6°C (кривая 3), -10°C (кривая 4)

Выполнена оценка толщины стенки ГИО по описанной процедуре для дополнительного затухания на рисунка 6.32. Данные эксплуатации о температуре оказались слишком разреженными, поэтому использованы измерения трех метеостанций, расположенных вблизи ЛЭП: Алакуртти, Салла/Наруска (Финляндия), Салла (Финляндия). Определена средняя температура воздуха в районе ЛЭП (график на рисунке 6.35). Видны три

оттепели в заданный период. Они соответствуют сходу ГИО с проводов. На рисунке 6.36 представлен расчет $d_{\text{ГИО}}$, который дает более равномерную оценку толщины стенки по участкам.

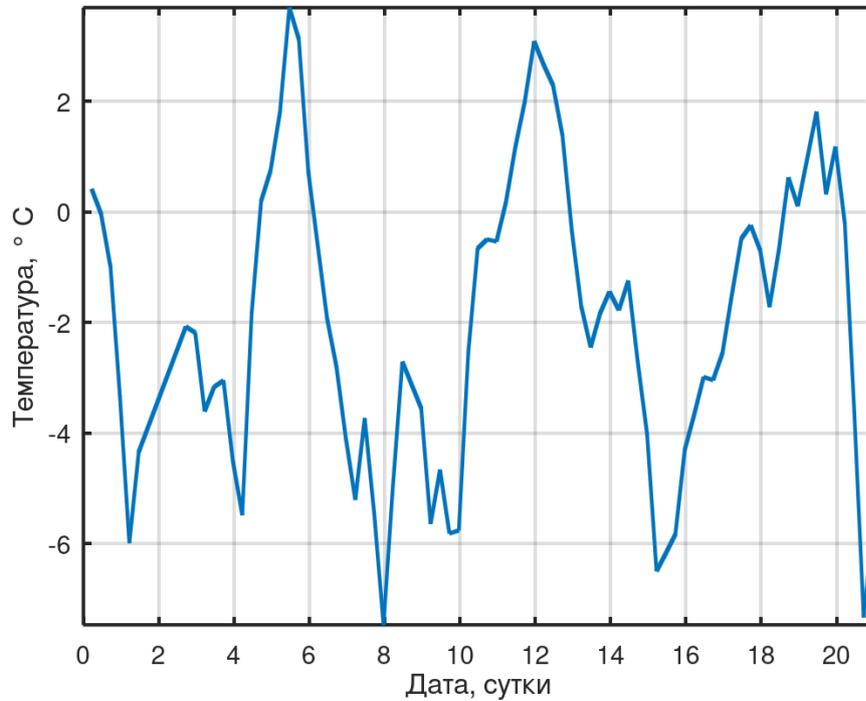


Рисунок 6.35 – Температура в районе ЛЭП в период наблюдения

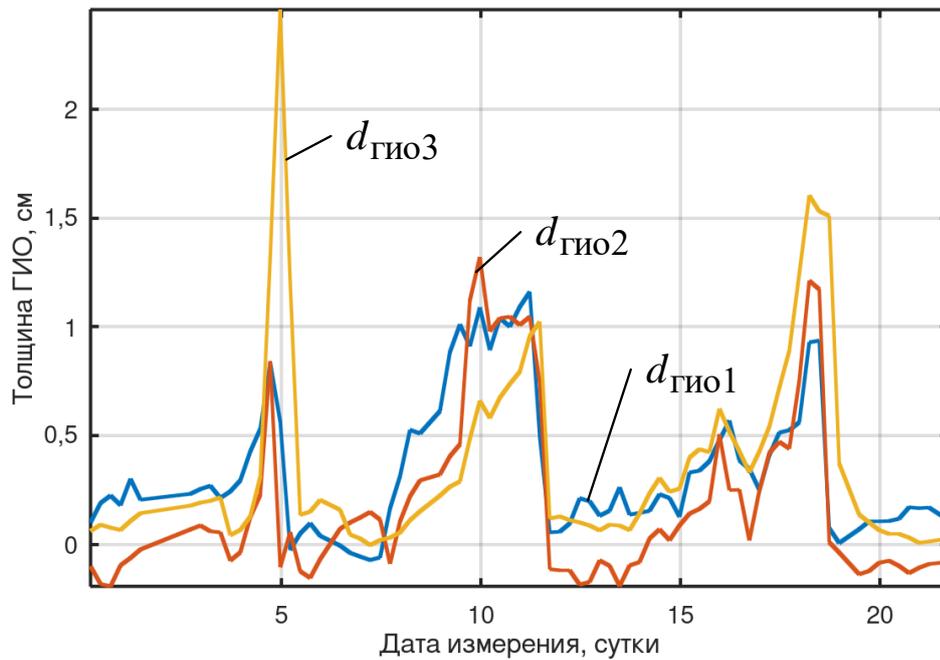


Рисунок 6.36 – Толщина стенки ГИО $d_{\text{ГИО}}$ по участкам ЛЭП

Накопленные устройством данные дают возможность оценить скорость нарастания ГИО. В таблице 6.8 представлена оценка скорости β изменения удельного затухания по участкам линии 1, 2 и 3, а также эквивалентная скорость γ роста стенки ГИО на проводах для этих же участков.

Таблица 6.8 – Оценка скорости изменения затухания по участкам ЛЭП

Дата	β_1 , дБ/км/час	γ_1 , мм/час	β_2 , дБ/км/час	γ_2 , мм/час	β_3 , дБ/км/час	γ_3 , мм/час
5	0,062	0,52	0,120	1,07	0,165	1,77
10	0,016	0,23	0,016	0,25	0,021	0,23
19	0,012	0,24	0,050	0,48	0,040	0,51

Видно, что в период гололеда целесообразно производить измерения с интервалом порядка одного часа, а при превышении определенного порога затухания незамедлительно выполнять очистку проводов от ГИО [344].

6.5 Применение средств активного волнового определения места повреждения для контролируемого повторного включения кабельно-воздушной линии

6.5.1 Разработка технического решения с использованием технологий определения места повреждения

Методы активного волнового ОМП применены в опытном образце комплекса АПВК, предназначенного для автоматического повторного включения (АПВ) кабельно-воздушной ЛЭП (КВЛ) с контролем ее неповрежденного состояния.

Развитие инфраструктуры мегаполисов является определяющим стимулом развития сети КВЛ высокого напряжения. Правила устройства

электроустановок предписывают автоматическое повторное включение КВЛ и воздушных ЛЭП напряжением выше 1 кВ [174]. Однако в электротехнической практике долгое время отсутствовали типовые технические решения, обеспечивавшие АПВ КВЛ высокого напряжения (например, 110 кВ и выше). Опыт эксплуатации показывает, что короткие замыкания на кабельной части линий имеют устойчивый характер, изоляция кабелей имеет мало шансов на самовосстановление после пробоя и последующего КЗ. Значит, целесообразно реализовать АПВ кабельно-воздушных ЛЭП при повреждениях на воздушных участках и запретить АПВ при повреждениях на кабельных участках. Поэтому применяемые на практике алгоритмы АПВ ВЛ [345] неэффективны на комбинированных ЛЭП.

Для эффективного АПВ высоковольтных КВЛ необходимо с высокой точностью определить, на каком из участков (воздушном или кабельном) произошло повреждение, и при устранении повреждения на воздушном участке реализовать АПВ ЛЭП. Применение дистанционных органов для этой цели показало низкую точность разграничения КЗ и нецелесообразность применения из-за малой протяженности кабельной части, а также относительно малого индуктивного продольного сопротивления кабеля [346]. Существуют решения, связанные с контролем тока в экране кабелей при КЗ [347-349] и демонстрирующие положительные результаты на моделях и в эксплуатации. Впоследствии они были реализованы в виде стандарта ПАО «ФСК–Россети» [350]. Еще один вид решения проблемы связан с наблюдением волновых переходных процессов для выявления поврежденного участка ЛЭП [115], однако он обладает недостатками дистанционных методов.

Для обеспечения надежности работы ЛЭП 110 кВ и выше по заказу ПАО «МОЭСК» под руководством автора выполнена научно-исследовательская и опытно-конструкторская работа (НИОКР) по созданию

устройства автоматического повторного включения с функциями определения места короткого замыкания кабельно-воздушных линий, а также контроля состояния поврежденного воздушного участка перед повторным включением КВЛ, что не реализуется другими существующими системами.

При разработке были выделены следующие задачи:

- определение поврежденного участка КВЛ,
- определение места повреждения (ОМП),
- контроль состояния поврежденного участка в бестоковую паузу цикла АПВ.

Успешное решение всех этих задач должно предотвратить включение на устойчивые КЗ и существенно снизить затраты на восстановление работоспособности ЛЭП.

Автором предложены принципы измерений и схемы взаимодействия элементов АПВК [351]. Определение поврежденного участка КВЛ, как показало исследование, целесообразно выполнять методом сравнения токов по концам кабельных участков КВЛ. Точность зоны селективности обеспечивается местом установки измерительных преобразователей. Схема продольной токовой дифференциальной защиты, однако, является во многих случаях неоправданно дорогим решением, в первую очередь, из-за высокой стоимости канала связи и его прокладки. В данной работе применены датчики тока (ДТ) – терминалы специального исполнения, установленные на кабельно-воздушных переходах ЛЭП. Требования к каналу связи между ними значительно снижены, а потому для передачи данных между полуккомплектами может применяться ряд беспроводных технологий, включая GPRS, 3G, 4G и другие протоколы сотовой связи, доступные в городской среде, а также передача по радиоканалу.

Измерение токов в местах сопряжения кабельного и воздушного участков является сложной технической задачей. В рамках настоящей работы

апробировано и обосновано решение на основе трансформатора тока, закрепленного поверх изоляции силового кабеля (пофазно) под опорным изолятором. Это решение впоследствии подтвердилось практикой применения других аналогичных систем на кабелях [352]. Терминал ДТ выполняет непрерывное измерение токов и имеет собственные пусковые органы, выполненные по схеме, описанной в главе 3. Они служат для выделения информационных составляющих аварийного процесса. Передача этих данных в центральное устройство АПВК может осуществляться по медленному каналу связи, однако должна быть завершена за время цикла АПВ.

Центральное устройство комплекса АПВК (АУВ2) имеет возможность сравнивать токи, измеренные в разных точках КВЛ в момент КЗ. Это возможно благодаря синхронизации величин токов каждого полукомплекта с глобальными навигационными системами. Использован дифференциальный измерительный орган с торможением [242]. Таким образом, КЗ на кабельном участке КВЛ может быть надежно выявлено, при этом зона естественным образом ограничена местоположением трансформаторов тока.

Для решения задачи ОМП предусмотрены алгоритмы на разных принципах:

- ОМП по параметрам аварийного режима;
- активное волновое ОМП;
- пассивное волновое ОМП.

Особенности реализации функции ОМП по параметрам аварийного режима в терминалах серии TOP 300 описаны в главе 4. В системе АПВК осуществлена синхронизация измерения информационных составляющих для целей ОМП с внешним пусковым сигналом на отключение от защиты ЛЭП.

Функция зондирования имеет важное преимущество перед

остальными видами ОМП, поскольку она обнаруживает повреждение как под напряжением (в процессе КЗ), так и после отключения. Таким образом, осуществляется диагностика воздушной части КВЛ. Активное зондирование запускается в бестоковую паузу. Если повреждение не самоустранилось, то функция выдаст запрет АПВ. Процент успешности АПВ в таком случае может быть повышен. Другое применение функции зондирования – ручной или автоматический пуск перед опробованием линии. В результате активного волнового ОМП могут быть выявлены КЗ, обрыв фазных проводов, включенный заземляющий нож на отпайке и другие ситуации, в которых подача напряжения на КВЛ недопустима. Эти функции возможны благодаря измерительному органу на основе дефектограммы или модифицированной дефектограммы, выявляющему значительное дополнительное локальное отражение.

Функция пассивного волнового ОМП в комплексе АПВК резервирует и уточняет ОМП по параметрам аварийного режима. Использован принцип двухстороннего синхронизированного измерения начального фронта волны на каждой подстанции, ограничивающей ЛЭП. Функции активного и пассивного волнового ОМП конструктивно помещены в терминал ВОЛНА2.

Таким образом, центральное устройство АПВК использует множество распределенных источников информации [353]. Его логика учитывает возможный выход из строя как измерительного оборудования, так и оборудования связи. Несмотря на то, что все коммуникационные каналы системы АПВК имеют схемы физического или логического резервирования, возможна потеря отдельных видов информации. Использован принцип реле с нарастающей информационной базой для того, чтобы в условиях ограниченного набора данных принимать наиболее эффективное решение. Так, в случае отсутствия показаний одного из ДТ выполняется анализ режима при отключении, учитывается диагностический статус канала связи (аналогично методам главы 2). Если режим может быть отнесен к КЗ с

односторонней подпиткой, производится запрет АПВ.

Создан макет системы АПВК в соответствии с проектом его применения на КВЛ 110 кВ Костино-Горенки с отпайкой на ПС Балашиха. Состав комплекса, каналы связи и потоки данных показаны на рисунке 6.37. Логическая функция элементов пояснена на рисунке 6.38.

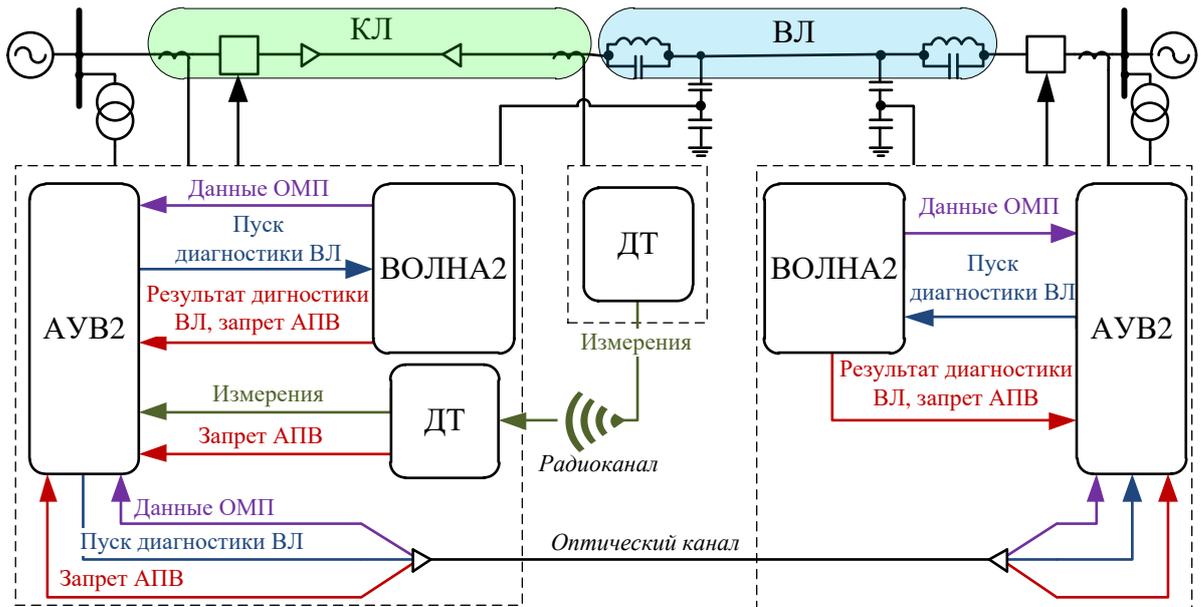


Рисунок 6.37 – Структурная схема подключения опытного образца АПВК на КВЛ Костино-Горенки с отпайкой

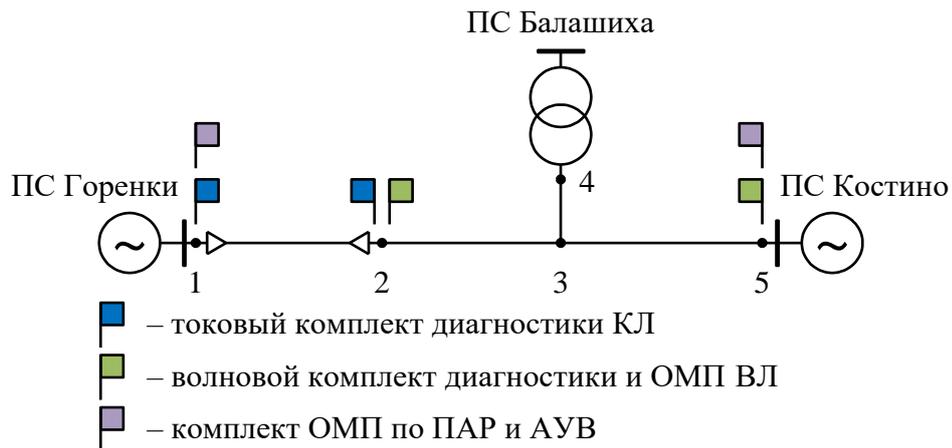


Рисунок 6.38 – Расстановка оборудования на КВЛ Костино-Горенки с отпайкой

В лабораторных условиях проведены испытания как отдельных компонентов, так и системы в целом. Подготовлен ряд схемно-режимных

ситуаций на ЛЭП с использованием имитационной модели, реализованной на базе программно-аппаратного комплекса. В модели были учтены основные особенности ЛЭП высокого напряжения, характерных для мегаполисов: ответвления, индуктивная связь между ЛЭП, соотношение параметров ЛЭП и систем. Моделировались режимы повреждений в различных точках ЛЭП и прилегающей сети (рисунок 6.39):

- установившиеся режимы с различными значениями и направлениями потоков мощности;
- однофазные, междуфазные, двухфазные на землю и трехфазные КЗ;
- повреждения через переходные сопротивления.

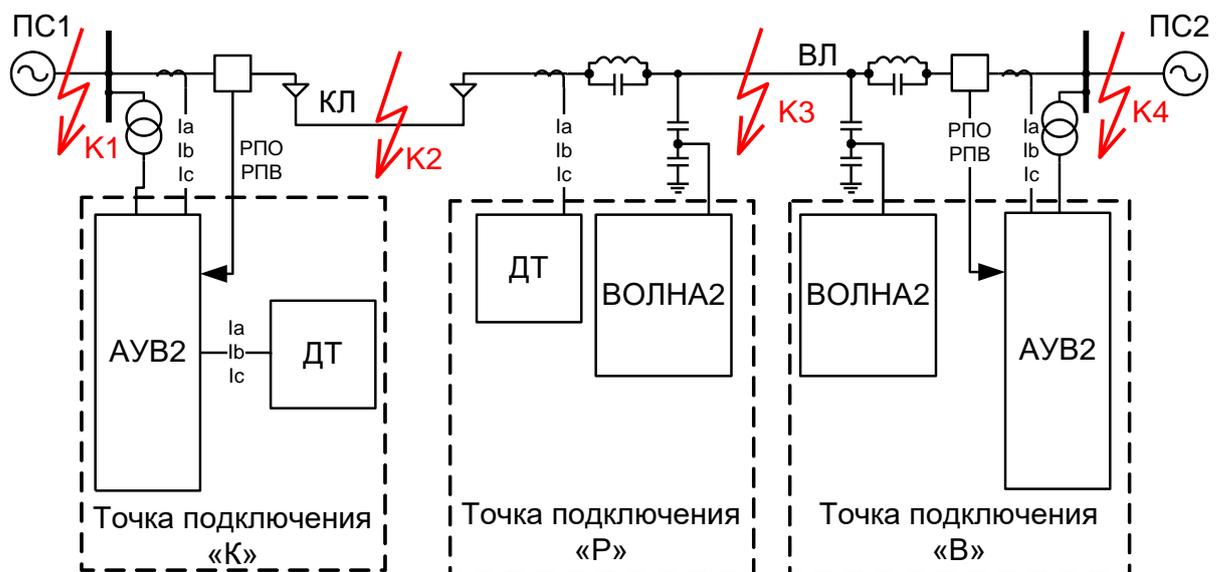


Рисунок 6.39 – Схема линии-прототипа для определения режимов испытаний

Исследование пассивного и активного волнового методов проводилось на физических моделях, сопряженных с низкочастотными программно-аппаратными комплексами моделирования режимов.

Лабораторный стенд позволил проверить и устойчивость комплекса к обрыву связи между компонентами. По результатам испытаний определено, что на ЛЭП с относительно короткими кабельными вставками функция ОМП по параметрам аварийного режима не обладает удовлетворительной

точностью для автономного разграничения КЗ на кабельной и воздушной части ЛЭП. Зону неопределенности в алгоритме нужно увеличить на величину максимальной зарегистрированной погрешности – 0,2 км. В зоне неопределенности система АПК должна основывать решение на информации других источников. Тем не менее, данный метод применим в качестве вспомогательного с целью достоверизации и контроля сигнала разрешения АПВ в составе системы АПК.

Подключение терминала активного волнового ОМП не должно создавать помехи имеющимся устройствам передачи для организации каналов передачи команд РЗА и каналов высокочастотных защит. Проведены опыты по проверке влияния разработанного разделительного фильтра на процесс зондирования. Записаны рефлектограммы на физической модели поврежденной ЛЭП с подключением фильтра и без фильтра (рисунок 6.40).

