На правах рукописи

ИСМУКОВ ГРИГОРИЙ НИКОЛАЕВИЧ

ИССЛЕДОВАНИЕ И РЕАЛИЗАЦИЯ ПАССИВНОГО И АКТИВНОГО ВОЛНОВОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА ПОВРЕЖДЕНИЯ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Специальность 2.4.3. Электроэнергетика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Чебоксары – 2024

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

Научный руководитель:	доктор технических наук, профессор **Лямец Юрий Яковлевич**
Официальные оппоненты:	**Илюшин Павел Владимирович**, доктор технических наук, главный научный сотрудник, руководитель Центра интеллектуальных электроэнергетических систем и распределенной энергетики Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт энергетических исследований Российской академии наук»
	Дони Николай Анатольевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, директор по науке – заведующий отделом систем РЗА Общества с ограниченной ответственностью Научно-производственное предприятие «ЭКРА»
Ведущая организация:	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный энергетический университет», г. Казань

Защита состоится «26» сентября 2024 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета 24.2.434.04 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова» по адресу: 428034, Чувашская Республика, г. Чебоксары, ул. Университетская, д. 38, учебный корпус №3, зал заседаний Ученого совета, к. 301.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке Чувашского государственного университета имени И.Н. Ульянова по адресу: 428034, Чувашская Республика, г. Чебоксары, ул. Университетская, д. 38 и на сайте www.chuvsu.ru.

Автореферат разослан «04» июля 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.434.04 Малинин
к.т.н., доцент Григорий Вячеславович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы работы. Вынужденный простой поврежденной линии электропередачи (ЛЭП) сопровождается снижением надежности электроснабжения, ухудшением качества и недоотпуском электроэнергии потребителю. Сокращение времени ремонта и ввода в работу ЛЭП является приоритетной задачей эксплуатирующих организаций. Поиск места повреждения может занимать бóльшую часть времени простоя линии, а в случае сложных географических условий – и бóльшую часть бюджета восстановления. Важной задачей эксплуатации ЛЭП является автоматизация поиска места повреждения. Данная задача решается специальными устройствами и программными комплексами определения места повреждения (ОМП). Однако, несмотря на существование множества методов ОМП, исчерпывающего решения не существует, из-за чего в типовых инструкциях по поиску места повреждения сетевые организации указывают большую зону обхода линии относительно рассчитанной координаты повреждения. Волновые методы способны обеспечить необходимую высокую точность ОМП, повышение их эффективности и надежности остается актуальной проблемой.

Научным консультантом работы является зав. отделом РЗА ЛЭП и ПА ООО «Релематика» к.т.н. А. Н. Подшивалин.

Степень разработанности темы исследования. Весомый вклад в разработку и исследование методов и средств дистанционной диагностики и ОМП ЛЭП внесли: А. И. Айзенфельд, В. И. Антонов, Е. А. Аржанников, Я. Л. Арцишевский, Н. А. Дони, П. В. Илюшин, В. А. Касимов, В. Н. Козлов, А. Л. Куликов, В. Ф. Лачугин, Р. Г. Минуллин, Г. С. Нудельман, А. Н. Подшивалин, Г. М. Шалыт, L. V. Bewley, P. A. Crossley, H. W. Dommel, A. Guzman, J. Izykowski, B. Kasztenny, M. M. Saha, E. O. Schweitzer, V. Skendzic, T. Takagi и другие.

Целью работы является анализ и ослабление негативных факторов, приводящих к снижению точности и надежности волнового ОМП на реальных объектах энергетики, а также применение полученных результатов для селективного автоматического повторного включения (АПВ) кабельно-воздушной ЛЭП.

Основные задачи исследования. Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие основные задачи:

1. Повышение селективности, чувствительности и надежности методов пассивного волнового ОМП в условиях шумов и альтернативных процессов в энергосистеме.
2. Совершенствование одностороннего метода пассивного волнового ОМП в условиях множества отраженных волн.
3. Разработка уточненной модели ЛЭП для восстановления искаженных фронтов волн.
4. Повышение надежности работы активного волнового ОМП в условиях гололедно-изморозевых отложений на проводах ЛЭП.
5. Разработка алгоритма селективного автоматического повторного включения кабельно-воздушной ЛЭП с использованием методов ОМП.