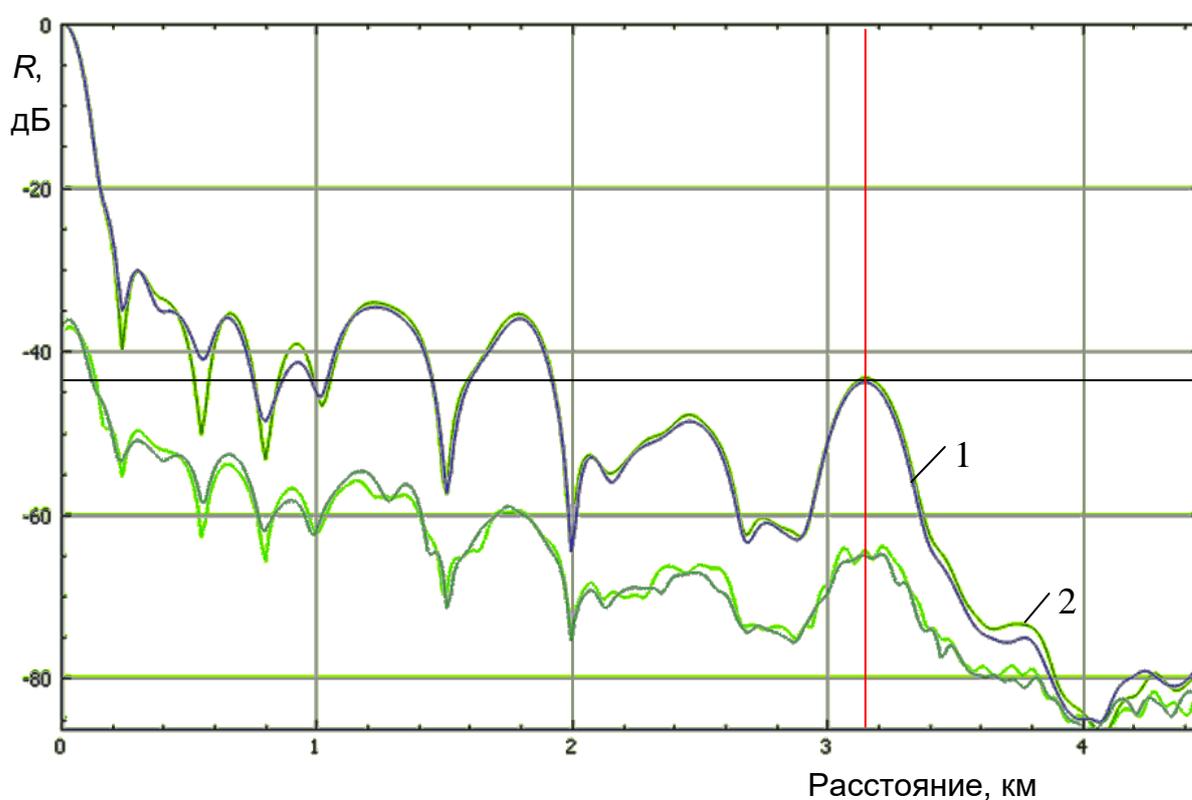


Рисунок 6.40 – Рефлектограмма при включении с разделительным фильтром (кривая 1) и без фильтра (кривая 2)

Снижение чувствительности активного волнового ОМП составило 0,309 дБ, что можно считать незначительным, а терминал «ВОЛНА2» успешно определяет повреждения в одной точке ЛЭП.

6.5.2 Подтверждение эксплуатационных характеристик системы АПВК результатами эксплуатационных испытаний

Опытный образец АПВК состоит из трех шкафов для установки в общеподстанционных пунктах управления (ОПУ) и открытых распределительных устройствах (ОРУ) в соответствии с распределением функций в таблице 6.9.

Таблица 6.9 – Функциональность шкафов системы АПВК

Месторасположение	ОПУ ПС 110 кВ Костино	ОПУ ПС 220 кВ Горенки	ОРУ ПС Горенки
Функциональность	Терминал АУВ2 Терминал ВОЛНА2 Элементы оптической связи с ПС 220 кВ Горенки Элементы синхронизации с глобальным временем GPS/ГЛОНАСС	Терминал АУВ2 Терминал ВОЛНА2 Терминал ДТ Элементы оптической связи с ПС 110 кВ Костино Элементы синхронизации с глобальным временем GPS/ГЛОНАСС Элементы радиосвязи со шкафом на ОРУ	Терминал ДТ Элементы радиосвязи с ОПУ ПС 220 кВ Горенки Элементы синхронизации с глобальным временем GPS/ГЛОНАСС.

Терминалы АУВ2 содержат функции АПВ и ОМП по ПАР, сопряженные с функциями диагностики кабельных линий и ВЛ, реализуют связь с другими компонентами системы.

На рисунке 6.41 показано размещение терминалов ДТ, АУВ2 и ВОЛНА2 в шкафу на ПС 220 кВ Горенки.

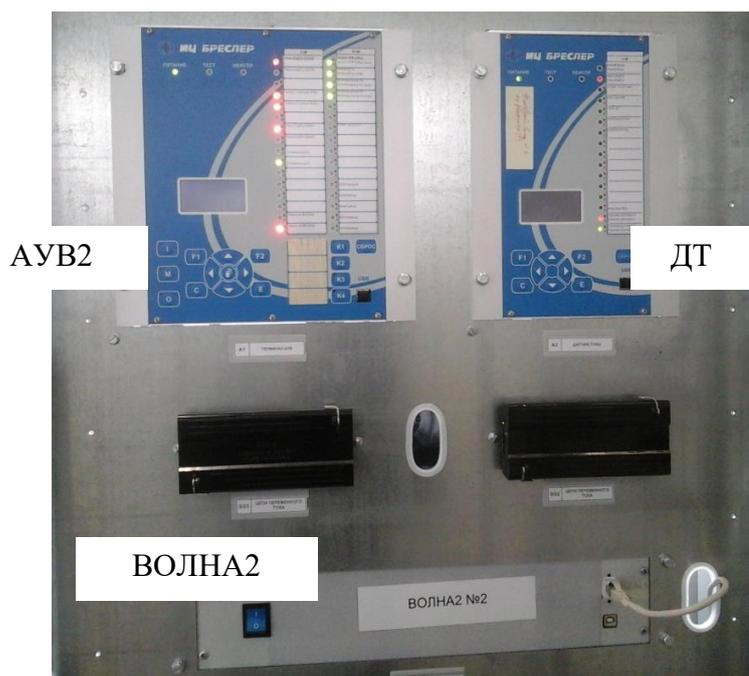


Рисунок 6.41 – Размещение терминалов ДТ, АУВ2 и ВОЛНА2 установленных в шкафу на ПС 220 кВ Горенки

В месте кабельно-воздушного перехода на ОРУ ПС 220 кВ Горенки были установлены накладные трансформаторы тока, их вторичные токи были заведены в шкаф АПВК наружной установки. В связи с тем, что не было возможности установить трансформаторы тока (ТТ) непосредственно поверх основной изоляции кабеля на вводе в переходную муфту, накладные ТТ установлены поверх экрана. При этом для компенсации токов, проходящих во время КЗ по экранной оболочке в каждой фазе на заземляющем спуске установлен дополнительный ТТ.

Проведены натурные испытания отдельных функций и всего комплекса АПВК на отключенной ЛЭП в режиме имитации бестоковой

паузы цикла АПВ в условиях неустранившегося КЗ. На рисунках 6.42 и 6.43 показана операция установки переносного заземления для имитации КЗ.



Рисунок 6.42 – Установка закоротки на ЛЭП с помощью переносного заземления.

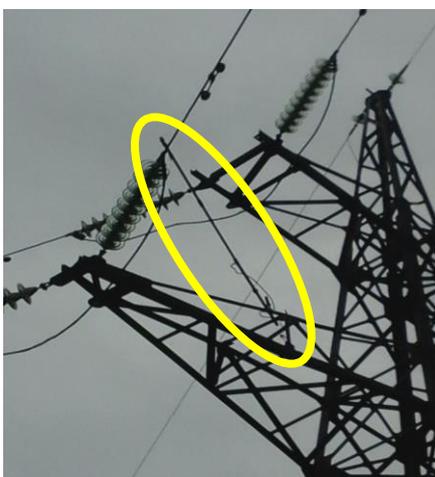


Рисунок 6.43 – Установленная закоротка для испытания

Результаты испытаний комплекса АПВК, представленные в таблице 6.10, демонстрируют формирование сигнала запрета АПВ и высокую точность ОМП во всех случаях КЗ, что недостижимо другими современными средствами.

Полный комплекс испытаний системы АПВК обсуждается в [353], а ниже представлены некоторые важные примеры применения

пространственно-временных методов обработки, представленных в работе.

Таблица 6.10 – Результаты испытаний АПВК при искусственных КЗ на отключенной КВЛ

№	Вид повреждения	x_f , км	Сигнал запрета АПВ	$ \hat{x}_f - x_f $, км
1	Однофазное КЗ, фаза «А»	21,0	+	0,2-0,6
2	Однофазное КЗ, фаза «С»	21,0	+	
3	Междуфазное КЗ, фазы «В» и «С»	21,0	+	
4	Двухфазное КЗ на землю, фазы «В» и «С»	21,0	+	
5	Трехфазное КЗ без земли	21,0	+	
6	Однофазное КЗ, фаза «А»	16,1	+	0,1-0,5
7	Однофазное КЗ, фаза «В»	16,4	+	0,3
8	Однофазное КЗ, фаза «С»	16,4	+	
9	Однофазное КЗ, фаза «А»	11,4	+	0,1-0,8
10	Однофазное КЗ, фаза «С»	5,3	+	0,1-0,7

На рисунках 6.44 и 6.45 представлены рефлектограммы опыта №9, зафиксированные со стороны ПС Горенки и ПС Костино соответственно.

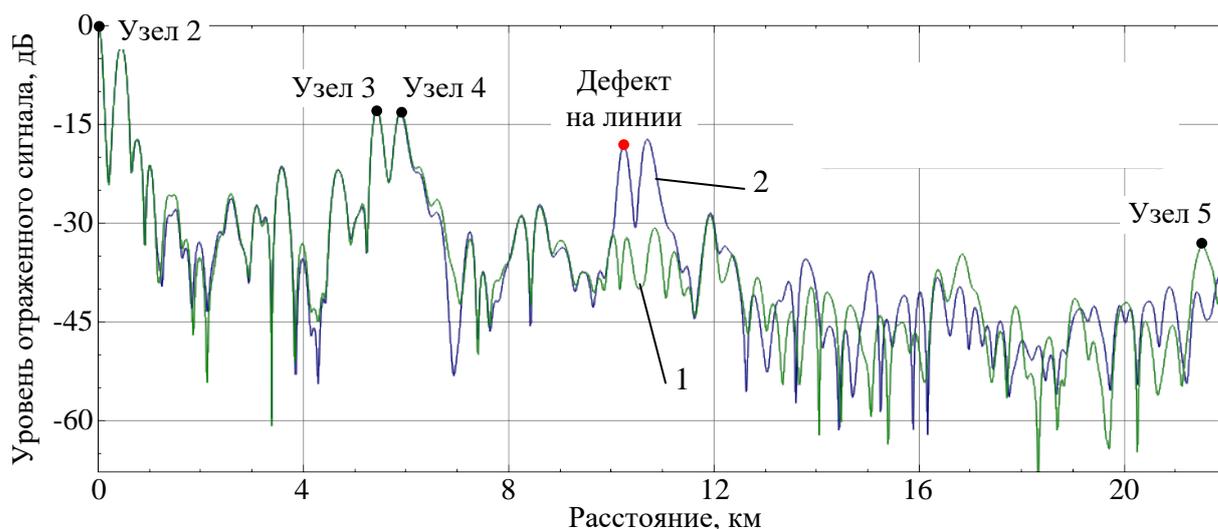


Рисунок 6.44 – Рефлектограммы неповрежденной (кривая 1) и поврежденной (кривая 2) ЛЭП – опоры №58 со стороны ПС Балашиха, однофазное КЗ ф.«А», замер со стороны ПС Горенки

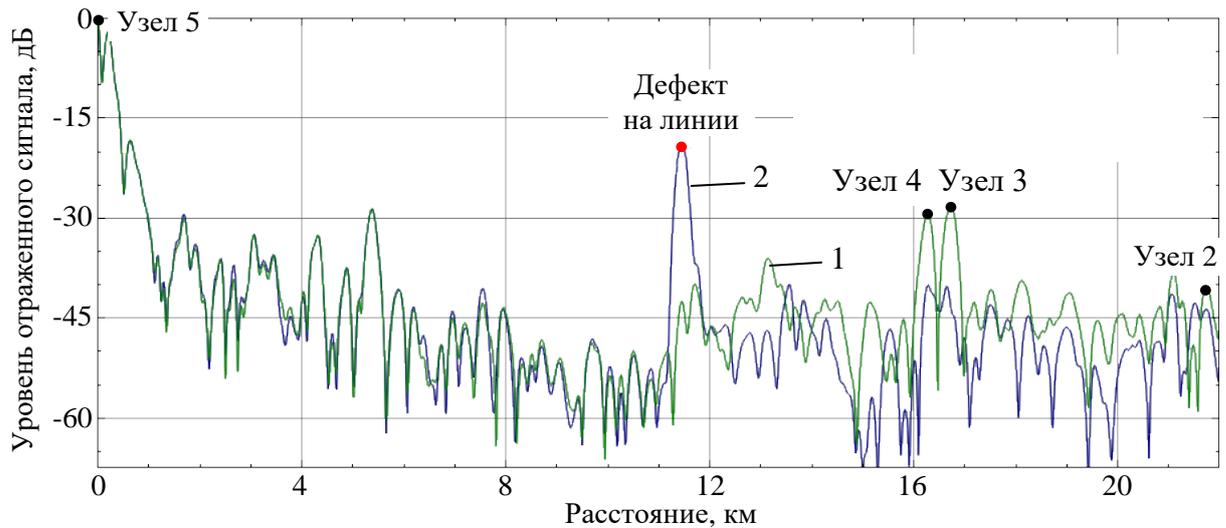


Рисунок 6.45 – Рефлектограммы неповрежденной (кривая 1) и поврежденной (кривая 2) ЛЭП – опора №58, однофазное КЗ ф.«А», замер со стороны ПС Костино

По рисунку 6.44 видно, что повреждение проявляется в точке 10,2 км в виде значительного отклонения аварийной рефлектограммы относительно рефлектограммы неповрежденной линии. Эта точка соответствует месту установки переносного заземления. То же прослеживается на другой стороне на расстоянии 11,5 км. Модифицированная дефектограмма при КЗ обнаруживает значительную чувствительность, что видно на рисунке 6.46.

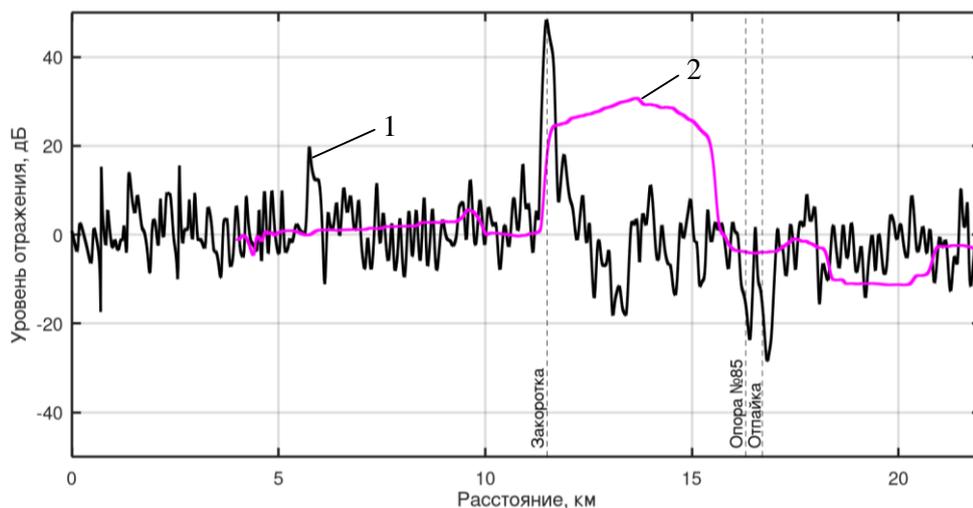


Рисунок 6.46 – Дефектограмма (кривая 1) и модифицированная дефектограмма (кривая 2) ЛЭП – опора №58, однофазное КЗ ф.«А», замер со стороны ПС Костино

Для формирования волнового процесса, который давал бы возможность проверить функционирование пассивного волнового ОМП, использовалась волна напряжения при опробовании КВЛ. Соответственно, источником волнового процесса в линии в проведенных опытах являлся выключатель на одном из ее концов.

Затем линия была выведена из работы, и путем поочередной коммутации выключателей проверялись срабатывание волновых органов и точность расчета расстояния. В таких условиях результат расчета всегда должен попадать на тот конец, со стороны которого была коммутация. Результаты опытов с метками времени и погрешностями ОМП приведены в таблице 6.11. Максимальная погрешность ОМП в опытах не превысила 0,1 км.

Таблица 6.11 – Результаты испытаний функции волнового ОМП

№	Моделируемый опыт	Место коммутации выключателя	Разность меток времени по концам линии, мкс	Результат ОМП, км	Погрешность ОМП, км
1	КЗ вблизи ПС Горенки	ПС Горенки	-69,5	0,1	0,1
2	КЗ вблизи ПС Костино	ПС Костино	71,5	21,2	0,1
3	КЗ вблизи ПС Горенки	ПС Горенки	-70,5	0	0

6.6 Выводы

1. Проведено исследование локационных методов и показано, что зондирование ЛЭП по контуру фаза-земля приводит к возникновению составляющих в различных модальных каналах. Тем не менее, этот метод позволяет контролировать наличие повреждений в проводах разных фаз ЛЭП. При этом возникает потребность в повышении чувствительности измерительных органов активного волнового ОМП. Предложено расположение зондирующего устройства и алгоритм его действия на

секционированной ЛЭП с реклоузерами.

2. Разработана имитационная модель ЛЭП для целей локационного ОМП и диагностики с учетом локального эффекта, оказываемого конструкциями опоры. Исследование показало, что сложный высокочастотный локационный сигнал претерпевает значимые изменения при распространении по сегментам линии электропередачи. Величина затухания амплитуды импульса, измеряемая локационным устройством и соотносимая с точками вдоль линии с использованием рефлектограммы, зависит от числа накопленных преломлений и отражений.

3. Дефектограмма на основе разности аварийной и предаварийной рефлектограмм содержит множество случайных выбросов и не в полной мере использует имеющуюся априорную информацию для распознавания. Предложено преобразование, обладающее высокой эффективностью разделения нормальных и аварийных режимов. Внедрение новой схемы измерительного органа позволило понизить его уставку и повысить чувствительность на 10 дБ и более, что подтверждено расчетом на данных натурных испытаний при повреждениях ЛЭП 35-110 кВ. Результаты разработок легли в основу макетного образца терминала TOP 300 ВОЛНА, установленного в опытно-промышленную эксплуатацию на воздушной линии электропередачи.

4. Метод активного зондирования позволяет отслеживать не только повреждения ЛЭП, но и образование ГИО на проводах. В условиях обледенения наблюдается повышенное затухание локационного сигнала. Предложен метод обработки данных, зарегистрированных при активном зондировании, для дистанционной оценки толщины стенки ГИО. Преимущество решения заключается в его эффективности по всей протяженности линии, без пропусков, характерных для датчиков на физическом принципе (например, тензометрическом). Метод определяет гололедную обстановку с точностью до участка и показывает высокую

эффективность на данных опытной эксплуатации на ЛЭП 35 кВ.

5. Разработан и установлен в опытно-промышленную эксплуатацию образец комплекса АПВК для контролируемого АПВ КВЛ с объединением дифференциального принципа, принципов ОМП по ПАР, активного и пассивного волнового ОМП. Благодаря использованию методов пространственно-временной обработки информации, проявляющейся в алгоритмах интеграции, верификации и передачи информации, достигается высокая устойчивость комплекса к обрывам каналов связи и различным отказам оборудования. Техническое решение выполнено по заказу ПАО «МОЭСК» и не имеет аналогов как в Российской Федерации, так и за рубежом. Испытания при вводе комплекса в промышленную эксплуатацию показали уникальную способность выявлять устойчивые повреждения в бестоковую паузу и определять расстояние с погрешностью менее 0,8 км.

Заключение

Основные научные и практические результаты, полученные в диссертации, заключаются в следующем:

1. Предложены методы пространственно-временной обработки сигналов в задачах защиты и автоматики ЛЭП. Обоснована процедура формирования многомерного пространства из замеров, произведенных на различных участках электрической сети с накоплением во времени. Представлен инструментарий синтеза и технического совершенствования алгоритмов распознавания режимов ЛЭП. Предложены методы определения ценности измерений в виде характеристик распознаваемости режимных ситуаций.

2. Представлены гибкие обучаемые структуры измерительных органов РЗА в многомерном пространстве параметров токов и напряжений, а также методы комбинирования пространств меньшей размерности, в том числе плоскостей, с достижением наивысшей распознающей способности. В расчетах на моделях получено повышение чувствительности защиты к переходному сопротивлению до двух раз. Этот подход универсален по отношению к решаемой задаче распознавания режима объекта РЗА и служит основой для синтеза новых устройств защиты и автоматики ЛЭП.

3. Показано, что в условиях распространения цифровых технологий в комплексах ЛЭП и электрических подстанций возникает необходимость достоверизации входной информации устройств РЗА. Разработаны технические решения верификации и восполнения информации в условиях избыточной информационной базы и инфраструктуры энергообъекта. Методы открывают возможности для дальнейшей оптимизации инфраструктуры цифровой подстанции и повышения надежности алгоритмов РЗА за счет рационального дублирования измерений. В отдельных схемах экспертная оценка показывает экономию измерительных преобразователей

до 50%.

4. Методы пространственно-временной обработки применены в задаче дистанционного ОМП ЛЭП по параметрам аварийного режима. Определены характеристики распознаваемости для типовой конфигурации ЛЭП. Предложена и обоснована инженерная методика определения максимальной разрешающей способности одностороннего дистанционного локатора повреждений.

5. Исследована практика применения средств дистанционного ОМП ЛЭП по параметрам аварийного режима, выделены задачи измерения для повышения точности оценки расстояния. На основе принципов пространственно-временной обработки информации разработаны алгоритмы пуска и измерения, повышающие точность ОМП. Результаты работы реализованы в серийно выпускаемых устройствах TOP 300 ЛОК 51X, а методики настройки вошли в эксплуатационную документацию устройств. В натурных испытаниях алгоритм показал снижение погрешности более двух раз по сравнению с другими устройствами без соответствующей адаптации.

6. Предложены каскадные модели участка электрической сети, выполняющие пространственно-временное преобразование информации для синтеза распознающих модулей РЗА ЛЭП. Показана эффективность использования низкочастотных моделей в задачах АЛАР, дистанционной защиты и ОМП. Погрешность моделирования напряжения составила менее 0,2% при задержке расчета не более 2 мс. Эти методы предоставляют возможности для оптимизации алгоритмов и аппаратного обеспечения устройства РЗА.

7. Разработаны и аналитически обоснованы алгоритмы выявления качаний и асинхронного режима в энергосистеме. Определены подходы к временному анализу поведения многофазных фильтров и чувствительности соответствующих измерительных органов. Разработана функция АЛАР для серийного устройства TOP 300 ПА 5XX. Для повышения эффективности

обучения предложены и использованы оптимизированные подходы к моделированию энергосистем в нестационарных режимах. Функциональные испытания измерительных органов терминала были ускорены в 10 и более раз.

8. Предложен метод волновых рядов для ОМП ЛЭП как результат пространственно-временной обработки дискретной информации переходного процесса в токах и напряжениях. Впервые реализован принцип нарастающей информационной базы волнового ОМП ЛЭП. Предложен вариант автоматического построения модели обработки измерений во временной области в соответствии со структурой электрической сети. Метод волновых рядов создает основу для разработки практичных односторонних алгоритмов волнового ОМП ЛЭП. При многостороннем наблюдении процессов повреждения предложенный метод обнаруживает высокую устойчивость к шумам и ошибкам синхронизации времени при измерении. На осциллограммах натурных испытаний погрешность одностороннего расчета оказалась сопоставима с двухсторонними методами ОМП по параметрам аварийного режима и составила от 0,2 до 0,8% от длины линии.

9. Исследованы пространственно-временные зависимости, характерные для переходных процессов при коммутации в месте повреждения ЛЭП. Результаты аналитического исследования подтверждены натурными испытаниями. На основе частотно-временных функций процессов разработаны алгоритмы пуска и выявления фронта для модуля пассивного волнового ОМП серийных терминалов ТОР 300 ЛОК 550 и ТОР 300 ВОМП, а также перспективного терминала ТОР 300 ВОЛНА, обеспечивающие высокую избирательность и надежность функционирования. Предложенные методы открывают возможности создания и дальнейшего совершенствования адаптивных измерительных органов волновых устройств. Снижение запаздывания их срабатывания может достигать 13 мкс.

10. При натурных испытаниях активного локационного ОМП выявлен

ряд факторов, значимых для функционирования и точности показаний этих устройств. Предложены методы, позволяющие повысить устойчивость ОМП к помехам до 10 дБ. Выявлена возможность дистанционного оценивания гололедной обстановки на участках воздушной ЛЭП с использованием информации подстанционного устройства. Результаты разработок легли в основу макетного образца терминала TOP 300 ВОЛНА. Опытнo-промышленная эксплуатация устройства в период с 2013 по 2023 годы подтвердила целесообразность принятых технических решений и высокую точность ОМП ЛЭП.

11. Разработан и установлен в опытнo-промышленную эксплуатацию образец устройства АПВК для контролируемого АПВ кабельно-воздушных ЛЭП с объединением принципов ОМП по параметрам аварийного режима, активного и пассивного волнового ОМП. Испытания при вводе комплекса в промышленную эксплуатацию показали способность выявлять устойчивые повреждения в бестоковую паузу и определять расстояние с погрешностью менее 0,8 км.

Список сокращений

АЛАР	автоматика ликвидации асинхронного режима
АПВ	автоматическое повторное включение
АЧХ	амплитудно-частотная характеристика
БК	блокировка при качаниях
БКЗ	блокировка при коротких замыканиях
ВЛ	воздушная линия
ВЧ	высокочастотный
ВЧЗ	высокочастотный заградитель
ГИО	гололедно-изморозевые отложения
ДЗЛ	дифференциальная защиты линии
ЕИМ	единая информационная модель
ИМО	имитационная модель объекта
ИО	измерительный орган
ИП	измерительный преобразователь
ИТН	измерительный трансформатор напряжения
ИТТ	измерительный трансформатор тока
КА	коммутационный аппарат
КЗ	короткое замыкание
КВЛ	кабельно-воздушная линия
КС	конденсатор связи
ЛЭП	линия электропередачи
МЭК	Международная электротехническая комиссия
ОМП	определение места повреждения
ПАР	параметры аварийного режима
ПОМ	промежуточный отбор мощности
ПС	подстанция
РЗА	релейная защита и автоматика

ТН	трансформатор напряжения
ТТ	трансформатор тока
ФАС	Фильтр аварийных составляющих
ФОС	фильтр ортогональных составляющих
ФСС	фильтр симметричных составляющих
ФЧХ	фазочастотная характеристика
ЭДС	электродвижущая сила
ЭС	энергосистема
ЭЦК	электрический центр качаний
ЭЭС	электроэнергетическая система
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
MMS	Manufacturing Message Specification
SV	Sampled Values

Литература

1. СТО 56947007-29.240.10.299-2020. Цифровая подстанция. Методические указания по проектированию ЦПС. Стандарт организации. Дата введения: 26.02.2020. – ПАО «ФСК ЕЭС». – 2020.
2. СТО 56947007-29.120.70.241-2017. Технические требования к микропроцессорным устройствам РЗА. Стандарт организации. Дата введения: 28.02.2017. – ПАО «ФСК ЕЭС». – 2017.
3. Михайлов, В. В. Микропроцессорные гибкие системы релейной защиты / В. В. Михайлов, Е. В. Кириевский, Е. М. Ульяницкий [и др.]. – Москва : Энергоатомиздат, 1988. – 240 с.
4. Ефремов, В. А. Адаптивный дистанционный принцип защиты и автоматики линий электропередачи и средства его реализации : специальность 05.14.02 «Электрические станции и электроэнергетические системы» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Ефремов Валерий Александрович. – Санкт-Петербург, 1993. – 25 с.
5. Фабрикант, В. Л. Дистанционная защита / В. Л. Фабрикант. – Москва : Высшая школа, 1978. – 215 с.
6. Мисриханов, М. Ш. Уточнение определения мест повреждения на ВЛ при использовании фазных составляющих / М. Ш. Мисриханов, В. А. Попов, Н. Н. Якимчук, Р. В. Медов // Электрические станции. – 2001. – № 3. – С. 36-40.
7. Мисриханов, М. Ш. Методическая погрешность при определении места повреждения на ВЛ от неучета пофазного различия ее параметров / М. Ш. Мисриханов, В. А. Попов, Р. В. Медов, Д. Ю. Костюнин // Электрические станции. – 2002. – №11. – С. 47-50.
8. Pereira, C. E. M. Fault location in transmission lines using one-

terminal postfault voltage data / C. E. M. Pereira, L. C. Zanetta // IEEE Transactions on power delivery. – 2004. – Vol. 19 – № 2. – P. 570-575.

9. Galijasevic, Z. Fault location using voltage measurements / Z. Galijasevic, A. Abur // IEEE Transactions on power delivery. – 2002. – № 2. – Vol. 17. – P. 441-445.

10. El-Arroudi, K. The performance specification of transmission line protection using a knowledge-based approach / K. El-Arroudi, G. Joos, D. T. McGillis, R. Brearley // IEEE Transactions on power delivery. – 2004. – Vol. 19. – № 3. – P. 1049-1056.

11. Djuric, M. B. Distance protection and fault location utilizing only phase current phasors / M. B. Djuric, Z. M. Radojevic, V. V. Terzija // IEEE Transactions on power delivery. – 1998. – Vol. 13. – № 4. – P. 1020-1026.

12. Подшивалин, А. Н. Определение места повреждения высоковольтных воздушных линий электропередачи при повреждениях в измерительных цепях напряжения / А. Л. Куликов, П. А. Колобанов, А. А. Лоскутов, А. Н. Подшивалин // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2024. – № 2. – С. 94-99.

13. Шевцов, М. В. Разработка и исследование алгоритмов адаптивного функционирования защиты от всех видов коротких замыканий на основе дистанционного принципа : специальность 05.14.02 «Электрические станции и электроэнергетические системы» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Шевцов Максим Викторович. – Москва, 2003. – 145 с.

14. Brahma, S. M. Fault location scheme for a multi-terminal transmission line using synchronized voltage measurements / S. M. Brahma // IEEE Transactions on power delivery. – Vol. 20. – № 2. – 2005. – P. 1325-1331.

15. Brahma, S. M. Fault location on a transmission line using synchronized voltage measurements / S. M. Brahma, A. A. Girgis // IEEE Transactions on power delivery. – Vol. 19. – № 4. – 2004. – P. 1619-1622.

16. Шнеерсон, Э. М. Современные методы фиксации поврежденных фаз и удаленности коротких замыканий / Э. М. Шнеерсон, Т. Либих // Релейная защита и автоматика энергосистем 2004 : Сб. докладов XVI научно-технической конференции. – 2004. – С. 40-42.

17. Патент № 2775149 С1 Российская Федерация, МПК G01R 31/08. Способ определения места повреждения линии электропередачи с использованием ее модели при двустороннем наблюдении : № 2021132977 : заявл. 12.11.2021 : опубл. 28.06.2022 / М. В. Убасева, В. С. Петров, В. И. Антонов, В. А. Наумов ; заявитель Общество с ограниченной ответственностью научно-производственное предприятие «ЭКРА».

18. Патент № 2492493 С2 Российская Федерация, МПК G01R 31/08. Способ определения места повреждения многопроводной электрической сети при двустороннем наблюдении : № 2011147688/28 : заявл. 23.11.2011 : опубл. 10.09.2013 / Ю. Я. Лямец, Ю. В. Романов, П. И. Воронов, Г. Н. Исмуков ; заявитель Общество с ограниченной ответственностью «Исследовательский центр «Бреслер».

19. Ефремов, В. А. «DISAN/LOCATOR»: средства достижения точности определения повреждения электропередачи / В. А. Ефремов, Ю. Я. Лямец, Н. В. Подшивалин // Релейная защита и автоматика энергосистем 2004 : Сб. докладов XVI научно-технической конференции. – 2004. – С. 76-79.

20. Ермаков, К. И. Организация каналов связи в системах определения места повреждения / К. И. Ермаков, А. Г. Балясников // Релейная защита и автоматизация. – 2014. – № 02(15). – С. 50-53.

21. Патент № 2542331 С1 Российская Федерация, МПК H02H 3/28, G01R 31/08. Способ определения места замыкания линии электропередачи при двустороннем наблюдении : № 2013144358/07 : заявл. 02.10.2013 : опубл. 20.02.2015 / Ю. Я. Лямец, П. И. Воронов, А. А. Белянин ; заявитель Общество с ограниченной ответственностью «Исследовательский центр

«Бреслер».

22. Куликов, А. Л. Применение алгоритмов поиска при определении мест повреждений на воздушных линиях электропередачи по параметрам аварийного режима / А. Л. Куликов, П. В. Илюшин, А. А. Лоскутов // Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2023. – № 5. – С. 40-59.

23. Убасева, М. В. Целевые функции определителей места повреждения при двусторонних несинхронных измерениях / М. В. Убасева, В. С. Петров, В. И. Антонов, А. А. Ильин // Электрические станции. – 2023. – № 6(1103). – С. 47-50.

24. Novosel, D. Unsynchronised two-terminal fault location estimation / D. Novosel, D.G. Hart, E. Udren, J. Garitty // IEEE Transactions on power delivery. – 1996. – Vol. 11. – № 1. – P. 130-138.

25. Saha, M. M. Fault location on power networks / M. M. Saha, J. Izykowski, E. Rosolowski // Power Systems. – 2010. – Vol. 48. – P. 1-422.

26. Ren, J. An accurate synchrophasor based fault location method for emerging distribution systems / J. Ren, S. S. Venkata, E. Sortomme // IEEE Transactions on power delivery. – 2014. – Vol. 29. – № 1. – P. 297-298.

27. Патент № 2801438 С1 Российская Федерация, МПК G01R 31/08. Способ определения места короткого замыкания на воздушной линии электропередачи при несинхронизированных замерах с двух ее концов : № 2023108354 : заявл. 04.04.2023 : опубл. 08.08.2023 / А. Л. Куликов, П. В. Илюшин, А. А. Севостьянов, А. А. Лоскутов ; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева".

28. Мокеев, А. В. Повышение надежности и эффективности работы энергосистем на основе технологии синхронизированных векторных измерений / А. В. Мокеев // Электричество. – 2018. – № 3. – С. 4-10.

29. Мокеев, А. В. Совершенствование дистанционной защиты на

основе СВИ для работы в условиях переходных процессов с учетом влияния дуги / А. В. Мокеев, С. А. Пискунов // Релейная защита и автоматизация. – 2022. – № 4(49). – С. 22-29.

30. Патент № 2813258 С1 Российская Федерация, МПК H02H 3/48. Способ выявления и ликвидации асинхронного режима на объектах электроэнергетической системы : № 2023106987 : заявл. 22.03.2023 : опубл. 08.02.2024 / В. Г. Наровлянский ; заявитель Акционерное общество «Всероссийский научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт релестроения с опытным производством».

31. Tealane, M. Online detection of out-of-step condition using PMU-determined system impedances / M. Tealane, J. Kilter, M. Popov, O. Bagleybter, D. Klaar // IEEE Transactions on power delivery. – 2022. – Vol. 10. – № 1. – P. 14807-14818.

32. СТО 34.01-4.1-001-2016. Устройства определения места повреждения воздушных линий электропередачи. Общие технические требования. Дата введения: 07.04.2016. – ПАО «Россети». – 2016.

33. Лямец, Ю. Я. Программный комплекс анализа аварийных процессов и определения места повреждения линий электропередачи / Ю. Я. Лямец, В. А. Ильин, Н. В. Подшивалин // Электричество. – 1996. – № 12. – С. 2-7.

34. Efremov, V. A. Program set for the analysis of disturbances and fault location in transmission lines DISAN/LOCATOR / V. A. Efremov, Y. Y. Liamets, N. V. Podshivalin, V. A. Iljin, G. S. Nudelman // CIGRE SC 34 Colloquium and Meeting, Session Papers. – Florence, Italy. – 1999. – Report 205. – P. 1-7.

35. Ефремов, В. А. Настройка программного модуля определителя места повреждения на линиях с проводящими тросами / В. А. Ефремов, Ю. Я. Лямец, Н. В. Подшивалин // Релейная защита, низковольтная аппаратура управления, регулируемый электропривод : Материалы научно-технической конференции, посвящённой 40-летию ОАО «ВНИИР». – Чебоксары :

Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, 2001. – С. 57-59.

36. Ефремов, В. А. Анализ погрешностей алгоритмов определения места повреждения по одно-и двухстороннему наблюдению линий электропередачи в программном комплексе DISAN/LOCATOR / В. А. Ефремов, Ю. Я. Лямец, Н. В. Подшивалин // Электротехника и энергетика Поволжья на рубеже тысячелетий : Тезисы докладов Поволжской научно-практической конференции. – Чебоксары : Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, 2001. – С. 21-24.

37. Ефремов, В. А. Новые алгоритмы компенсации погрешностей определения места повреждения в программном комплексе «DISAN/LOCATOR» / В. А. Ефремов, Ю. Я. Лямец, Н. В. Подшивалин // Релейная защита и автоматика энергосистем 2002 : Сб. докладов XV научно-технической конференции. – Москва : СРЗА ЦДУ ЕЭС России, 2002. – С. 170-172.

38. Аржанников, Е. А. Определение места короткого замыкания на высоковольтных линиях электропередачи / Е. А. Аржанников, В. Ю. Лукоянов, М. Ш. Мисриханов. – Москва : Энергоатомиздат, 2003. – 271 с.

39. Ефремов, В. А. Модели линий электропередачи и точность определения места повреждения / В. А. Ефремов // Сб. докладов научно-практической конференции, посвященной 70-летию ОРЗАУМ института «Энергосетьпроект» : Актуальные проблемы релейной защиты. – Москва : Издательство НЦ ЭНАС, 2001. – С. 224-225.

40. Подшивалин, А. Н. Одностороннее определение места повреждения высоковольтных воздушных линий электропередачи с учётом реактивной составляющей сопротивления повреждения / А. Л. Куликов, П. А. Колобанов, А. Н. Подшивалин, А. Р. Жафяров // Электрические станции. – 2024. – № 2 (1111). – С. 50-59.

41. Ying-Hong, L. A new PMU-based fault detection/location technique

for transmission lines with consideration of arcing fault discrimination – part I: theory and algorithms / Lin Ying-Hong, Liu Chih-Wen, Chen Ching-Shan // IEEE Transactions on power delivery. – 2004. – Vol. 19. – № 4. – P. 1587-1593.

42. Ying-Hong, L. A new PMU-based fault detection/location technique for transmission lines with consideration of arcing fault discrimination – part II: performance evaluation / Lin Ying-Hong, Liu Chih-Wen, Chen Ching-Shan // IEEE Transactions on power delivery. – 2004. – Vol. 19. – № 4. – P. 1594-1601.

43. Лямец, Ю. Я. Задачи и методы распознавания замыканий в электрических системах / Ю. Я. Лямец, Г. С. Нудельман, А. Н. Подшивалин, J. Zakonjsek // Известия вузов. Электромеханика. – 2002. – № 6. – С. 65.

44. Liamets, Y. Informational tasks of relay protection / Y. Liamets, A. Podchivaline, A. Chevelev, G. Nudelman, J. Zakonjsek // CIGRE SC B5 Colloquium and Meeting. – Sydney, Australia. – 2003. – Report 213.

45. Лямец, Ю. Я. Обучаемое реле и иерархия обучающих режимов / Ю. Я. Лямец, А. Н. Подшивалин // Труды Академии электротехнических наук Чувашской республики. – 2003. – № 3. – С. 37-40.

46. Ермаков, К. И. Моделирование в задачах определения места повреждения на линиях электропередач / К. И. Ермаков // Вестник Чувашского университета. – 2011. – № 3. – С. 67-70.

47. Liamets, Y. Algorithmic models and virtual relays in distance protection implementation / Y. Liamets, S. Ivanov, A. Chevelev, D. Eremeev, G. Nudelman, J. Zakonjsek // Proc. 8th Int. Conf. Developments in Power System Protection. – Amsterdam, Netherlands. – 2004. – P. 441-444.

48. Sheng, Y. Decision tree-based methodology for high impedance fault detection / Y. Sheng, S. M. Rovnyak // IEEE Transactions on power delivery. – 2004. – Vol. 19. – № 2. – P. 533-536.

49. Campoccia, A. A new and efficacy methodology for fault diagnosis in MV distribution networks / A. Campoccia, M. Di Lorenzo, S. Mangione // Proc. 13th Int. Conf. Power System Protection. – Bled, Slovenia, 2002. – P. 109-114.