Научная новизна работы:

1. Разработан новый способ выбора пороговых значений срабатывания волновых измерительных органов, отличающийся статистически обоснованной отстройки от шума нормального режима работы энергообъекта.

2. Разработан новый способ одностороннего пассивного волнового ОМП на основе анализа меток времени всех доступных наблюдателю волн, отличающийся возможностью увеличения информационной базы и сокращенным описанием модели ЛЭП.

3. Разработан новый способ формирования волновой модели ЛЭП в базисе передаточных функций, отличающийся возможностью ее масштабирования под задачи волнового ОМП и возможностью оценки ее параметров на основе методов идентификации по наблюдению за коммутациями в электрической сети.

4. Разработан новый критерий оценки порога чувствительности активного волнового ОМП в условиях гололедно-изморозевых отложений на проводах, отличающийся учетом неравномерного характера отложений по участкам ЛЭП.

Теоретическая значимость работы:

1. Ранжированы причины снижения точности и надежности волнового ОМП в условиях реальной эксплуатации.

2. Обоснована возможность определения места формирования некоторых видов аномальных процессов пассивным волновым методом при обеспечении достаточной чувствительности волновых измерительных органов.

3. Дана оценка передаточной функции реальной ЛЭП, полученной методом идентификации на основе наблюдения за переходными процессами в энергосистеме.

4. Выполнена оценка влияния гололедно-изморозевых отложений на чувствительность активного волнового ОМП к повреждениям в ЛЭП.

Практическая значимость работы:

1. Способ выбора порога срабатывания волновых измерительных органов на основе анализа статистических параметров шума нормального режима применен при разработке измерительных органов серийных устройств «ТОР 300 ЛОК 550» и «ТОР 300 ВОМП» и макетного образца «ТОР 300 ВОЛНА».

2. Результаты исследований импульсных аномальных процессов учтены при разработке алгоритмов макетного образца «ТОР 300 ВОЛНА».

3. Метод автоматической адаптации активного волнового ОМП к условиям гололедно-изморозевых отложений применен в макетном образце «ТОР 300 ВОЛНА».

4. Способ АПВ кабельно-воздушной ЛЭП с применением методов ОМП реализован в опытном образце «АПВК».

5. Полученная передаточная функция ЛЭП использована при исследовании алгоритмов волнового ОМП.

Методология и методы исследования. Исследования проводились с использованием положений теоретических основ электротехники, теоретических основ релейной защиты, методов математического и физического моделирования, методов математической статистики. Моделирование процессов производилось в среде имитационного моделирования Simulink. Разработка программных модулей велась с использованием программного комплекса MATLAB.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Способ повышения точности и надежности пассивного волнового ОМП на основе обработки статистических параметров шума нормального режима и применения уточненной волновой модели элементов электрической сети для компенсации искажений измеряемых сигналов.

2. Способ повышения точности пассивного одностороннего волнового ОМП на основе анализа волновых рядов.

3. Способ повышения надежности активного волнового ОМП в условиях гололедно-изморозевых отложений на проводах на основе дистанционной оценки увеличения затухания зондирующего сигнала на отдельных участках ЛЭП.

4. Способ селективного автоматического повторного включения кабельно-воздушной ЛЭП с использованием алгоритмов ОМП.

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием обоснованных методов исследования, верификацией результатов теоретических исследований с результатами моделирования процессов и с результатами натурных испытаний на действующих объектах электроэнергетики. Основные результаты работы обсуждались со специалистами и докладывались на конференциях.

Соответствие паспорту специальности. Соответствие диссертации формуле специальности: в соответствии с формулой специальности 2.4.3. Электроэнергетика (технические науки): в диссертационной работе целью исследования является совершенствование теоретической и технической базы одной из областей электроэнергетики с целью обеспечения надёжной передачи электроэнергии, предметом исследования является алгоритмическая база релейной защиты и автоматики, а именно алгоритмы волнового ОМП и их приложение для повышения надежности АПВ.