50. Jiang, J.-A. An adaptive PMU based fault detection/location technique for transmission lines. Pt. I. Theory and algorithms / J.-A. Jiang, J.-Z. Yang, Y.-H. Lin, Ch.-W. Liu, J.-Ch. Ma // IEEE Transactions on power delivery. – 2000. – Vol. 15. – № 2. – P. 486-493.

51. Segui, T. Fundamental basis for distance relaying with parametrical estimation / T. Segui, P. Bertrand, M. Guillot, P. Hanchin, P. Bastard // IEEE Transactions on power delivery. – 2001. – № 1. – Vol. 16. – P. 99-104.

52. Chen, C.-S. A new adaptive PMU based protection scheme for transposed/untransposed parallel transmission lines / C.-S. Chen, C.-W. Liu, J.-A. Jiang // IEEE Transactions on power delivery. – 2002. – Vol. 17. – № 2. – P. 395-404.

53. Lee, S.-J. An intelligent and efficient fault location and diagnosis scheme for radial distribution systems / S.-J. Lee, M.-S. Choi, S.-H. Kang, B.-G. Jin, D.-S. Lee, B.-S. Ahn, N.-S. Yoon, H.-Y. Kim, S.-B. Wee // IEEE Transactions on power delivery. – 2004. – Vol. 19. – № 2. – P. 524-532.

54. Jiang, J.-A. A new protection scheme for fault detection, direction discrimination, classification, and location in transmission lines / J.-A. Jiang, C.-S. Chen, C.-W. Liu // IEEE Transactions on power delivery. – 2003. – Vol. 18. – № 1. – P. 34-42.

55. Павлов, А. О. Информационные аспекты распознавания коротких замыканий в линиях электропередачи в приложении к защите дальнего резервирования : специальность 05.14.02 «Электрические станции и электроэнергетические системы» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Павлов Александр Олегович. – Чебоксары, 2002. – 203 с.

56. Ефимов, Е. Б. Оптимальная фазовая селекция коротких замыканий в линиях электропередачи : специальность 05.14.02 «Электрические станции и электроэнергетические системы» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Ефимов Евгений

Борисович. – Чебоксары, 2002. – 180 с.

57. Liamets, Y. Virtual relays: theory and applications to distance protection / Y. Liamets, A. Pavlov, S. Ivanov, G. Nudelman // CIGRE SC B5 Colloquium and Meeting. – Sydney, Australia. – 2003. – Report 308.

58. Evrenosoglu, C. Y. Travelling wave based fault location for teed circuits / C. Y. Evrenosoglu, A. Abur // IEEE Transactions on power delivery. – 2005. – Vol. 20. – № 2. – P. 1115-1121.

59. Osman, A. H. Transmission line distance relaying using on-line trained neural networks / A. H. Osman, T. Abdelazim, O. P. Malik // IEEE Transactions on power delivery. – 2005. – Vol. 20. – № 2. – P. 1257-1264.

60. Liamets, Y. Relay protection with extreme fault identification / Y. Liamets, E. Efimov, V. Efremov, V. Iljin, A. Pavlov, N. Podshivalin, G. Nudelman, J. Zakonjsek // Proc. 12th Int. Conf. Power System Protection. – Bled, Slovenia, 2000. – P. 1-12.

61. Лямец, Ю. Я. Функциональные задачи универсального реле / Ю. Я. Лямец, А. Н. Подшивалин // Труды Академии электротехнических наук Чувашской республики. – 2004. – № 3. – С. 36-37.

62. Подшивалин, А. Н. Основы методологии расчета уставок микропроцессорной релейной защиты / А. Н. Подшивалин, И. С. Подшивалина // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2010. – № 3. – С. 69-74.

63. Podshivalin, A. The concept of settings calculation for modern protection / Y. Liamets, A. Podshivalin, I. Podshivalina // PAC World 2011 Conference. – Dublin, Ireland. – 2011. – Paper OP051. – P. 1-8.

64. Лямец, Ю. Я. Эффекты многомерности в релейной защите / Ю. Я. Лямец, Г. С. Нудельман, И. С. Подшивалина, Ю. В. Романов // Электричество. – 2011. – № 9. – С. 48-54.

65. Шарыгин, М. В. Синтез универсального многомерного измерительно-пускового органа релейной защиты / М. В. Шарыгин, А. Л.

Куликов, А. А. Петров // Электричество. – 2020. – № 1. – С. 4-11.

66. Лямец, Ю. Я. Эквивалентирование имитационных моделей электрических сетей / Ю. Я. Лямец, П. И. Воронов, М. В. Мартынов // Электричество. – 2015. – № 5. – С. 22а-29.

67. Подшивалин, А. Н. Обучение релейной защиты: закономерности и методология / Ю. Я. Лямец, Д. В. Кержаев, С. В. Иванов, А. Н. Подшивалин, Я. Закончек, Г. С. Нудельман // Труды Академии электротехнических наук Чувашской Республики. – 2007. – № 2. – С. 54-78.

68. Лямец, Ю. Я. Обучаемая релейная защита. Ч.1. Методы условных отображений / Ю. Я. Лямец, М. В. Мартынов, Г. С. Нудельман [и др.] // Электричество. – 2012. – № 2. – С. 15-19.

69. Нагай, И. В. Методика оценки информационных признаков, характеризующих режимы работы электрических сетей, по критерию распознаваемости релейной защитой / И. В. Нагай, В. И. Нагай, С. В. Сарры, С. Ю. Березкина // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2017. – № 4(196). – С. 27-33.

70. Еремеев, Д. Г. Нейронная сеть как модуль релейной защиты / Д. Г. Еремеев, А. М. Маслов // Релейная защита, низковольтная аппаратура управления, регулируемый электропривод : Материалы научно-технической конференции, посвященной 40-летию ОАО «ВНИИР». – Чебоксары : Чуваш. ун-т, 2001. – С. 85-88.

71. Маслов, А. М. Фазовый селектор на основе искусственных нейронных сетей / А. М. Маслов, Д. Г. Еремеев, С. В. Иванов // Релейная защита, низковольтная аппаратура управления, регулируемый электропривод : Материалы научно-технической конференции, посвященной 40-летию ОАО «ВНИИР». – Чебоксары : Чуваш. ун-т, 2001. – С. 88-90.

72. Yu, D. C. Correction of current transformer distorted secondary currents due to saturation using artificial neural networks / D. C. Yu, J. C. Cummins, Z. Wang, H.-J. Yoon, L. A. Kojovic // IEEE Transactions on power

delivery. – 2001. – Vol. 16. – № 2. – P. 189-194.

73. De Suoza, J. C. S. Fault location in electrical power systems using intelligent systems techniques / J. C. S. De Suoza, M. A. P. Rodrigues, M. T. Schilling, F. M. B. Do Cuotto // IEEE Transactions on power delivery. – 2001. – Vol. 16. – № 1. – P. 59-67.

74. Oleskovicz, M. A complete scheme for fault detection, classification and location in transmission lines using neural networks / M. Oleskovicz, R. K. Aggarwal, D. V. Cowry // Proc. 7th Int. Conf. Developments in Power System Protection. – Amsterdam, Netherlands, 2001. – P. 67-73.

75. Venkatesan, R. A real-time hardware fault detector using an artificial neural network protection / B. Balamurugan // IEEE Transactions on power delivery. – 2001. – Vol. 16. – № 1. – P. 75-82.

76. Sidhu, T. S. A comprehensive analysis of an artificial neural-network-based fault direction discriminator / T. S. Sidhu, L. Mital, M. S. Sachdev // IEEE Transactions on power delivery. – 2004. – Vol. 19. – № 3. – P. 1042-1048.

77. Marusic, A. Application of fuzzy logic to digital fault location algorithm / A. Marusic, M. Cavlovic // Proc. 11th Int. Conf. Power System Protection. – Slovenia, Bled, 1998. – P. 71-76.

78. Ruz, F. Fuzzy logic applied to high impedance fault detection in compensated neutral grounded M.V. power systems / F. Ruz, D. A. B. Quesada, A. Quijano // Proc. 12th Int. Conf. Power System Protection. – Slovenia, Bled, 2000. – P. 105-109.

79. Sadeh, J. Fuzzy logic-based fault locating algorithm for power transmission lines / J. Sadeh, A. M. Ranjbar, R. Feuillet // Proc. 12th Int. Conf. Power System Protection. – Slovenia, Bled, 2000. – P. 155-160.

80. Нагай, В. Проблемы и технические решения резервирования / В. Нагай, И. Нагай // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2015. – № 4(31). – С. 100-104.

81. Нагай, В.И. Релейная защита ответвительных подстанций

электрических сетей. — Москва : Энергоатомиздат, 2002. — 312 с.

82. Berman, A. Analysis of faulted power systems by phase coordinates / A. Berman, W. Xu // IEEE Transactions on power delivery. — 1998. — № 2. — Vol. 13. — P. 587-595.

83. Fernandes, A. B. Phase-domain transmission line models considering frequency-dependent transformation matrices / A. B. Fernandes, W. L. A. Neves // IEEE Transactions on power delivery. — 2004. — Vol. 19. — № 2. — P. 708-714.

84. Висящев, А. Н. Оценка величины и характера переходного сопротивления в месте короткого замыкания на воздушных линиях электропередачи высокого напряжения / А. Н. Висящев, Э. Р. Пленков, Д. С. Федосов // Интеллектуальная электротехника. — 2023. — № 2(22). — С. 78-89.

85. Лямец, Ю. Я. Эквивалентирование многопроводных систем при замыканиях и обрывах части проводов / Ю. Я. Лямец, Д. Г. Еремеев, Г. С. Нудельман // Электричество. — 2003. — № 11. — С. 17-27.

86. 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. 46-48.

87. Fazio, G. Variable-window algorithm for ultra-high-speed distance protection / G. Fazio, V. Laupoli, F. Muzi, G. Sacerdoti // IEEE Transactions on power delivery. — 2003. — Vol. 18. — № 2. — С. 412-419.

88. Sidhu, T. S. An adaptive distance relay and its performance comparison with a fixed data window distance relay / T. S. Sidhu, D. S. Ghotra, M. S. Sachdev // IEEE Transactions on power delivery. — 2002. — Vol. 17. — № 3. — P. 691-697.

89. Sachdev, M. S. A variable window distance relay — design, implementation and testing / M. S. Sachdev, T. S. Sidhu, D. S. Ghotra // CIGRE SC B5 Colloquium and Meeting. — Sydney, Australia. — 2003. — Report 301.

90. Osman, A. H. Transmission line distance protection based on wavelet

transform / A. H. Osman, O. P. Malik // IEEE Transactions on power delivery. – 2004. – Vol. 19. – № 2. – P. 515-523.

91. Youssef, O. A. S. Combined fuzzy-logic wavelet-based fault classification technique for power system relaying / O. A. S. Youssef // IEEE Transactions on power delivery. – 2004. – Vol. 19. – № 2. – P. 582-589.

92. Liang, F. Transmission line distance protection using wavelet transform algorithm / F. Liang, B. Jeyasurya // IEEE Transactions on power delivery. – 2004. – Vol. 19. – № 2. – P. 545-553.

93. Еремеев, Д. Г. Информационные задачи релейной защиты / Д. Г. Еремеев, С. В. Иванов, Ю. Я. Лямец [и др.] // Труды Академии электротехнических наук Чувашской Республики. – 2003. – № 2. – С. 79-100.

94. Лямец, Ю. Я. Универсальное реле / Ю. Я. Лямец, А. Н. Подшивалин // Труды Академии электротехнических наук Чувашской Республики. – 2003. – № 3. – С. 35-37.

95. Liamets, Y. Universal relay / Y. Liamets, A. Podchivaline, G. Nudelman, J. Zakonjsek // Proc. 14th Int. Conf. Power System Protection. – Bled, Slovenia, 2004. – P. 1-12.

96. Подшивалин, А. Н. Реле с нарастающей информационной базой / Ю. Я. Лямец, А. Н. Подшивалин // Труды Академии электротехнических наук Чувашской Республики. – 2003. – № 3. – С. 46-47.

97. Любарский, Д.Р. Микропроцессорные индикаторы расстояния типа «МИР» / Д. Р. Любарский, К. М. Платов // Релейная защита и автоматика энергосистем 2002 : Сб. докладов XV научно-технической конференции. – Москва : СРЗА ЦДУ ЕЭС России, 2002. – С. 101-103.

98. Кузина, Р. В. Устройство для определения места повреждения на линиях электропередачи 110-750 кВ ИМФ-ЗР / Р. В. Кузина, В. Ю. Лукоянов, М. Ю. Панов // Релейная защита и автоматика энергосистем 2002 : Сб. докладов XV научно-технической конференции. – Москва : СРЗА ЦДУ ЕЭС России, 2002. – С. 58-60.

99. Podshivalin, A. Modern fault location technique for the utility / A. Podshivalin, I. Klimatova, E. Terentyev // Proc. Int. Conf. IEEE Bucharest PowerTech. – Bucharest, Romania. – 2009. – Report 293. – P. 1-6.

100. Антонов, В. И. Адаптивный структурный анализ входных сигналов цифровой релейной защиты и автоматики / В. И. Антонов, В. А. Наумов, А. И. Фомин, А. В. Солдатов // Электротехника. – 2015. – № 7. – С. 28-35.

101. Ефремов, В. А. Определение параметров нулевой последовательности линии электропередачи с параллельными линиями и проводящими тросами / В. А. Ефремов, А. В. Ефремов, Н. В. Подшивалин // Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем России : Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова, Чебоксары, 18–21 апреля 2023 года / Сборник докладов VII международной научно-практической конференции. – Чебоксары, 2023. – С. 262-271.

102. Аржанников, Е. А. Статистическое оценивание показаний приборов определения места КЗ / Е. А. Аржанников, А. М. Чухин // Релейная защита и автоматика энергосистем 2002 : Сб. докладов XV научно-технической конференции. – Москва : СРЗА ЦДУ ЕЭС России, 2002. – С. 147-148.

103. Bockarjova, M. Statistical algorithms for fault location on power transmission lines / M. Bockarjova, A. Sauhats, G. Andersson // Proc. Int. Conf. IEEE St-Petersburg PowerTech. – Saint-Petersburg, Russia. – 2005. – Report 401.

104. Лямец, Ю. Я. Интервальная локация повреждений линии электропередачи / Ю. Я. Лямец, А. Н. Подшивалин, Г. Н. Исмуков // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем : Материалы IX Всероссийской научно-технической конференции. – Чебоксары: Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, 2011. – С. 251-253.

105. Подшивалин, А. Н. Об информационной теории релейной

защиты / Ю. Я. Лямец, Г. С. Нудельман, А. Н. Подшивалин, Я. В. Закончек // Известия Академии электротехнических наук РФ. – 2009. – № 1. – С. 32-44.

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

107. Федосеев, А. М. Релейная защита электроэнергетических систем : Учеб. для вузов / А. М. Федосеев, М. А. Федосеев. – 2-е изд. – Москва : Энергоатомиздат, 1992. – 528 с.

108. Федотов, А. И. Диагностические признаки обнаружения однофазных замыканий на землю в сетях 6-10 кВ / А. И. Федотов, Г. В. Вагапов, А. Г. Латипов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2011. – № 7-8. – С. 83-87.

109. Dommel, H. W. High speed relaying using travelling wave transient analysis / H. W. Dommel, J. M. Michels // Proc. IEEE Power Eng. Soc. Winter Meet. – New York, USA. – 1978. – P. 1-7.

110. Попов, И. Н. Релейная защита, основанная на контроле переходных процессов / И. Н. Попов, В. Ф. Лачугин, Г. В. Соколова. – Москва : Энергоатомиздат, 1986. – 248 с.

111. Лачугин, В. Ф. Релейная защита объектов электроэнергетических систем, основанная на использовании волновых методов : специальность 05.14.02 «Электрические станции и электроэнергетические системы» : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Лачугин Владимир Федорович. – Иваново, 2016. – 22 с.

112. Куликов, А. Л. Дистанционное определение мест повреждений ЛЭП методами активного зондирования : монография / А. Л. Куликов ; А. Л. Куликов. – Москва : Энергоатомиздат, 2006.

113. Шалыт, Г. М. Определение мест повреждения линий электропередачи импульсными методами / Г. М. Шалыт. – Москва : Энергия, 1968. – 215 с.

114. Касимов, В. А. Метод локационного мониторинга гололедообразования и повреждений на воздушных линиях электропередачи и программно-аппаратные комплексы для его реализации : специальность 05.11.13 «Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий» : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Касимов Василь Амирович, 2019. – 395 с.

115. 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(60). – С. 88-94.

116. Федоров, А. О. Особенности построения модели электрической сети аварийного режима в одностороннем методе волнового определения места повреждения линии электропередачи / А. О. Федоров, В. С. Петров, В. А. Христофоров // Вестник Чувашияского университета. – 2021. – № 3. – С. 133-139.

117. Патент № 2767287 С1 Российская Федерация, МПК G01R 31/08. Способ одностороннего волнового определения места повреждения линии электропередачи : № 2021117705 : заявл. 18.06.2021 : опубл. 17.03.2022 / А. О. Федоров, В. С. Петров, В. И. Антонов, В. А. Наумов.

118. Куликов, А. Л. Определение мест повреждений ЛЭП 6-35 кВ методами активного зондирования / А. Л. Куликов, М. Ш. Мисриханов, А. А. Петрухин. – Москва : Энергоатомиздат, 2009. – 164 с.

119. Практическая реализация системы пофидерной диагностики однофазных замыканий на землю с распределенным сбором данных в режиме реального времени / А. И. Федотов, Р. Ш. Басыров, Г. В. Вагапов, А. Ф. Абдуллазянов // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2021. – Т. 64, № 2. – С. 78-85.

120. Лямец, Ю. Я. Теория уставок / Ю.Я.Лямец, Е. Б. Ефимов, Г. С.

Нудельман // Сб. докладов научно-практической конференции, посвященной 70-летию ОРЗАУМ института «Энергосетьпроект» : Актуальные проблемы релейной защиты. – Москва : Издательство НЦ ЭНАС, 2001. – С. 56-58.

121. Лямец, Ю. Я. Теория уставок / Ю. Я. Лямец, Е. Б. Ефимов, Г. С. Нудельман // Тез. докладов НПК «Актуальные проблемы релейной защиты». – Москва : ВНИИЭ, 2001. – С. 106-111.

122. Лямец, Ю. Я. Теория уставок / Ю. Я. Лямец, Е. Б. Ефимов, Г. С. Нудельман // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем : Материалы IV Всероссийской научно-технической конференции, Чебоксары, 07–09 июня 2001 года. – Чебоксары : Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, 2001. – С. 169-172.

123. Подшивалин, А. Н. Направления инновационного развития РЗА / Г. С. Нудельман, А. Н. Подшивалин // Релейщик. – 2015. – № 3. – С. 18-22.

124. Podshivalin, A. N. Testing of a digital substation based on IEC 61850 / A. N. Podshivalin, I. N. Nikolaev, N. M. Aleksandrov // CIGRE SC B5 Colloquium and Meeting. – Belo-Horizonte, Brazil. – 2013. – Report 120. – P. 1-7.

125. Лямец, Ю. Я. Объектные характеристики дистанционной защиты / Ю. Я. Лямец, Н. В. Николаева, А. О. Павлов // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике : Материалы II всероссийской научно-технической конференции. – Чебоксары : Изд-во ЧГУ, 1998. – С. 136-140.

126. Чернобровов, Н. В. Релейная защита энергетических систем : Учеб. пособие для техникумов / Н. В. Чернобровов, В. А. Семенов. – Москва : Энергоатомиздат, 1998. – 800 с.

127. Лямец, Ю. Я. Информационные задачи релейной защиты / Ю. Я. Лямец, А. Н. Подшивалин, А. В. Шевелев, Г. С. Нудельман, Я. Законьшек // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем : Материалы V Всероссийской научно-технической конференции. – Чебоксары : Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, 2003. – С. 280-283.

128. Лямец, Ю. Я. Информационные свойства дистанционного контроля / Ю. Я. Лямец, А. Н. Подшивалин, А. В. Шевелев, Г. С. Нудельман, Я. Законьшек // Релейная защита, низковольтная аппаратура управления, регулируемый электропривод : Материалы научно-технической конференции, посвященной 40-летию ОАО «ВНИИР». – Чебоксары : Чуваш. ун-т, 2001. – С. 43-48.

129. Лямец, Ю. Я. Информационный принцип систематизации задач релейной защиты / Ю. Я. Лямец, А. Н. Подшивалин // Труды Академии электротехнических наук Чувашской Республики. – 2004. – № 3. – С. 33-35.

130. Liamets, Y. The phenomena of uncertainty and ambiguity in identification of faults in electrical systems / Y. Liamets, S. Ivanov, G. Nudelman // CIGRE SC B5 Colloquium and Meeting. – Calgary, Canada. – 2005. – Paper 313

131. Патент № 2247456 С2 Российская Федерация, МПК H02H 3/40, H02H 3/38. Способ релейной защиты энергообъекта : № 2002121184/28 : заявл. 05.08.2002 : опубл. 27.02.2005 / Ю. Я. Лямец, Е. Б. Ефимов, Г. С. Нудельман ; заявитель ООО Исследовательский центр «Бреслер».

132. Патент № 2248077 С2 Российская Федерация, МПК H02H 3/40. Способ дистанционной защиты линии электропередачи : № 2002126894/28 : заявл. 07.10.2002 : опубл. 10.03.2005 / Ю. Я. Лямец, Г. С. Нудельман, Е. Б. Ефимов, В. А. Ефремов ; заявитель Исследовательский центр «Бреслер».

133. Лямец, Ю. Я. Релейная защита с экстремальным распознаванием аварийных ситуаций / Ю. Я. Лямец, Г. С. Нудельман, А. О. Павлов, Е. Б. Ефимов, Я. Законьшек // Релейная защита и автоматика энергосистем 2000 : Сб. докладов XV научно-технической конференции. – Москва : СРЗА ЦДУ ЕЭС России, 2000. – С. 208-212.

134. Лямец, Ю. Я. Распознавание альтернативных ситуаций / Ю. Я. Лямец, Е. Б. Ефимов, Г. С. Нудельман, Я. Законьшек // Тез. докладов XXII сессии семинара «Диагностика энергооборудования». – Новочеркасск :

ЮрГТУ, 2000. – С. 49-50.

135. Лямец, Ю. Я. Экстремальная распознаваемость аварийных ситуаций в электрических системах / Ю. Я. Лямец, Е. Б. Ефимов, А. О. Павлов, Г. С. Нудельман, Я. Законьшек // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике : Материалы III всероссийской научно-технической конференции. – Чебоксары : Изд-во Чуваш. ун-та, 2000. – С. 275-278.

136. Ильин, В. В. Режимы и уставки / В. В. Ильин, Ю. Я. Лямец, Г. С. Нудельман // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем : Материалы V Всероссийской научно-технической конференции. – Чебоксары : Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, 2003. – С. 262-265.

137. Лямец, Ю. Я. Распознаваемость повреждений электропередачи. Ч. 1. Распознаваемость места повреждения / Ю. Я. Лямец, Г. С. Нудельман, А. О. Павлов, Е. Б. Ефимов, Я. Законьшек // Электричество. – 2001. – № 2. – С. 16-23.

138. Лямец, Ю. Я. Распознаваемость повреждений электропередачи. Ч. 2. Распознаваемость места повреждения / Ю. Я. Лямец, Г. С. Нудельман, А. О. Павлов, Е. Б. Ефимов, Я. Законьшек // Электричество. – 2001. – № 3. – С. 16-24.

139. Лямец, Ю. Я. Распознаваемость повреждений электропередачи. Ч. 3. Распознаваемость места повреждения / Ю. Я. Лямец, Г. С. Нудельман, А. О. Павлов, Е. Б. Ефимов, Я. Законьшек // Электричество. – 2001. – № 12. – С. 9-22.

140. Ефимов, Е. Б. Экстремальная распознаваемость вида металлического замыкания на землю по токам прямой и обратной последовательности / Е. Б. Ефимов, Ю. Я. Лямец // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике : Материалы III всероссийской научно-технической конференции. – Чебоксары : Изд-во

Чуваш. ун-та, 2000. – С. 315-317.

141. Лямец, Ю. Я. Информационная ценность текущего наблюдения электрической системы / Ю. Я. Лямец, Е. Б. Ефимов, А. В. Шевелев // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем : Материалы IV Всероссийской научно-технической конференции. – Чебоксары : Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, 2001. – С. 172-174.

142. Лямец, Ю. Я. Принцип информационного совершенства релейной защиты / Ю. Я. Лямец, Е. Б. Ефимов, Г. С. Нудельман, Я. Законьшек // Электротехника. – 2001. – № 2. – С. 30-34.

143. Лямец, Ю. Я. Распознающая способность защиты с минимальной информационной базой / Ю. Я. Лямец, А. Н. Подшивалин, Н. А. Иванов // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике : Материалы IV всероссийской научно-технической конференции. – Чебоксары : Изд-во Чуваш. ун-та, 2002. – С. 304-306.

144. Лямец, Ю. Я. Информационное совершенство релейной защиты / Ю. Я. Лямец, Е. Б. Ефимов, Г. С. Нудельман, Я. Законьшек // Релейная защита, низковольтная аппаратура управления, регулируемый электропривод : Материалы научно-технической конференции, посвященной 40-летию ОАО «ВНИИР». – Чебоксары : Чуваш. ун-т, 2001. – С. 30-33.

145. Лямец, Ю. Я. Информационное совершенство фазовой селекции / Ю. Я. Лямец, Д. Г. Еремеев, Е. Б. Ефимов, Г. С. Нудельман // Релейная защита, низковольтная аппаратура управления, регулируемый электропривод : Материалы научно-технической конференции, посвященной 40-летию ОАО «ВНИИР». – Чебоксары : Чуваш. ун-т, 2001. – С. 54-56.

146. Подшивалин, А. Н. Современный взгляд на ОМП по параметрам аварийного режима / А. Н. Подшивалин, Г. Н. Исмуков // Релейщик. – 2014. – № 3(19) – С. 21-25.

147. Podshivalin, A. Transmission line status monitoring for successful

auto-reclosing / A. Podshivalin, G. Ismukov // CIGRE SC B5 Colloquium and Meeting. – Auckland, New Zealand. – 2017. – Report 311. – P. 1-6.

148. Подшивалин, А. Н. Алгоритмическое моделирование в базе мгновенных величин в условиях асинхронного режима / А.Н. Подшивалин, М. В. Михайлов // Труды Академии электротехнических наук Чувашской Республики. – 2018. – № 1. – С. 41-44.

149. Еремеев, Д. Г. Синтез уставочной характеристики релейной защиты в алгоритмическом пространстве / Д. Г. Еремеев, Е. Б. Ефимов // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике : Материалы III всероссийской научно-технической конференции. – Чебоксары : Изд-во Чуваш. ун-та, 2000. – С. 234-235.

150. Лямец, Ю. Я. Информационный анализ энергообъектов и способов их защиты / Ю. Я. Лямец, С. В. Иванов, А. Н. Подшивалин, Г. С. Нудельман, J. Zakonjšek // Релейная защита и автоматика энергосистем 2002 : Сб. докладов XV научно-технической конференции. – Москва : СРЗА ЦДУ ЕЭС России, 2002. – С. 93-97.

151. Подшивалин, А. Н. Метод информационного анализа и его приложение к определению места повреждения и дистанционной защите линий электропередачи : специальность 05.14.02 «Электрические станции и электроэнергетические системы» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Подшивалин Андрей Николаевич. – Чебоксары, 2005. – 181 с.

152. Илюшин, П. В. Комплексный подход к моделированию устройств РЗ и ПА, расчету уставок и анализу правильности их работы / П. В. Илюшин, Я. М. Королев, А. В. Симонов // Релейная защита и автоматизация. – 2017. – № 3(28). – С. 13-19.

153. Podshivalin, A. Electrical power system conditions hierarchy in methodology of relay protection education / Y. Liamets, D. Kerzhaev, S. Ivanov, A. Podshivalin, J. Zakonjšek, G. Nudelman // CIGRE SC B5 Colloquium and

Meeting. – Madrid, Spain. – 2007. – Report 311. – P. 1-8.

154. Лямец, Ю. Я. Граничные режимы в методике обучения релейной защиты. Часть 1. Граничные условия и обучающие процедуры / Ю. Я. Лямец, Д. В. Кержаев, Г. С. Нудельман, Ю. В. Романов // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2009. – № 4. – С. 24-30.

155. Куликов, А. Л. Принципы автоматического расчёта параметров срабатывания релейной защиты относительной селективности для распределительных сетей / А. Л. Куликов, М. В. Шарыгин, П. В. Илюшин // Электрические станции. – 2019. – № 3(1052). – С. 45-55.

156. Подшивалин А.Н. Нейронная сеть как инструмент построения уставочных характеристик для релейной защиты / А. Н. Подшивалин, Ю. В. Романов // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем : Материалы V всероссийской научно-технической конференции. – Чебоксары : Изд-во Чуваш. ун-та, 2003. – С. 308-310.

157. Лямец, Ю. Я. Универсальное реле / Ю. Я. Лямец, А. Н. Подшивалин, Г. С. Нудельман, J. Zakonjsek // Релейная защита и автоматика энергосистем 2004 : Сб. докладов XVI научно-технической конференции. – Москва, 2004. – С. 63-68.

158. Патент № 2404499 С1 Российская Федерация, МПК H02H 3/40. Способ релейной защиты энергообъекта : № 2009140854/07 : заявл. 03.11.2009 : опубл. 20.11.2010 / Ю. Я. Лямец, С. В. Иванов, А. Н. Подшивалин, Ю. В. Романов, И. С. Подшивалина ; заявитель Общество с ограниченной ответственностью «Исследовательский центр «Бреслер».

159. Патент № 2316872 С1 Российская Федерация, МПК H02H 3/40. Способ релейной защиты энергообъекта : № 2006130612/09 : заявл. 24.08.2006 : опубл. 10.02.2008 / Ю. Я. Лямец, С. В. Иванов, А. Н. Подшивалин ; заявитель Общество с ограниченной ответственностью «Исследовательский центр «Бреслер».

160. Патент № 2450402 С2 Российская Федерация, МПК H02H 3/40.

Способ релейной защиты энергообъекта : № 2010105455/07 : заявл. 15.02.2010 : опубл. 10.05.2012 / Ю. Я. Лямец, И. С. Подшивалина, С. В. Иванов, А. Н. Подшивалин, Ю. В. Романов ; заявитель Общество с ограниченной ответственностью «Исследовательский центр «Бреслер».

161. Патент № 2505826 С2 Российская Федерация, МПК G01R 31/08. Способ определения места и характера повреждения многопроводной электрической сети : № 2012101106/28 : заявл. 11.01.2012 : опубл. 27.01.2014 / Ю. Я. Лямец, Ю. В. Романов, П. И. Воронов, Г. Н. Исмуков ; заявитель Общество с ограниченной ответственностью «Исследовательский центр «Бреслер».

162. Положение ПАО «Россети» «О единой технической политике в электросетевом комплексе». Приложение 1 к решению Совета директоров ПАО «Россети» от 29.04.2022. – ПАО «Россети». – 2022. – URL : https://www.rosseti.ru/upload/docs/tehpolitika_29.04.2022.pdf (дата обращения: 21.04.2024).

163. СТО 56947007-29.240.30.010-2008. Схемы принципиальные электрические распределительных устройств подстанций 35-750 кВ. Типовые решения. Дата введения: 20.12.2007. – ОАО «ФСК ЕЭС». – 2008.

164. Информатика: Учебник / Под ред. проф. Н. В. Макаровой – Москва: Финансы и статистика, 2006. – 768 с.

165. ГОСТ Р 54835-2011/IEC/TR 61850-1:2003. Сети и системы связи на подстанциях. Ч. 1. Введение и обзор. – Москва : Стандартиформ, 2012. – 45 с.

166. ABB Review. Special report IEC 61850. – URL : https://library.e.abb.com/public/a56430e1e7c06fdcf12577a00043ab8b/3BSE063756_en_ABB_Review_Special_Report_IEC_61850.pdf (дата обращения 14.11.2023).

167. Орлов, Л. Л. Опыт проектирования и внедрения систем РЗА и АСУ ТП на базе технологии МЭК 61850 / Л. Л. Орлов, Д. В. Егоров //

Электрические станции. – 2009. – № 11. – С. 56-58.

168. Татаринцев, В. Опыт внедрения РЗА с использованием протоколов МЭК 61850 на объектах филиала ПАО «Россети» - МЭС Урала / В. Татаринцев, В. Завершинский // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2023. – № S3(30). – С. 13-19.

169. IEC 61850-9-2(2020) Communication networks and systems for power utility automation – Part 9-2 : Specific communication service mapping (SCSM) – Sampled values over ISO/IEC 8802-3. – Geneva, Switzerland, 2020. – 38 p.

170. IEC 61850-8-1(2020) Communication networks and systems for power utility automation - Part 8-1 : Specific communication service mapping (SCSM) - Mappings to MMS (ISO 9506-1 and ISO 9506-2) and to ISO/IEC 8802-3. – Geneva, Switzerland : IEC Central Office, 2020. – 458 p.

171. IEC 61850-9-2 LE : Implementation Guideline for Digital Interface to Instrument Transformers Using IEC 61850-9-2. – URL : https://iec61850.ucaiug.org/Implementation%20Guidelines/DigIF_spec_9-2LE_R2-1_040707-CB.pdf (дата обращения: 21.04.2024).

172. СТО 56947007-29.240.10.302-2020. Типовые технические требования к организации и производительности технологических ЛВС в АСУ ТП ПС ЕНЭС. Стандарт организации. Дата введения 26.02.2020. – ПАО «ФСК ЕЭС». – 2020.

173. СТО 56947007-29.240.10.256-2018. Технические требования к аппаратно-программным средствам и электротехническому оборудованию ЦПС. Стандарт организации. Дата введения: 21.09.2018. – ПАО «ФСК ЕЭС». – 2018.

174. Правила устройства электроустановок : официальные тексты по состоянию на 01.03.2007 г. : [сборник] / [ред. А. М. Меламед]. – Изд. 7-е. – Москва : Изд-во НЦ ЭНАС, 2007. – 549 с.

175. Abur, A. Power system state estimation: theory and implementation /

A. Abur, A. Gomez-Exposito. – New York: Marcel Dekker. – 2004.

176. Kekatos, V. Joint power system state estimation and breaker status identification / V. Kekatos, G. B. Giannakis // IEEE North American Power Symposium (NAPS). – Urbana-Champaign, IL. – 2012. – P.1-6.

177. Monticelli, A. Electric power system state estimation / A. Monticelli // Proc. IEEE. – 2000. – Vol. 88. – № 2. – P. 262-282.

178. Singh, H. Network topology determination using least absolute value state estimation / H. Singh, F. L. Alvarado // IEEE Trans. Power Syst. – 1995. – Vol. 10. – № 3. – P. 1159-1165.

179. Stojnic, M. On the reconstruction of block-sparse signals with an optimal number of measurements / M. Stojnic, F. Parvaresh, B. Hassibi // IEEE Trans. Signal Process. – Vol. 57. – № 8. – P. 3075-3085.

180. Mili, L. A robust estimation method for topology error identification / L. Mili, G. Steeno, F. Dobraca, D. French // IEEE Trans. Power Syst. – 1999. – Vol. 14. – № 4. – P. 1469-1476.

181. Lourenco, E. M. Bayesian-based hypothesis testing for topology error identification in generalized state estimation / E. M. Lourenco, A. S. Costa, K. A. Clements // IEEE Trans. Power Syst. – 2004. – Vol. 19. – № 2. – P. 1206-1215.

182. Гамм, А. З. Обнаружение грубых ошибок телеизмерений в электроэнергетических системах / А. З. Гамм, И. Н. Колосок. – Новосибирск : Наука, 2000. – 149 с.

183. Гамм, А. З. Наблюдаемость электроэнергетических систем / А. З. Гамм, И. И. Голуб. – Москва : Наука, 1990. – 220 с.

184. Кочнева, Е. С. Достоверизация измерений электрической энергии методами теории оценивания состояния : специальность 05.14.02 «Электрические станции и электроэнергетические системы» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Кочнева Елена Сергеевна. – Екатеринбург, 2015. – 22 с.

185. Кочнева, Е. С. Модификация метода контрольных уравнений для

достоверизации измерений электроэнергии / Е. С. Кочнева, А. В. Паздерин // Электрические станции. – 2016. – № 10(1023). – С. 20-25.

186. Бучинский, Е. А. Проверка достоверности синхронизированных векторных измерений методом контрольных уравнений / Е. А. Бучинский // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2014. – № 2(85). – С. 176-182.

187. Гамм, А. З. Робастные методы оценивания состояния электроэнергетических систем и их реализация с помощью генетических алгоритмов / А. З. Гамм, И. Н. Колосок, Р. А. Заика // Электричество. – 2005. – № 10. – С. 2-8.

188. Глазунова, А. М. Метод обнаружения систематических ошибок в измерениях электроэнергетической системы / А. М. Глазунова // Электричество. – 2015. – №5. – С.15-22

189. Гамм, А. З. Развитие алгоритмов оценивания состояния электроэнергетической системы / А. З. Гамм, А. М. Глазунова, Ю. А. Гришин [и др.] // Электричество. – 2009. – № 6. – С. 2-9.

190. Гаджиев, М. Г. Идентификация линейной модели электроэнергетической системы в пространстве состояний / М. Г. Гаджиев, Е. А. Гулевич, Ю. В. Шаров // Электричество. – 2017. – № 7. – С. 30-38.

191. Шарыгин, М. В. Применение дифференциально-логической защиты для повышения надежности распределительных сетей / А. А. Севостьянов, В. Ю. Вуколов, А. А. Петров // Релейная защита и автоматизация. – 2021. – № 4(45). – С. 10-15.

192. Куликов, А. Л. Дифференциально-логический принцип релейной защиты сетей электроснабжения / А. Л. Куликов, М. В. Шарыгин // Электрические станции. – 2018. – № 3(1040). – С. 37-46.

193. Патент № 2648249 С1 Российская Федерация, МПК H02H 3/26. Способ дифференциальной защиты участка электрической сети : № 2017126328 : заявл. 21.07.2017 : опубл. 23.03.2018 / А. Л. Куликов, А. А.

Колесников, В. Ю. Вуколов, М. В. Шарыгин.

194. Подшивалин, А. Н. Диагностика измерительных каналов РЗА на основе избыточных измерений / А. Н. Подшивалин, Н. М. Александров // Энергетика глазами молодежи : научные труды IV международной научно-технической конференции. Том. 1. – Новочеркасск : Лик. – 2013. – С. 151-154.

195. Подшивалин, А. Н. Верификация измерений на подстанции для целей РЗА: распознаваемость режимов ошибки / А. Н. Подшивалин, Н. М. Александров // Международная научно-техническая конференция «Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем» : Сб. докладов. – Сочи, 2015. – С. 1-5.

196. Подшивалин, А. Н. Дублирующие измерения на цифровой подстанции / А. Н. Подшивалин, Б. Л. Андреев // Сборник докладов научно-технической конференции молодых специалистов «РЕЛАВЭКСПО-2019». – С. 175-179.

197. ГОСТ Р 70451-2022. Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы. Подстанции электрические. Автоматизированные системы управления технологическими процессами. Условия создания. Нормы и требования : Национальный стандарт Российской Федерации : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 29 декабря 2022 г. N 1689-ст : введен впервые : дата введения 2023-02-01 / разработан Акционерным обществом «Научно-технический центр Федеральной сетевой компании Единой энергетической системы» (АО «НТЦ ФСК ЕЭС»).

198. ГОСТ Р 58651.1-2019. Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы. Информационная модель электроэнергетики. Основные положения : Национальный стандарт Российской Федерации : утвержден и введен в действие Приказом

Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 12 ноября 2019 г. N 1103-ст : введен впервые : дата введения 2020-02-01 / разработан Акционерным обществом «Системный оператор Единой энергетической системы» (АО «СО ЕЭС»).

199. Богомолов, Р. А. Создание CIM-модели в АО «СО ЕЭС» / Р. А. Богомолов // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2021. – № 2(65). – С. 26-31.

200. Горелик, Т. Г. К вопросу гармонизации CIM модели энергосистемы и SCL описания подстанции / Т. Г. Горелик, Ю. А. Асанбаев, О. В. Кириенко // Релейная защита и автоматизация. – 2011. – № 2(3). – С. 54-56.

201. Головинский, И. А. Алгоритмизация контроля и блокировки вторичных коммутаций при оперативных переключениях в электросетях / И. А. Головинский // Вестник Северо-Кавказского федерального университета. – 2021. – № 2(83). – С. 7-16.

202. Иванов, А. В. Архитектурная модель интеллектуальной энергетической системы как инструмент системной инженерии / А. В. Иванов, В. С. Чайкин, Е. Н. Соснина // Энергия единой сети. – 2022. – № 5-6(66-67). – С. 16-25.

203. Standard C37.94-2002 – IEEE Standard for N Times 64 Kilobit Per Second Optical Fiber Interfaces Between Teleprotection and Multiplexer Equipment. – URL : <https://standards.ieee.org/> (дата обращения: 01.02.2024).

204. Харламов, В. А. Высоконадежные каналы по-цифровым сетям связи для существующих и перспективных систем РЗА / В. А. Харламов, А. Х. Хасанов // Релейщик. – 2015. – №2. – С. 18-22.

205. Standard IEC 61850. Communication networks and systems for power utility automation - Part 9-2: Specific communication service mapping (SCSM) – Sampled values over ISO/IEC 8802-3. – URL : <https://www.iec.ch> (дата обращения: 01.02.2024).