Соответствие диссертации области исследования специальности: отражённые в диссертации научные положения соответствуют области исследования специальности 2.4.3., а именно:

- к п.6. «Разработка физических и цифровых методов и средств измерения, диагностики и мониторинга состояния изоляции электроустановок высокого напряжения» относится диагностика восстановления изоляции кабельно-воздушной линии в бестоковую паузу цикла АПВ;

- к п.8 «Разработка и обоснование алгоритмов и принципов действия устройств релейной защиты и противоаварийной автоматики для распознавания повреждений, определения мест и параметров повреждающих (возмущающих) воздействий в электрических сетях» относятся разработанные способы повышения точности и надежности методов волнового ОМП.

Апробация результатов исследований. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на республиканских, всероссийских и международных, конференциях: «Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем» («ДНДС», г. Чебоксары, 2011 г.), «Релейная защита и автоматизация энергосистем» («РЗА», г. Москва, 2012 г., г. Санкт-Петербург, 2017 г., г. Сочи, 2023 г.), «Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем» (г. Екатеринбург, 2013 г.), «CIGRE B5 Colloquium. Secure and Efficient Delivery of Energy: Enabled by World Forum for Power Systems» (Новая Зеландия, 2017 г.), «Проблемы и перспективы развития энергетики, электротехники и энергоэффективности» (г. Чебоксары, 2018 г.), «Релавэкспо» (г. Чебоксары, 2019 г., 2021 г., 2023 г.), «Электрические сети» (г. Москва, 2023 г.), всероссийская науч-техн. конф. по релейной защите и автоматизации энергетических систем «Технологический суверенитет России в области РЗА и АСУ ТП и устойчивость в условиях санкционных ограничений» (г. Чебоксары, 2024 г.).

Реализация и внедрение результатов работы. Результаты проведенных исследований и разработок внедрены в алгоритмы устройств производства ООО «Релематика»: серийного изделия «ТОР 300 ЛОК 550», опытно-промышленных образцов «ТОР 300 ВОМП», «АПВК», макетного образца «ТОР 300 ВОЛНА». Устройства проходят апробацию на ВЛ 330 кВ «Выборгская–Восточная» МЭС Северо-Запада

ПАО «ФСК ЕЭС», ВЛ 220 кВ «Майя – Томмот» Амурского ПМЭС ПАО «ФСК ЕЭС», на участке электроснабжения тяговой сети 27,5 кВ «Сортировочная-Тарасиха» филиала ОАО «РЖД» «Горьковская дистанция электроснабжения», ВЛ 35 кВ «Алакуртти-Кайралы» Карельского ПМЭС, КВЛ 110 кВ «Костино – Горенки» ПАО «МОЭСК».

Публикации. Содержание диссертационной работы нашло отражение в 33 научных работах, среди которых 5 статей в изданиях из перечня ВАК и Scopus и 6 патентов на изобретения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы работы, изложено состояние проблемы ОМП, приведен обзор источников информации, сформулированы цели и задачи исследования, представлена структура работы.

Во первой главе выполнено исследование параметров шума нормального и аномального режимов, разработан и исследован метод адаптации к нему волновых измерительных органов.

Шум нормального режима наблюдается в сетях всех классов напряжения. Пример осциллограммы сигнала фазного напряжения $u(t)$ на кабельно-воздушной линии (КВЛ) 330 кВ приведен на рисунке 1а, на рисунке 1б – рабочая величина $u'(t)$ после удаления составляющей промышленной частоты из сигнала $u(t)$. Классический подход к выбору порога срабатывания $v_{уст}$ волновых измерительных органов (ИО) предполагает обеспечение чувствительности к расчетной электромагнитной волне: $v_{уст}=u'_в/k_ч$, где $u'_в$ – рабочая величина ИО в расчетной точке фронта волны, $k_ч$ – коэффициент чувствительности. Контроль селективности отсутствует, необходима выработка критерия определения нижней границы $v_{уст}$ исходя из требования несрабатывания в нормальном режиме.