206. Astic, J.-Y. Postes intelligents / J.-Y.Astic, V. Leitloff [et al] // Design, Test and Commissioning of RTE's first completely Digital Substation. PAC World. – 2018. – P. 46-51.

207. Time in protection applications – time sources and distribution methods: special report // CIGRE SC B5 Colloquium. – Tromse, Norway. – 2019. – P. 1-6.

208. Терминал продольной дифференциальной защиты линий 110-220 кВ типа «ТОР 300 ДЗЛ 56Х». Руководство по эксплуатации. Описание функций защит. АИПБ.656122.011-072 РЭ2. – 2019. – URL : <https://relematika.ru/> (дата обращения: 05.06.2024).

209. Харламов, В. А. Перспективы использования сетей с пакетной коммутацией при организации цифровых каналов для релейной защиты и автоматики / В. А. Харламов // Новое в российской электроэнергетике. – 2014. – № 12. – С. 23-35.

210. СТО 34.01-21-004-2019. Цифровой питающий центр. Требования к технологическому проектированию цифровых подстанций напряжением 110-220 кВ и узловых цифровых подстанций напряжением 35 кВ. Дата введения: 14.09.2022. – ПАО «Россети Сибирь». – 2022.

211. Stefanka, M. The parallel redundancy protocol over wide area networks / M. Stefanka // Smart Grid and Renewable Energy. – 2007. – P. 147-153.

212. CIGRE Technical Brochure 629. Coordination of protection and automation for future networks. CIGRE Working Group B5.43. – 2015. – 110 p.

213. Gajić, Z. Practical experience from multiterminal line differential protection installations / Z. Gajić, I. Brnčić, T. Einarsson, B. Ludqvist // International Conference on Relay Protection and Substation Automation of Modern Power Systems, Cheboksary. – 2007.

214. Иванов, С. В. Информационный анализ фильтров ортогональных составляющих для задач релейной защиты / С. В. Иванов // Известия

Российской академии наук. Энергетика. – 2017. – № 5. – С. 95-101.

215. Антонов, В. И. Общие начала теории фильтров ортогональных составляющих / В. И. Антонов, В. А. Наумов, Н. Г. Иванов [и др.] // Релейная защита и автоматизация. – 2016. – № 1(22). – С. 17-26.

216. Лямец, Ю. Я. Быстрое оценивание периодической составляющей тока короткого замыкания / Ю. Я. Лямец, Ю. В. Романов, М. Ю. Широкин // Электричество. – 2012. – № 4. – С. 9-13.

217. Куликов, А. Л. Статистические методы оценки параметров аварийного режима энергорайонов с объектами распределенной генерации / А. Л. Куликов, П. В. Илюшин // Электричество. – 2019. – № 5. – С. 4-11.

218. Лямец, Ю. Я. Многомерная релейная защита. Ч.3. Эквивалентирование моделей / Ю. Я. Лямец, Г. С. Нудельман, Д. В. Зиновьев [и др.] // Электричество. – 2010. – № 1. – С. 9-15.

219. Бычков, Ю. В. Алгоритмические модели на примере защиты дальнего резервирования и определения места повреждения / Ю. В. Бычков, Д. С. Васильев, А. О. Павлов // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2010. – № 6. – С. 63-67.

220. Бычков, Ю. В. Алгоритмические модели в релейной защите / Ю. В. Бычков, Д. С. Васильев, А. О. Павлов // Релейная защита и автоматизация. – 2012. – № 1(6). – С. 20-25.

221. Нагай, И. В. Оценка влияния нагрузки на чувствительность токовых резервных защит / И. В. Нагай // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2013. – № 1. – С. 108-110.

222. Наровлянский, В. Г. Современные методы и средства предотвращения асинхронного режима электроэнергетической системы / В.Г. Наровлянский – Москва : Энергоатомиздат, 2004. – 360 с.

223. Белянин, А. А. Локация замыкания в длинной линии по величинам волнового процесса / А. А. Белянин, Ю. Я. Лямец, А. Ю. Чернов // Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2019. – № 4. – С. 51-57.

224. Dommel, H. W. Digital computer solution of electromagnetic transients in single- and multiphase networks / H. W. Dommel // IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. – 1969. – Vol. PAS-88. – № 4. – P. 388-399.

225. Турчак, Л. И. Основы численных методов / Л. И. Турчак, П. В. Плотников. – Москва : Физматлит, 2002. – 304 с.

226. Левова, Г. А. Интерполирование и экстраполирование : Учебное пособие / Г. А. Левова, О. В. Снежкина, О. В. Бочкарева. – Пенза : Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, 2014. – 124 с.

227. ГОСТ Р 59371-2021. Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы. Релейная защита и автоматика. Автоматическое противоаварийное управление режимами энергосистем. Устройства автоматики ликвидации асинхронного режима. Нормы и требования : Национальный стандарт Российской Федерации : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 3 марта 2021 г. N 109-ст : введен впервые : дата введения 2021-04-01 / разработан Акционерным обществом «Системный оператор Единой энергетической системы» (АО «СО ЕЭС»).

228. Подшивалин, А. Н. Способы алгоритмического моделирования ответвления на линии электропередачи в базисе мгновенных величин / А. Н. Подшивалин, М. В. Михайлов // Конференция академии электротехнических наук Чувашской республики : Сб. тр. науч. конф. – Чебоксары, 2015. – С. 17-18.

229. Илюшин, П. В. Инновационный адаптивный комплекс автоматики ликвидации асинхронного режима электроэнергетического объекта / П. В. Илюшин, А. В. Мокеев, В. Г. Наровлянский // Электрические станции. – 2019. – № 1(1050). – С. 52-59.

230. Шалимов, А.С. Критерии отстройки дистанционных защит с

контролем приращения тока от качаний и асинхронных режимов электрической системы / А. С. Шалимов // Электрические станции. – 2010. – № 3. – С. 52-55.

231. Дони, Н. А. Частотные свойства цифровых фильтров симметричных составляющих / Н. А. Дони, К. Н. Дони // Электричество. – 2003. – № 5. – С. 13-18.

232. Дони, Н. А. Новые предложения по выбору уставок блокировки дистанционной защиты при качаниях / Н. А. Дони, А. П. Малый, А. А. Шурупов // Релейщик. – 2017. – № 2.

233. Шалимов, А. С. Совершенствование методов и технических средств проверки и настройки релейной защиты : специальность 05.14.02 «Электрические станции и электроэнергетические системы» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Шалимов Александр Станиславович, 2022. – 253 с.

234. Шнеерсон, Э. М. Дистанционные защиты / Э. М. Шнеерсон. – Москва: Энергоатомиздат, 1986. – 448 с.

235. Терминал ступенчатых защит и автоматики управления выключателем присоединения 110-220 кВ типа «ТОР 300 КСЗ 5XX», «ТОР 300 АУВ 5XX». Руководство по эксплуатации. Описание функции защит. АИПБ.656122.011-015 РЭ2 v21.2. – URL : <https://relematika.ru/> (дата обращения: 05.06.2024).

236. Подшивалин, А. Н. Исследование токового пускового органа дистанционной защиты в переходных режимах / А. Н. Подшивалин, Г. Н. Исмук // Международная научно-техническая конференция Релейная защита и автоматика энергосистем – 2023. Сборник докладов. – Москва : АО «СО ЕЭС», 2023. – С. 227-232.

237. Павлов, Г. М. Автоматика энергосистем / Г. М. Павлов, Г. В. Меркурьев // Санкт-Петербург : Издание Центра подготовки кадров РАО «ЕЭС России», 2001. – 388 с.

238. СТО 56947007-33.040.20.282-2019. Типовые шкафы ШЭТ РЗА ЛЭП 110-750 кВ. Архитектура I типа. Дата введения: 26.12.2019. – ПАО «ФСК ЕЭС». – 2019.

239. Гоник, Я. Е. Автоматика ликвидации асинхронного режима / Я. Е. Гоник, Е. С. Иглицкий. – Москва: Энергоатомиздат, 1988. – 110 с.

240. Овчаренко, Н. И. Автоматика электрических станций и электроэнергетических систем : Учеб. для студентов вузов электроэнергет. специальностей / Н. И. Овчаренко ; Под ред. А. Ф. Дьякова. – Москва: Изд-во НЦ ЭНАС, 2000. – 503 с.

241. Podshivalin, A.N. Study of the blocking elements for the impedance-based protection schemes // CIGRE SC B5 Colloquium and Meeting. – Lausanne, Switzerland. – 2011. – Report 313. – P. 1-7.

242. Циглер, Г. Цифровая дистанционная защита: принципы и применение / Перевод с англ. Под ред. Дьякова А.Ф. : Г. Циглер – Москва : Энероиздат, 2005. – 322 с.

243. IEEE Power System Relaying Committee of the IEEE Power Engineering Society, Power swing and out-of-step considerations on transmission line. Report from PSRC WG D6; July 2005. – URL : <http://www.pes-psrc.org> (дата обращения: 01.02.2024).

244. Общие требования к системам противоаварийной и режимной автоматики, релейной защиты и автоматической телеметрической информации, технологической связи в ЕЭС России. Утверждены приказом РАО «ЕЭС России» от 11.02.2008 № 57. – URL : <https://docs.cntd.ru/document/1200100337> (дата обращения: 01.02.2024).

245. Сушко, В. А. ЛЭП с промежуточным отбором мощности. Особенности настройки устройств АЛАР / В. А. Сушко, А. Н. Подшивалин // Новости ЭлектроТехники. – 2010. – № 5(65). – С. 40-44.

246. Сушко, В. А. ЛЭП с промежуточным отбором мощности. Характеристики срабатывания измерительных органов устройств АЛАР / В.

А. Сушко, А. Н. Подшивалин // Новости ЭлектроТехники. – 2010. – № 6(66). – С. 22-26.

247. Apostolov, A. Testing of distance protection relays / A. Apostolov, B. Vandiver, D. Tholomier // Conference CIGRE Relay Protection and Substation Automation of Modern Power Systems. – Cheboksary, Russia. – 2007. – Report S2-4.

248. Барзам, А. Б. Системная автоматика / А. Б. Барзам. – Москва : Энергоатомиздат, 1989. – 444 с.

249. Johns, A. T. Digital protection for power systems / A. T. Johns, S. K. Salman. – Peter Peregrinus, 1995.

250. Redfern, M. A. A new pole slipping protection algorithm for dispersed storage and generation using the equal area criterion / M. A. Redfern, M. J. Checkfield // IEEE Transactions on Power Delivery. – 1995. – Vol. 10. – P. 194-202.

251. ГОСТ Р 70358-2022. Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы. Релейная защита и автоматика. Требования к работе устройств РЗ линий электропередачи классом 110 кВ и выше в переходных режимах с насыщением трансформаторов тока : Национальный стандарт Российской Федерации : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 29 декабря 2022 г. N 1682-ст : введен впервые : дата введения 2023-02-01 / разработан Акционерным обществом «Системный оператор Единой энергетической системы» (АО «СО ЕЭС»).

252. ГОСТ Р 70590-2022. Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы. Релейная защита и автоматика. Дифференциально-фазная защита линий электропередачи классом напряжения 330 кВ и выше. Испытания : Национальный стандарт Российской Федерации : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 26 декабря 2022

г. N 1595-ст : введен впервые : дата введения 2023-02-01 / разработан Акционерным обществом «Системный оператор Единой энергетической системы» (АО «СО ЕЭС»).

253. Podshivalin, A. Dynamic numerical modeling for testing of wide area protection and control schemes // CIGRE SC B5 Colloquium and Meeting. – Jeju, Korea. – 2009. – Report 302. – P. 1-8.

254. Сидвол, К. Новые возможности моделирования энергосистем в реальном времени / К. Сидвол, Ф. А. Иванов // Энергия единой сети. – 2019. – № 4(46). – С. 22-30.

255. Глазырин, В. Е. Проверка дистанционного органа устройств РЗ и ПА в асинхронном режиме стандартными средствами испытательного комплекса «РЕТОМ» / В. Е. Глазырин, А. А. Осинцев, И. И. Литвинов, Е. И. Фролова // Электрические станции. – 2017. – № 11(1036). – С. 32-37.

256. Веников, В. А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах: Учеб. для электроэнергет. спец. Вузов / В. А. Веников. – Москва : Высш. шк., 1985

257. Oppenheim, A.V. Signals and systems / A. V. Oppenheim, A. S. Willsky, I. T. Young. – Prentice-Hall, 1983. – 796 p.

258. Ефремов, В. А. Устройство противоаварийной автоматики "ИЦ «Бреслер» / В. А. Ефремов, А. Н. Подшивалин, Э. А. Кушников // Энергетика и промышленность России. – 2010. – №22 (162). – С. 14.

259. СТО 56947007-29.240.55.224-2016. Методические указания по определению места повреждения ВЛ напряжением 110 кВ и выше. Дата введения: 17.08.2016. – ПАО «ФСК ЕЭС». – 2016.

260. Куликов, А. Л. Дистанционное определение мест повреждений высоковольтных линий электропередачи средствами цифровой обработки сигналов : специальность 05.14.02 «Электрические станции и электроэнергетические системы» : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Куликов Александр Леонидович. – Иваново,

2007. – 381 с.

261. Ефремов, В. А. Виды погрешностей ОМП и их влияние на точность замера / В. А. Ефремов // Релейная защита и автоматизация. – 2013. – № 2. – С. 54-58.

262. CIGRE Technical Brochure 854. Analysis and comparison of fault location systems in AC power networks. CIGRE Working Group B5.52. – 2021. – 137 p.

263. Бычков, Ю. В. Развитие и приложения дистанционного метода определения места повреждения линий электропередачи : специальность 05.14.02 «Электрические станции и электроэнергетические системы» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Бычков Юрий Владимирович. – Чебоксары, 2012. – 160 с.

264. Яблоков, А. А. Разработка и исследование функции определения места повреждения для информационной системы на основе цифровых трансформаторов / А. А. Яблоков, Г. А. Филатова, А. С. Тимофеев, А. Е. Петров // Вестник ИГЭУ. – 2019. – № 4. – С.63-74.

265. Воронов, П. И. Проявления нераспознаваемости места и зоны короткого замыкания в линии электропередачи / П. И. Воронов, Ю. Я. Лямец, М. В. Мартынов // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем : Материалы XI Всероссийской научно-технической конференции ДНДС–2015. – Чебоксары, 2015. – С. 349-351.

266. Лямец, Ю. Я. Информационная теория релейной защиты / Ю. Я. Лямец, А. Н. Подшивалин, Г. С. Нудельман // Региональная энергетика и электротехника: проблемы и решения: сборник научных трудов. – Чебоксары, 2011. – Вып. 7.

267. Нагай, В. И. Информационные признаки аварийного режима в высоковольтных электроустановках при наличии переходного сопротивления электрической дуги / В. И. Нагай, И. В. Нагай, С. В. Сарры [и др.] // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2017. – Т. 60. – № 6. – С. 84-

90.

268. Нагай, И. В. Распознавание удаленных коротких замыканий при наличии переходного сопротивления / И. В. Нагай, В. И. Нагай, П. С. Киреев // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2015. – № 3. – С. 68-72.

269. Иванов, С. В. Информационный анализ линий электропередачи и способов их защиты : специальность 05.14.02 «Электрические станции и электроэнергетические системы» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Иванов Сергей Владимирович. – Чебоксары, 2005. – 158 с.

270. Podchivaline, A. Interval transform of information and its applications in relay protection / Y. Liamets, A. Podchivaline, S. Ivanov, G. Nudelman // Proc. Int. Conf. IEEE St Petersburg PowerTech. – 2003. – Report 31.

271. Подшивалин, А. Н. Распознаваемость коротких замыканий в задаче определения места повреждения по одностороннему наблюдению параметров аварийного режима / А. Н. Подшивалин, Г. Н. Исмуков // Международная научно-техническая конференция Релейная защита и автоматика энергосистем – 2023. Сборник докладов. – Москва : АО «СО ЕЭС», 2023. – С. 154-159.

272. Патент № 2033622 С1 Российская Федерация, МПК G01R 31/11, H02H 3/28. Способ определения места и характера повреждения линии электропередачи с использованием ее моделей : № 4685872/63 : заявл. 03.05.1989 : опубл. 20.04.1995 / Ю. Я. Лямец, В. И. Антонов, В. А. Ефремов [и др.] ; заявитель Чувашский государственный университет им.И.Н.Ульянова.

273. Подшивалин, А.Н. Опыт применения системы ОМП Исследовательского центра «Бреслер» / А. Н. Подшивалин, Г. Н. Исмуков, А. В. Жарков // Релейная защита и автоматика энергосистем : материалы XXI Всероссийской научно-практической конференции. – Москва, 2012. – С. 303-

309.

274. Подшивалин, А. Н. ТОР-Локатор: первый опыт применения / А. Н. Подшивалин, И. С. Климатова, Э. А. Терентьев // Вести МОЭСК. – 2008. – № 1-2. – С. 4.

275. Хузяшев, Р. Г. Источники методической погрешности одностороннего алгоритма определения места повреждения на воздушной линии электропередачи по параметрам аварийного режима / Р. Г. Хузяшев, Ю.В. Писковацкий, О. В. Якимов // Проблемы энергетики. – 2008. – № 11-12. – С. 96-104.

276. Лямец, Ю. Я. Абсолютная нераспознаваемость однофазного короткого замыкания / Ю. Я. Лямец, С. В. Иванов, А. Н. Подшивалин // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике : Материалы IV всероссийской научно-технической конференции. – Чебоксары : Изд-во Чуваш. ун-та, 2002. – С. 308-311.

277. Лямец, Ю. Я. Алгоритмические модели электрических систем / Ю. Я. Лямец, Г. С. Нудельман, А. О. Павлов // Труды Академии электротехнических наук Чувашской республики. – 1999. – № 1. – С. 42-49.

278. Подшивалин, А. Н. Опыт применения системы ОМП исследовательского центра «Бреслер» / А. Н. Подшивалин, Г. Н. Исмуков, А. В. Жарков // Релейная защита и автоматика энергосистем: материалы XXI Всероссийской научно-практической конференции. – 2012. – С. 303-309.

279. Подшивалин, А. Н. Адаптация методов определения места повреждения к современным требованиям эксплуатации линий электропередачи [Электронный ресурс] / А. Н. Подшивалин, Г. Н. Исмуков // Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем : материалы IV Междунар. науч.-техн. конф. (Екатеринбург, 3–7 июня 2013). – URL : <http://www.cigre.ru/activity/conference/relayprotect5/conference/speakers/26%20С.1.2-14..pdf> (дата обращения: 20.03.2024).

280. Каппелини, В. Цифровые фильтры и их применение / В.

Каппелини, А. Дж. Константинодис, П. Эмилиани. – Москва : Энергоатомиздат, 1983. – 360 с.

281. Лачугин, В. Ф. Опыт эксплуатации системы волнового ОМП на линии электропередачи 220 кВ Томмот-Мая / В. Ф. Лачугин, А. Н. Подшивалин, Г. Н. Исмуков, А. П. Львов // Технологический суверенитет России в области РЗА и АСУ ТП и устойчивость в условиях санкционных ограничений : Всероссийская научно-техническая конференция по релейной защите и автоматизации энергетических систем : Сборник докладов. – Чебоксары, 2024. – С. 70-73.

282. Crossley, P. A. Distance protection based on traveling waves / P. A. Crossley, P. G. McLaren // IEEE Trans. on PAS-102. – № 9. – 1983. – P. 2971-2983.

283. Подшивалин, А. Н. Статистический измерительный орган волновых устройств РЗА / А. Н. Подшивалин, Г. Н. Исмуков // Известия Академии электротехнических наук РФ. – Выпуск 23, июль. – 2021. – С. 16-27.

284. Schweitzer, E. O. Mystery solved: surprises discovered with megahertz sampling and traveling-wave data analysis / E. O. Schweitzer, V. Skendzic, Y. Gong, A. Guzman, M. V. Mynam, J. L. Eternod // PAC World. – 2020. – P. 54-59.

285. Costa, F.V. Fault-induced transient detection based on real-time analysis of the wavelet coefficient energy / F.V. Costa // IEEE Transactions on Power Delivery. – Vol. 29, No. 1. – 2014. – P. 140-153.

286. Подшивалин, А. Н. Волновые устройства РЗА: статистический подход к выбору уставок / А. Н. Подшивалин, Г. Н. Исмуков // Современные тенденции развития цифровых систем релейной защиты и автоматики : Сборник докладов научно-технической конференции. – Чебоксары : Изд-во Чуваш. ун-та, 2021. – С.44-49.

287. Подшивалин, А. Н. О некоторых особенностях волновых

процессов при повреждениях ЛЭП сверхвысокого напряжения / А. Н. Подшивалин, Г. Н. Исмуков, М. В. Михайлов, А. Ю. Чернов // Современные тенденции развития цифровых систем релейной защиты и автоматики : Сборник докладов научно-технической конференции. – Чебоксары : Изд-во Чуваш. ун-та, 2021. – С. 240-244.

288. 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. – С. 34-37.