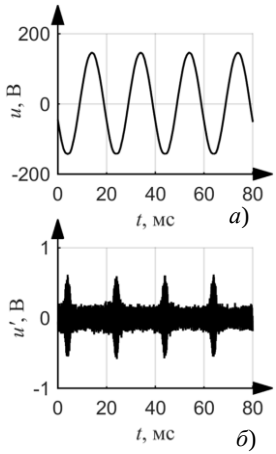

Рисунок 1 – Осциллограмма нормального режима КВЛ 330 кВ: *а* – измеренный сигнал; *б* – шум

Для активного волнового ОМП (ВОМП) с увеличением шума снижается показатель сигнал/шум $SNR=10\lg(P_{отр}/P_ш)$, где $P_{отр}$ – мощность отраженного от места повреждения сигнала, $P_ш$ – мощность шума. Однако, существующий способ с многократным зондированием и когерентным накоплением отраженных сигналов позволяет увеличить *SNR*, поэтому проблема шума не столь актуальна.

Синтез волнового измерительного органа, устойчивого к шумам в сигнале, выполнен с использованием статистических методов. Для описания наблюдаемого сигнала $u(t)$ применена модель:

$$u(t)=\sum u_С(t)+\sum u_П(t)+\sum u_{ПШ}(t)+u_{НШ}(t),$$

где $\sum u_{\text{С}}(t)$ – сумма свободных составляющих переходного процесса энергосистемы; $\sum u_{\text{П}}(t)$ – сумма принужденных периодических составляющих; $\sum u_{\text{ПШ}}(t)$ – сумма периодических квазистационарных компонентов шума; $u_{\text{НШ}}(t)$ – непериодический компонент шума.

Алгоритмы пассивных волновых методов ОМП реагируют на компонент $\sum u_{\text{С}}(t)$. Для подавления прочих компонентов используются частотные фильтры, однако полное подавление невозможно из-за наличия $u_{\text{НШ}}(t)$. Совокупность оставшихся после фильтрации отсчетов $u'(k)$ рассмотрена как последовательность случайной величины V с функцией плотности вероятности f_V, а соответствующие остатки компонентов $\sum u'_{\text{С}}(k)$, $\sum u'_{\text{П}}(k)$, $\sum u'_{\text{ПШ}}(k)$, $\sum u'_{\text{НШ}}(k)$ – как выборки случайных величин X, Y, Z, W с функциями плотностей вероятностей F_X, F_Y, F_Z, F_W соответственно. Пусть измерительный орган (ИО) волновой РЗА строится по традиционной схеме контроля превышения уставки: $|u'(k)| \geq v_{\text{уст}}$, причем уставка $v_{\text{уст}}$ должна быть отстроена от нормального режима. Тогда оценке подлежит функция плотности вероятностей f_V случайной величины V без отслеживаемого компонента X свободного процесса, равная свертке распределений: $f_V=f_Y*f_Z*f_W$. Вероятность p нахождения величины V в интервале $\pm v_{уст}$ вычисляется из соотношения:

$$p=P(|V| < v_{\text{уст}})= \int_{-v_{\text{уст}}}^{v_{\text{уст}}} f_V(y)\ dy, \qquad (1)$$

где P – функция вероятности.

Примеры плотностей вероятности f_1 и f_2 распределения шума в сигналах высокочастотного датчика на ПС 330 кВ Выборгская, измеренных в цепи заземления емкостного трансформатора напряжения с разницей в полтора года, показаны на рисунке 2а. Для обеих кривых наблюдается существенное отклонение от модели нормального распределения ($f_{\text{Н}}$ на рисунке 2а), подтверждаемое критерием согласия Пирсона.