289. Patent US6597180B1. Fault point location system. – URL : <https://patents.google.com/patent/US6597180> (дата обращения: 01.02.2024).

290. 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.

291. Ермаков, К. И. Совершенствование методов и средств определения места повреждения на линиях электропередачи для организации аварийно-восстановительных работ : специальность 05.14.02 «Электрические станции и электроэнергетические системы» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Ермаков Константин Игоревич, 2022. – 209 с.

292. Dong, X. Z. The application of the wavelet transform of travelling wave phenomena for transient based protection / X. Z. Dong, M. A. Redfern, Z. Bo, F. Jiang // International conference on power systems transients - IPST. – New Orleans, USA, 2003. – P. 1-6.

293. Lopes, F. Using the differentiator-smoother filter to analyze traveling waves on transmission lines: fundamentals, settings and implementation / F. Lopes, E. Jr. Leite, J. P. Ribeiro, L. Lopes, A. Piardi, R. Otto, W. Neves // Proceedings of the International Conference on Power Systems Transients 2019

(IPST). – Perpignan, France, 2019. – P. 1-6.

294. Подшивалин, А. Н. Полигонные испытания системы волнового определения места повреждения на воздушных линиях / В. Ф. Лачугин, П. С. Платонов, В. Г. Алексеев, М. В. Вазюлин, Н. Н. Митрофанов, С. Г. Попов, Г. Н. Исмуков, А. Н. Подшивалин, С. А. Арутюнов, Н. Г. Ключкин, А. С. Шеметов // Электрические станции. – 2021. – № 8. – С. 34-40.

295. Патент № 2739433 С1 Российская Федерация, МПК G01R 31/08. Способ определения места повреждения на линии электропередачи : № 2020123657 : заявл. 16.07.2020 : опубл. 24.12.2020 / В. Ф. Лачугин, П. С. Платонов, С. В. Иванов [и др.] ; заявитель Публичное акционерное общество «Федеральная сетевая компания Единой энергетической системы», Акционерное общество «Научно-технический центр Федеральной сетевой компании Единой энергетической системы».

296. Смирнов, А. Н. Волновой метод двухсторонних измерений для определения места повреждения в воздушной линии электропередачи 110 - 220 кВ : специальность 05.14.02 «Электрические станции и электроэнергетические системы» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Смирнов Александр Николаевич, 2016. – 209 с.

297. Лачугин, В. Ф. Реализация волнового метода определения места повреждения на линиях электропередачи с использованием статистических методов анализа данных / В. Ф. Лачугин, Д. И. Панфилов, А. Н. Смирнов // Известия РАН. Энергетика. – 2013. – № 6. – С. 137-146.

298. Подшивалин, А. Н. Исследование свойств коэффициента эксцесса в задаче волнового определения места повреждения линий электропередачи / А. Н. Подшивалин // Релейная защита и автоматизация. – № 1. – 2023. – С. 50-57.

299. Лачугин, В. Ф. Релейная защита объектов электроэнергетических систем, основанная на использовании волновых методов : специальность 05.14.02 «Электрические станции и электроэнергетические системы» :

диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Лачугин Владимир Федорович, 2016. – 437 с.

300. Schweitzer, E.O. Locating faults by the traveling waves they launch / E.O. Schweitzer, A. Guzman, M. V. Mynam, V. Skendzic, B. Kasztenny, S. Marx. // 67th Annual Conference for Protective Relay Engineers. – 2014. – P. 95-110.

301. Патент № 2774049 С1 Российская Федерация, МПК G01R 31/08. Способ двухстороннего волнового определения места повреждения кабельно-воздушной линии электропередачи : № 2021124803 : заявл. 20.08.2021 : опубл. 14.06.2022 / А. О. Федоров, В. С. Петров, В. И. Антонов [и др.] ; заявитель Общество с ограниченной ответственностью научно-производственное предприятие «ЭКРА».

302. Зевеке, Г. В. Основы теории цепей : Учеб. для вузов / Г.В. Зевеке, П.А. Ионкин, А.В. Нетушил, С.В. Страхов. – Москва : Энергоатомиздат, 1989. – 528 с.

303. Костенко, М. В. Волновые процессы и электрические помехи в многопроводных линиях высокого напряжения / М. В. Костенко, Л. С. Перельман, Ю. П. Шкарин. – Москва : Энергия, 1973. – 271 с.

304. Патент № 2437110 С1 Российская Федерация, МПК G01R 31/11. Способ определения места повреждения линий электропередачи : № 2010119732/28 : заявл. 17.05.2010 : опубл. 20.12.2011 / А. Л. Куликов.

305. Подшивалин, А. Н. Волновая имитационная модель электрической сети с использованием операторного метода / Г. Н. Исмуков, А. Н. Подшивалин // Электрические станции. – 2018. – № 1 (1038). – С. 36-39.

306. Диткин, В. А. Интегральные преобразования и операционное исчисление / В. А. Диткин, А. П. Прудников. — Москва : Наука, 1974. — 544 с.

307. Балакирев, В. С. Экспериментальное определение динамических характеристик промышленных объектов управления / В. С. Балакирев, Е. Г. Дудников, А. М. Цирлин. – Москва : Энергия, 1967. – 232 с.

308. Коновалов, В.И. Идентификация и диагностика систем : Учебное пособие / В. И. Коновалов. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 163 с.

309. Подшивалин, А. Н. Разработка и применение устройств определения места повреждения на линиях электропередачи с использованием волновых методов / В. Ф. Лачугин, Д. И. Панфилов, С. Г. Попов, П. С. Платонов, В. Г. Алексеев, Н. Г. Ключкин, А. Н. Подшивалин // Энергия единой сети. – № 5-6 (60-61). – 2021. – С. 50-66.

310. Подшивалин, А. Н. Синтез моделей для волновых защит / Г. Н. Исмуков, А.Н. Подшивалин // Релейщик. – 2017. – № 3(30) – С. 20-22.

311. Исмуков, Г. Н. Компенсация искажений измерительных преобразователей в волновой РЗА / Г. Н. Исмуков, А. Н. Подшивалин // Проблемы и перспективы развития энергетики, электротехники и энергоэффективности : Материалы II Международной научно-технической конференции, Чебоксары, 18–19 октября 2018 года. – Чебоксары: Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова, 2018. – С. 89-99.

312. Подшивалин, А. Н. Волновая имитационная модель электрической сети с использованием операторного метода / Г. Н. Исмуков, А. Н. Подшивалин // Труды Академии электротехнических наук Чувашской Республики. – 2018. – № 1. – С. 44-49.

313. Подшивалин, А. Н. Практический способ определения параметров настройки волновых защит линий электропередачи / А. Н. Подшивалин, Г. Н. Исмуков // Международная выставка и конференция «Релейная защита и автоматика энергосистем» : Сб. докладов. – Санкт-Петербург, 2017. – С. 880-887.

314. Бесекерский, В. А. Теория систем автоматического управления / В. А. Бесекерский, Е. П. Попов [4-е изд., перераб. и доп.]. – Санкт-Петербург : Профессия, 2003. – 752 с.

315. Подшивалин, А. Н. Идентификация структурной модели участка

электрической сети в задаче волнового ОМП / А. Н. Подшивалин, Г. Н. Исмуков // Международная научно-техническая конференция Релейная защита и автоматика энергосистем – 2023. Сборник докладов. – Москва : АО «СО ЕЭС», 2023. – С. 160-163.

316. Schweitzer, E. O. Performance of time-domain line protection elements on real-world faults / E. O. Schweitzer, B. Kasztenny, M. V. Mynam // 2016 69th Annual Conference for Protective Relay Engineers (CPRE), College Station. – TX, USA. – 2016. – P. 1-17.

317. Abur, A. Use of time delays between modal components in wavelet based fault location / A. Abur, F. H. Magnago // International Journal of Electrical Power and Energy Systems. – Vol. 22. – № 6. – 2000. – P. 397-403.

318. Bewley, L. V. Travelling waves on transmission system / L. V. Bewley. – New York : John Willey and sons, 1933. – 334 p.

319. Подшивалин, А. Н. Оптимальная локация повреждения линии электропередачи на основе анализа волновых рядов / А. Н. Подшивалин, Г. Н. Исмуков, Г. В. Терентьев // Энергетик. – 2019. – № 11. – С. 14-16.

320. Калиткин, Н. Н. Численные методы / Н. Н. Калиткин. – Москва : Наука, 1978. – 512 с.

321. Патент № 2774052 С1 Российская Федерация, МПК G01R 31/08. Способ одностороннего волнового определения места повреждения : № 2021124801 : заявл. 20.08.2021 : опубл. 14.06.2022 / А. О. Федоров, В. С. Петров, В. И. Антонов [и др.] ; заявитель Общество с ограниченной ответственностью научно-производственное предприятие «ЭКРА».

322. Львов, А. П. Применение устройств определения места повреждения на воздушных линиях электропередачи 220 кВ западного и центрального районов республики Саха (Якутия) / А. П. Львов, В. Ф. Лачугин, П. С. Пинчуков, А. Ю. Киселев // Энергия единой сети. – 2023. – № 5-6 (71). – С. 24-28.

323. Ghaderi, A. Active fault location in distribution network using time-

frequency reflectometry / A. Ghaderi, H. A. Mohammadpour, H. Ginn // Proceedings of the 2015 IEEE Power and Energy Conference at Illinois (PECI). – 2015. – USA. – P. 1-7.

324. Куликов, А. Л. Время-частотные зависимости сложных сигналов и их влияние на определение мест повреждений линий / А. Л. Куликов, А. А. Петрухин, А. С. Свечников // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2010. – № 11-12. – С. 101-107.

325. Куликов, А. Л. Имитационное моделирование зондирования линий электропередач линейно частотно-модулированными сигналами / А. Л. Куликов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2007. – № 5-6. – С. 52-62.

326. Патент на полезную модель № 42324 U1 Российская Федерация, МПК G01R 31/11. Устройство для определения места повреждения линий электропередачи и связи : № 2004125337/22 : заявл. 18.08.2004 : опубл. 27.11.2004 / А. Л. Куликов, Д. А. Куликов.

327. Smith, P. Analysis of spread spectrum time domain reflectometry for wire fault location / P. Smith, C. Furse, J. Gunther // IEEE Sensors Journal. – 2005. – Vol. 5. – P. 1469-1478.

328. Taylor, M. Line monitoring and fault location using spread spectrum on power line carrier/ V. Taylor, M. Faulkner // IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib. – 1996. – Vol. 143 – P. 427-434.

329. Минуллин, Р. Г. Обнаружение гололедных образований на линиях электропередачи локационным зондированием / Р. Г. Минуллин, Д. Ф. Губаев ; Р. Г. Минуллин, Д. Ф. Губаев ; М-во образования и науки Российской Федерации, Гос. образовательное учреждение высш. проф. образования «Казанский гос. энергетический ун-т». – Казань : Казанский государственный энергетический университет, 2010. – 207 с.

330. Подшивалин, А. Н. Наблюдение гололедных образований средствами активного волнового ОМП / А. Н. Подшивалин, Г. Н. Исмуков //

Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем России : Чувацкий государственный университет имени И.Н. Ульянова, Чебоксары, 18–21 апреля 2023 года / сборник докладов VII международной научно-практической конференции. – Чебоксары, 2023. – С. 272-276.

331. Clarke, I. E. *Circuit Analysis of Alternating Current Power Systems* / I. E. Clarke. – New York : Wiley. – vol. 1. – 1943.

332. Шкарин, Ю.П. *Высокочастотные тракты каналов связи по линиям электропередачи* / Ю.П. Шкарин. – Москва : Энергопрогресс, 2001. – 72 с.

333. Исмуков, Г. Н. *Исследование метода активного волнового определения места повреждения трехпроводной линии электропередачи* / Г. Н. Исмуков, А. Н. Подшивалин, А. Ю. Чернов // Проблемы и перспективы развития энергетики, электротехники и энергоэффективности : Материалы III Международной научно-технической конференции, Чебоксары, 14–16 ноября 2019 года. – Чебоксары : Чувацкий государственный университет имени И.Н. Ульянова, 2019. – С. 173-179.

334. Подшивалин, А. Н. *Задача волнового ОМП секционированных линий распределительных электрических сетей* / М. В. Михайлов, А. Н. Подшивалин, Г. Н. Исмуков // Сборник докладов научно-технической конференции молодых специалистов : Материалы конференции в рамках форума РЕЛАВЭКСПО-2019, Чебоксары, 23–26 апреля 2019 года. – Чебоксары : Чувацкий государственный университет имени И.Н. Ульянова, 2019. – С. 4-8.

335. Подшивалин, А. Н. *Исследование имитационных моделей линии электропередачи для локационного определения места повреждения и дистанционной диагностики* / А. Н. Подшивалин // *Электричество*. – 2024. – № 3. – С. 35-44.(нет)

336. Lin, S. *Travelling wave time-frequency characteristic-based fault location method for transmission lines* / S. Lin, Z. Y. He, X. P. Li, Q. Q. Qian // *IET Generation, Transmission & Distribution*. – 2012. – № 6(8). – P. 764–772.

337. Фардиев, И. Ш. Диагностика воздушных линий распределительных электрических сетей / И. Ш. Фардиев, Р. Г. Минуллин, Е. В. Закамский [и др.] // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2004. – № 7-8. – С. 41-49.

338. Патент № 2474831 С1 Российская Федерация, МПК G01R 31/11. Способ определения места повреждения линий электропередачи и связи и устройство для его осуществления : № 2011140727/28 : заявл. 07.10.2011 : опубл. 10.02.2013 / А. А. Большаков, А. А. Захаров, В. В. Сотников ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Саратовский государственный технический университет» (СГТУ).

339. Закамский, Е. В. Локационный метод обнаружения повреждений в электрических распределительных сетях напряжением 6 - 35 кВ : специальность 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Закамский Евгений Владимирович. – Казань, 2004. – 168 с.

340. Федотов, А. И. Теоретические и практические аспекты мониторинга проводов воздушных линий электропередачи 110 кВ / А. И. Федотов, Р. Ш. Басыров, Г. В. Вагапов, Л. И. Абдуллин // Интеллектуальная электротехника. – 2018. – № 1. – С. 61-72.

341. Патент № 2707393 С1 Российская Федерация, МПК H02G 7/16, H02J 7/35. Устройство мониторинга гололедообразований на грозозащитных тросах ВЛ 110-220 кВ : № 2019105377 : заявл. 15.10.2018 : опубл. 26.11.2019 / А. И. Федотов, Р. Э. Абдуллазянов, Г. В. Вагапов ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Казанский государственный энергетический университет" (ФГБОУ ВО "КГЭУ").

342. Губаев, Д. Ф. Обнаружение гололеда на линиях электропередачи локационным методом : специальность 05.11.13 «Приборы и методы

контроля природной среды, веществ, материалов и изделий» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Губаев Дамир Фатыхович. – Казань, 2009. – 186 с.

343. Подшивалин, А. Н. Оценка состояния линии электропередачи средствами активного волнового ОМП / А. Н. Подшивалин, Г. Н. Исмуков // Релейная защита и автоматизация. – 2024. – № 1 (54). – С. 54-58.

344. Булычев, А. В. Управление удалением гололедно-изморозевых отложений на проводах воздушных линий электропередачи / А. В. Булычев, А. С. Александров // Релейная защита и автоматизация. – 2022. – № 3(48). – С. 24-31.

345. Богорад, А. М. Автоматическое повторное включение в энергосистемах / А. М. Богорад, Ю. Г. Назаров. – Москва : «Энергия», 1969. – 336 с.

346. CIGRE Technical Brochure 587. Short Circuit Protection of Circuits with Mixed Conductor Technologies in Transmission Networks. CIGRE Working Group B5.23. – 2014. – 241 p.

347. Ushio, G. Fault detection systems for hybrid line/cable circuits in Japan / G. Ushio, K. Kurosawa, E. Itakura, W. Taki [et al.] // CIGRE Study Committee B5 Colloquium. – Lausanne, Switzerland. – 2011. – P. 1-6.

348. Патент № 2669542 С1 Российская Федерация, МПК G01R 15/24, H02H 3/06. Система селективного блокирования автоматического повторного включения на комбинированных кабельно-воздушных линиях электропередачи : № 2018101148 : заявл. 12.01.2018 : опубл. 11.10.2018 / Г. С. Нудельман, С. В. Балашов, Е. Ю. Ерохин [и др.] ; заявитель Публичное акционерное общество «Федеральная сетевая компания Единой энергетической системы», Открытое акционерное общество «Всероссийский научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт релестроения с опытным производством», Акционерное общество «Научно-технический центр Федеральной сетевой компании Единой

энергетической системы».

349. Алексеев, В. Г. Селективное автоматическое повторное включение кабельно-воздушных линий электропередачи напряжением 110 кВ и выше / В. Г. Алексеев, С. А. Арутюнов, С. В. Балашов [и др.] // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2018. – № 3(48). – С. 94-101.

350. СТО 56947007-29.120.70.327-2023. Система автоматического повторного включения с абсолютной селективностью кабельно-воздушных линий электропередачи напряжением 110 кВ и выше. Типовые технические требования. Дата введения: 15.05.2023. – ПАО «ФСК-Россети». – 2023.

351. Патент на полезную модель № 165635 U1 Российская Федерация, МПК H02H 3/06, G01R 1/00. Устройство автоматического повторного включения кабельно-воздушной линии электропередачи : № 2016100463/07 : заявл. 11.01.2016 : опубл. 27.10.2016 / Д. И. Догадкин, Г. Н. Исмуков, А. Л. Куликов [и др.] ; заявитель ПАО «Московская объединённая электросетевая компания» (ПАО «МОЭСК»).(нет)

352. Дмитриев, М. Автоматическое повторное включение на воздушно-кабельных линиях электропередачи 110-500 кВ / М. Дмитриев // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2015. – № 1(28). – С. 68-73.

353. Подшивалин, А. Устройство автоматического повторного включения кабельно-воздушных линий электропередачи мегаполисов / Д. Догадкин, Р. Марин, Е. Ширшова, Г. Исмуков, А. Куликов, М. Линт, А. Подшивалин // Электроэнергия. Передача и распределение. – № 5. – 2016. – С. 98-103.

354. Минуллин, Р. Г. Современные методы обнаружения гололеда на проводах воздушных линий электропередачи часть 1. Методы прогнозирования и взвешивания проводов / Р. Г. Минуллин, Э. Ю. Абдуллазянов, В. А. Касимов, М. Р. Яруллин // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2013. – № 7-8. – С. 68-78.

Приложение А Результаты расчетов к главе 2

Таблица А.1. Применение методики выявления ошибочного измерения по узлам с невязкой (однородная ошибка)

		Номер второй ветви с ошибочным измерением															
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	Нет ошибки
Номер первой ветви с ошибочным измерением	1		1,2,3,10,1 2	1,2,3,10,1 2,14	1,2,3,10,4, 12,14	1,2,4,5,6,1 0,12	1,2,5,6,7,1 0,12,15	1,2,6,7,8,1 0,12,15	1,2,7,8,9,1 0,12	1,2,9,10,1 1,12,13	1,2,10,11, 12	1,2,10,11, 12	1,2,10,12	1,2,9,10,1 1,12,13	1,2,3,4,10, 12,14	1,2,6,7,10, 12,15	1,2,10,12
	2			1,2,3,4,14	1,2,3,4,5,1 4	1,2,3,4,5,6	1,2,3,5,6,7 ,15	1,2,3,6,7,8 ,15	1,2,3,7,8,9	1,2,3,8,9,1 1,13	1,2,3,10,1 1,12	1,2,3,9,10, 11,13	1,2,3,10,1 2	1,2,3,9,11, 13	1,2,3,4,14	1,2,3,6,7,1 5	1,2,3
	3				1,2,3,4,5,1 4	2,3,4,5,6,1 4	2,3,4,5,6,7 ,14,15	2,3,4,6,7,8 ,14,15	2,3,4,7,8,9 ,14	2,3,4,9,10, 11,13,14	1,2,3,4,10, 11,12,14	2,3,4,9,10, 11,13,14	1,2,3,4,10, 12,14	2,3,4,9,11, 13,14	2,3,4,14	2,3,4,6,7,1 4,15	2,3,4,14
	4					3,4,5,6,14	3,4,5,6,7,1 4,15	3,4,5,6,7,8 ,14,15	3,4,5,7,8,9 ,14	3,4,5,8,9,1 1,13,14	1,3,4,5,10, 11,12,14	3,4,5,9,10, 11,13,14	1,3,4,5,10, 12,14	3,4,5,9,11, 13,14	3,4,5,14	3,4,5,6,7,1 5	3,4,5,14
	5						4,5,6,7,15	4,5,6,7,8,1 5	4,5,6,7,8,9	4,5,6,8,9,1 1,13	1,4,5,6,10, 11,12	4,5,6,9,10, 11,13	1,4,5,6,10 12	4,5,6,9,11, 13	3,4,5,6,14	4,5,6,7,15	4,5,6
	6							5,6,7,8,15	5,6,7,8,9,1 5	5,6,7,8,9,1 1,13,15	1,6,7,11	6,7,10,11	1,6,7	6,7,10	4,6,7	6,7	5,6,7,15
	7								7,8,9	7,8,9,10	1,7,8,11	7,8,10,11	1,7,8	7,8,10	4,7,8	7,8	6,7,8,15
	8									8,9,10	1,8,9,11	8,9,10,11	1,8,9	8,9,10	4,8,9	7,8,9	7,8,9
	9										1,9,10, 11	9,10,11	1,9,10	9,10	4,9,10	7,9,10	8,9,11,13
	10											1,10, 11	1,11	1,10,11	1,4,11	1,7,11	1, 10,11,12
	11												1,10, 11	10,11	4,10,11	7,10,11	9,10,11,13
	12													1,10	1,4	1,7	1,10,12
	13														4,10	7,10	9,11,13
	14															4,7	3,4,14
	15																

Таблица 2. Результаты проверки методики выявления ошибочного измерения по узлам с невязкой (смешанная ошибка)

		Номер ветви с ошибочным измерением															
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
Номер ветви с ошибкой в положении коммутационного аппарата	1	1,2,12,10	1,2,3	2,3,4,14	3,4,5,14	4,5,6	5,6,7,15	6,7,8,15	7,8,9	8,9,11,13	1,12,10,11	9,10,11,13	1,12,10	11,9,13	3,4,14	6,7,15	
		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	2	1,2,12,10	1,2,3	2,3,4,14	3,4,5,14	4,5,6	5,6,7,15	6,7,8,15	7,8,9	8,9,11,13	1,12,10,11	9,10,11,13	1,12,10	11,9,13	3,4,14	6,7,15	
		2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
	3	1,2,12,10	1,2,3	2,3,4,14	3,4,5,14	4,5,6	5,6,7,15	6,7,8,15	7,8,9	8,9,11,13	1,12,10,11	9,10,11,13	1,12,10	11,9,13	3,4,14	6,7,15	
		3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
	4	1,2,12,10	1,2,3	2,3,4,14	3,4,5,14	4,5,6	5,6,7,15	6,7,8,15	7,8,9	8,9,11,13	1,12,10,11	9,10,11,13	1,12,10	11,9,13	3,4,14	6,7,15	
		4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	
	5	1,2,12,10	1,2,3	2,3,4,14	3,4,5,14	4,5,6	5,6,7,15	6,7,8,15	7,8,9	8,9,11,13	1,12,10,11	9,10,11,13	1,12,10	11,9,13	3,4,14	6,7,15	
		5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	4	
	6	1,2,12,10	1,2,3	2,3,4,14	3,4,5,14	4,5,6	5,6,7,15	6,7,8,15	7,8,9	8,9,11,13	1,12,10,11	9,10,11,13	1,12,10	11,9,13	3,4,14	6,7,15	
		6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	
	7	1,2,12,10	1,2,3	2,3,4,14	3,4,5,14	4,5,6	5,6,7,15	6,7,8,15	7,8,9	8,9,11,13	1,12,10,11	9,10,11,13	1,12,10	11,9,13	3,4,14	6,7,15	
		7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	
	8	1,2,12,10	1,2,3	2,3,4,14	3,4,5,14	4,5,6	5,6,7,15	6,7,8,15	7,8,9	8,9,11,13	1,12,10,11	9,10,11,13	1,12,10	11,9,13	3,4,14	6,7,15	
		8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	
	9	1,2,12,10	1,2,3	2,3,4,14	3,4,5,14	4,5,6	5,6,7,15	6,7,8,15	7,8,9	8,9,11,13	1,12,10,11	9,10,11,13	1,12,10	11,9,13	3,4,14	6,7,15	
		9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	
	10	1,2,12,10	1,2,3	2,3,4,14	3,4,5,14	4,5,6	5,6,7,15	6,7,8,15	7,8,9	8,9,11,13	1,12,10,11	9,10,11,13	1,12,10	11,9,13	3,4,14	6,7,15	
		10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	
	11	1,2,12,10	1,2,3	2,3,4,14	3,4,5,14	4,5,6	5,6,7,15	6,7,8,15	7,8,9	8,9,11,13	1,12,10,11	9,10,11,13	1,12,10	11,9,13	3,4,14	6,7,15	
		11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	
	12	1,2,12,10	1,2,3	2,3,4,14	3,4,5,14	4,5,6	5,6,7,15	6,7,8,15	7,8,9	8,9,11,13	1,12,10,11	9,10,11,13	1,12,10	11,9,13	3,4,14	6,7,15	
		12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	
	13	1,2,12,10	1,2,3	2,3,4,14	3,4,5,14	4,5,6	5,6,7,15	6,7,8,15	7,8,9	8,9,11,13	1,12,10,11	9,10,11,13	1,12,10	11,9,13	3,4,14	6,7,15	
		13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	
	14	1,2,12,10	1,2,3	2,3,4,14	3,4,5,14	4,5,6	5,6,7,15	6,7,8,15	7,8,9	8,9,11,13	1,12,10,11	9,10,11,13	1,12,10	11,9,13	3,4,14	6,7,15	
		14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	
	15	1,2,12,10	1,2,3	2,3,4,14	3,4,5,14	4,5,6	5,6,7,15	6,7,8,15	7,8,9	8,9,11,13	1,12,10,11	9,10,11,13	1,12,10	11,9,13	3,4,14	6,7,15	
		15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	

Номер ветви

Приложение Б Материалы о внедрении



ООО «Релематика»
 ИНН 2129041046, КПП 213001001
 428020, Россия, г. Чебоксары,
 пр. И. Яковлева, д. 1.
 Тел./факс: +7 (8352) 24 06 50.
 Электронная почта: info@relematika.ru
 www.relematika.ru

УТВЕРЖДАЮ

Технический директор

ООО «Релематика»

И.А. Воробьев



АКТ

Настоящий акт составлен в том, что в ООО «Релематика» (ранее – ООО «Исследовательский центр «Бреслер») в период с 2005 по 2024 годы внедрены и использованы следующие результаты научных разработок Подшивалина Андрея Николаевича, отраженные в его диссертации «Системотехника защиты и автоматики линий электропередачи с использованием пространственно-временной обработки токов и напряжений»:

1. Алгоритмы функционирования и программы терминала дистанционной защиты линий электропередачи серии «Бреслер ТЛ 2606». Терминал в составе шкафа «Бреслер ШЛ 2606» сертифицирован для применения в России и странах СНГ на линиях 110-220 кВ. С 2007 года в эксплуатацию установлено более 1000 терминалов серии.

2. Имитационная модель автоматизированного программного комплекса для исследования и развития алгоритмов автоматики ликвидации асинхронного режима (АЛАР). Модель использована для ускорения процесса разработки продукции ООО «Релематика».

3. Алгоритмы и методики настройки функции АЛАР терминала противоаварийной автоматики серии ТОР 300 ПА. Функция АЛАР аттестована и сертифицирована для применения в ПАО «Россети». С 2012 года в эксплуатацию установлено более 50 терминалов с функцией АЛАР.

4. Алгоритмы, программы и методики настройки функции дистанционной защиты линий электропередачи терминалов серии TOP 300. Эта функция в составе терминалов TOP 300 КСЗ, TOP 300 ДЗЛ, TOP 300 ДФЗ, TOP 300 НВЧЗ, TOP 300 РЗАТ аттестована на соответствие стандартам ПАО «Россети». С 2013 года на подстанциях России и зарубежья внедрено более 2000 терминалов.

5. Алгоритмы функции определения места повреждения (ОМП) по параметрам аварийного режима терминалов серии TOP 100-ЛОК, TOP 300 КСЗ, TOP 300 ДЗЛ, TOP 300 ДФЗ, TOP 300 НВЧЗ, TOP 300 ЛОК. Функция ОМП аттестована для применения в ПАО «Россети». С 2015 года в эксплуатации находится более 500 терминалов TOP 300 с этой функцией.

6. Алгоритмы функции пассивного волнового ОМП терминалов серии TOP 300 ЛОК 550, TOP 300 ВОМП. Терминал TOP 300 ЛОК 550 производится серийно с 2018 года.

7. Алгоритмы функции активной диагностики линий электропередачи терминалов TOP 300 ВОЛНА. Макетные и опытные образцы проходили опытную эксплуатацию на объектах ОАО «РЖД» и ПАО «Россети» с 2011 по 2024 год. Новая версия терминала TOP 300 ВОЛНА спроектирована в соответствии с изысканиями диссертации. Макетный образец устройства изготовлен в 2023 году в количестве 3 шт. и находится на стадии приемки к серийному производству в ООО «Релематика».

Директор Департамента разработок

ООО «Релематика»


С.И. Опарин

Советник по научной работе

ООО «Релематика»


Ю.Я. Лямец



НОЧУ ДПО «Учебный центр «Релематика»

428020, Россия, г. Чебоксары,
пр. Яковлева, 1
тел.: (8352) 24 06 50
факс: (8352) 24 02 43
электронная почта: uc@relematika.ru
ОКПО 90967361 ОГРН 1122100000373
ИНН/КПП 2130998834/213001001

СПРАВКА

о внедрении результатов диссертационной работы
Подшивалина Андрея Николаевича

Результаты, отраженные в диссертационной работе Подшивалина Андрея Николаевича на тему «Системотехника защиты и автоматики линий электропередачи с использованием пространственно-временной обработки токов и напряжений», используются при проведении лекционных, практических и лабораторных занятий слушателей НОЧУ ДПО «УЦ «Релематика» по следующим темам: теоретические основы релейной защиты, функция определения места повреждения, функция дистанционной защиты, функция автоматики ликвидации асинхронного режима.

«24» мая 2024 г.

Директор НОЧУ ДПО "УЦ"Релематика"



Е.А. Васильева

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
 федеральное государственное бюджетное
 образовательное учреждение высшего образования
 «Нижегородский государственный технический
 университет им. Р.Е. Алексеева»
 (НГТУ)

АКТ

№ _____

г. Нижний Новгород

УТВЕРЖДАЮ
 Первый проректор - проректор по
 образовательной деятельности НГТУ

Ивашкин Е.Г.

2024 г.



О внедрении в учебный процесс результатов диссертационной работы Подшивалина А.Н.

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 Подшивалина Андрея Николаевича на тему «Системотехника защиты и автоматики линий электропередачи с использованием пространственно-временной обработки токов и напряжений», представленной на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.4.2 – Электротехнические комплексы и системы, внедрены в учебный процесс кафедры «Электроэнергетика, электроснабжение и силовая электроника» НГТУ.

Материалы диссертационного исследования использованы:

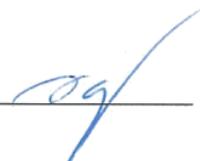
- при чтении лекций по курсам «Цифровая обработка сигналов электроэнергетических систем», «Релейная защита» и «Современная релейная защита» для студентов, обучающихся по направлениям 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» и 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»;

- при подготовке диссертационных работ магистрантов и аспирантов кафедры.

Начальник учебного
 отдела НГТУ

 Мухина И.В.

Директор образовательно-научного
 института электроэнергетики НГТУ,
 д.т.н., доцент

 Дарьенков А.Б.

Заведующий кафедрой
 "Электроэнергетика,
 электроснабжение и силовая
 электроника" НГТУ, к.т.н., доцент

 Севостьянов А.А.



УТВЕРЖДАЮ
Заместитель директора по развитию
и реализации услуг ПО «ЦЭС»
Мурманского филиала
ПАО «Россети Северо-Запад»
Для _____ В.С. Викулин
«13» _____ «05» _____ 2024 г.



Акт

внедрения результатов диссертационной работы Подшивалина А.Н.

Исследования Подшивалина Андрея Николаевича, представленные в диссертации «Системотехника защиты и автоматики линий электропередачи с использованием пространственно-временной обработки токов и напряжений», затрагивают вопросы определения места повреждения (ОМП) линий электропередачи (ЛЭП) методом активного зондирования. Разработаны методы и алгоритмы, повышающие чувствительность измерительных органов активного волнового ОМП и их устойчивость к шумам. На их основе создан программно-аппаратный комплекс мониторинга ЛЭП – ТОР 300 ВОЛНА. В 2018 году комплекс был установлен в опытно-промышленную эксплуатацию на ПС 95 Алакуртти Мурманского филиала ПАО «Россети Северо-Запад». С 06.08.2018 по 09.08.2018 проведены натурные испытания комплекса при искусственных замыканиях на ВЛ 35 кВ Алакуртти-Кайралы длиной 39 км. При зондировании линии под напряжением и без напряжения функция ОМП комплекса ТОР 300 ВОЛНА продемонстрировала высокую точность: погрешность составила от 0,3 до 0,8 км.

В осенне-зимний период 2022-2023 годов совместными усилиями с разработчиками были исследованы эффекты гололедообразования на линии электропередачи. Служба линий Мурманского филиала ПАО «Россети Северо-Запад» предоставила данные для проверки функции диагностики ЛЭП в рамках комплекса ТОР 300 ВОЛНА. Результаты анализа, опубликованные в [1, 2] подтверждают техническую возможность выполнения диагностики в установленном комплексе.

В настоящее время локационный комплекс на базе ТОР 300 ВОЛНА успешно функционирует на ПС 95 Алакуртти, обеспечивая мониторинг ВЛ 35 кВ Алакуртти-Кайралы.

Публикации:

[1] Подшивалин, А. Н. Оценка состояния линии электропередачи средствами активного волнового ОМП / А. Н. Подшивалин, Г. Н. Исмуков // Релейная защита и автоматизация. – 2024. – № 1 (54). – С. 54-58.

[2] Подшивалин, А.Н. Наблюдение гололедных образований средствами активного волнового ОМП / А. Н. Подшивалин, Г. Н. Исмуков // Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем России: VII Межд. науч.-практ. конф.: сб. докл. / Чебоксары, 2023. – С.272-276.

Главный инженер ПО «ЦЭС»

Начальник СРЗА ПО «ЦЭС»

А.Д. Истомин

С.А. Аксенов

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
федеральное государственное
бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Чувашский государственный
университет имени И.Н. Ульянова»
(ФГБОУ ВО «ЧГУ им. И.Н. Ульянова»)

Московский пр., 15, г. Чебоксары, 428015
 тел.: (8352) 583-036; факс: (8352) 450-279
 E-mail: office@chuvsu.ru
 ОГРН 1022101274315 ИНН 2129009412

17.05.2024 № 1700

РАС СЕЙ ФЕДЕРАЦИЙ ЁН
А С Л А Л А Х П А А С Л А П Ё Л Ё
МИНИСТЕРСТВИ

федерацин аслă пёлю паракан
«И.Н. Ульянов ячёллĕ
Чăваш патшалăх университетĕ»
патшалăх вĕренÿ бюджет
учрежденийĕ

428015 Шупашкар хули, Мускав пр., 15

на № от

СПРАВКА

о внедрении результатов диссертационного исследования
Подшивалина Андрея Николаевича

на тему «Системотехника защиты и автоматики линий электропередачи с использованием пространственно-временной обработки токов и напряжений»

Результаты диссертационной работы Подшивалина Андрея Николаевича на тему «Системотехника защиты и автоматики линий электропередачи с использованием пространственно-временной обработки токов и напряжений», представленной на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.4.2 – Электротехнические комплексы и системы, используются на кафедре теоретических основ электротехники и релейной защиты и автоматики ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет им. И.Н.Ульянова» в учебном процессе по дисциплинам «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем» и «Автоматическое управление в электроэнергетических системах» при подготовке бакалавров по направлению 13.03.02 – «Электроэнергетика и электротехника», по профилю «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем».

Проректор по учебной работе



И.Е. Поверинов

Исп.: Нудельман Г.С., заведующий кафедрой
 Тел.: (8352) 58-19-85
 Эл. адрес: toe_rza@mail.ru



Справка

о внедрении результатов диссертационной работы Подшивалина А.Н.

Результаты диссертационной работы «Системотехника защиты и автоматики линий электропередачи с использованием пространственно-временной обработки токов и напряжений» Андрея Николаевича Подшивалина внедрены при выполнении в 2017-2021 годах научно-исследовательской и опытно-конструкторской работы «Создание системы волнового ОМП, подключенного к системе шин, с использованием цифрового обмена данными с устройствами защиты по протоколу 61850», выполненной АО «НТЦ ФСК ЕЭС, АО «ЭНИН» и ООО «Релематика» по заказу ПАО «ФСК ЕЭС», в части создания алгоритмов и программного обеспечения системы волнового ОМП (ВОМП), предназначенной для применения на линиях электропередачи напряжением 220-750 кВ.

Ключевым элементом системы ВОМП является терминал TOP 300 ВОМП, производства ООО «Релематика».

Полигонные испытания TOP 300 ВОМП, проведенные в АО «НТЦ ФСК ЕЭС», а также натурные испытания на линии электропередачи 220 кВ Томмот-Мая филиала ПАО «ФСК ЕЭС» –МЭС Востока, показали, что методы и алгоритмы обработки сигналов системы ВОМП, использованные при разработке TOP 300 ВОМП, позволили обеспечить точность ОМП при различных видах КЗ, существенно превышающую точность ОМП, достигаемых другими методами. Результаты, полученные при разработке и испытаниях системы ВОМП, позволили внедрить ее в эксплуатацию на линиях 220 и 330 кВ ЕНЭС.

АО «НТЦ ФСК ЕЭС», 115201, Россия, Москва, Каширское шоссе, д. 22, корп. 3.
Телефон 7 (495) 727-19-09; info@ntc-power.ru

Ведущий научный сотрудник
Департамента НТС и
научно-технической информации
«НТЦ ФСК ЕЭС», д.т.н.

В.Ф. Лачугин

Начальник управления функциональных
и сертификационных испытаний
вторичного оборудования энергообъектов,
Департамента автоматизированных систем
АО «НТЦ ФСК ЕЭС» к.т.н.

С.Г. Попов



ФИЛИАЛ ОАО «РЖД»
 ТРАНСЭНЕРГО
 ГОРЬКОВСКАЯ ДИРЕКЦИЯ
 ПО ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЮ
 ДОРОЖНАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКАЯ
 ЛАБОРАТОРИЯ

ул. Московское шоссе, 4,
 г. Нижний Новгород, 603950,
 Тел.: (831) 248-82-09, факс: (831) 248-37-52

05. декабря. 2022

Утверждаю:

Начальник Дорожной
 электротехнической лаборатории

С.В. Демидов



Акт

ввода в опытную эксплуатацию системы для определения места повреждения в контактной сети волновым методом (ВОМП) на базе микропроцессорных терминалов типа «ТОР 300 ЛОК 550» производства ООО «Релематика», г. Чебоксары.

Цель: опытно-промышленная (подконтрольная) эксплуатация системы ВОМП на полигоне Горьковской ЖД, участок Н.Новгород-Сортировочный - Тарасиха.

Место проведения работ: Горьковская дирекция по энергообеспечению, Горьковская дистанция электроснабжения, тяговая подстанция Н.Новгород-Сортировочный (ЭЧЭ-8), тяговая подстанция Тарасиха (ЭЧЭ-10).

1 Общие требования к условиям, обеспечению и проведению испытаний

1.1 Испытания проводились в течении ноября 2022 г. на основании следующих нормативно-технических документов:

- СТО РЖД 12.004-2012 «Требования к техническому обслуживанию и ремонту релейных защит, устройств автоматики и телемеханики, средств постоянного технического диагностирования»;
- Распоряжение ОАО РЖД от 05.08.2016 №1587р «Правила содержания тяговых подстанций, трансформаторных подстанций и линейных устройств системы тягового электроснабжения»;

1.2 К работе с техническими средствами системы допущены специалисты, прошедшие специальное обучение и проверку знаний в соответствии с документами: «Правила устройств электроустановок»; «Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей»; «Правила по

- 4) контроль целостности токовых цепей;
- 5) контроль исправности всех токовых цепей (с измерением вторичных токов нагрузки);
- 6) контроль исправности и правильности подключения цепей напряжения в следующем объеме: проверку на ряде зажимов напряжений и правильности фазировки цепей напряжения проверяемого присоединения (контроль угла между U и I по показаниям на дисплее терминала TOP 300 ЛОК 550).

5. Заключение.

По результатам проведённых работ аппарата системы волнового ОМП (ВОМП) соответствует: СТО РЖД 12.004-2012 «Требования к техническому обслуживанию и ремонту релейных защит, устройств автоматики и телемеханики, средств постоянного технического диагностирования»; Распоряжению ОАО РЖД от 05.08.2016 №1587р «Правила содержания тяговых подстанций, трансформаторных подстанций и линейных устройств системы тягового электроснабжения» и допущена к опытно-промышленной (подконтрольной) эксплуатации на участке тягового электроснабжения Н.Новгород-Сортировочный – Тарасиха.

Старший электромеханик
Дорожной электротехнической лаборатории

И.П. Карпов

Старший электромеханик
Дорожной электротехнической лаборатории

С.Е. Антипов