Анализ полученных распределений выявил аддитивное смешивание в наблюдаемых сигналах случайных величин с нормальным и бета-распределением, плотности распределения которых $f_{\text{Н}}$ и f_β соответственно и их свертка $f_{\beta\text{Н}}=f_{\text{Н}}*f_\beta$ показаны на рисунке 2б. Отмечено, что бета-распределением обладают синусоидальные компоненты, причем фазовая и частотная манипуляции не оказывают влияния на характер f_β. Таким образом, статистическая обработка u' и подбор модели f_V смешанного распределения позволяет с заданной вероятностью несрабатывания в нормальном режиме $1–p$ оценить $v_{\text{уст}}$ (1).

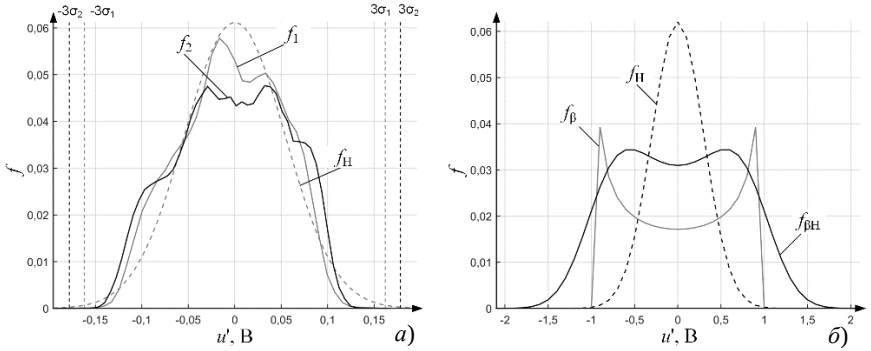

Рисунок 2 – Плотность вероятности распределения: *а* – измеренного шума, *б* – модельная

На практике высокую эффективность показала упрощенная оценка $v_{уст}$=9σ, обеспечивающая отстройку волнового ИО от нормального режима, в том числе при смешанном бета-нормальном распределении шума, и срабатывание в аварийном режиме. Наблюдается высокая чувствительность к фронту волны КЗ, а также к импульсным процессам перед возникновением КЗ. Пример сигнала напряжения, измеренного с помощью электромагнитного ТН на ПС 330 кВ Каменногорская показан на рисунке 3а, на рисунке 3б – тот же сигнал после удаления гармонических компонентов. Пороговые значения ±9σ=±1,1 В (показаны пунктирными линиями) обеспечили фиксацию всех импульсов. Фиксация тех же импульсов на удаленном конце и обработка их двусторонним волновым методом ОМП позволила выявить источник на стороне ПС 330 кВ Каменногорская. В дальнейшем импульсы переросли в однофазное КЗ по причине разрушения трансформатора тока на ПС Каменногорская.

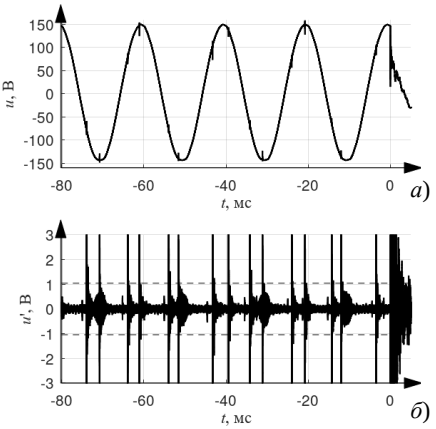

Рисунок 3 – Осциллограмма однофазного КЗ: *а* – измеренный сигнал; *б* – сигнал после фильтрации и границы ±9σ

Разработанный метод анализа шумов применен при настройке порогов срабатывания устройств волнового ОМП ТОР 300 ЛОК 550 и ТОР 300 ВОМП, результаты натурных испытаний на КВЛ 220 кВ Томмот-Майя приведены в таблице 1. Получены положительные результаты испытаний, погрешность автоматической оценки места повреждения $\hat{x}_f$ не превысила 2,8 км, отказов не наблюдалось. Метод применен в алгоритмах макетного образца ТОР 300 ВОЛНА.

Таблица 1 – Погрешность ВОМП при реальных КЗ

№ п/п	Вид повреждения	x_f, км	$\hat{x}_f$, км	$\lvert x_f - \hat{x}_f \rvert$, км	$\lvert x_f - \hat{x}_f \rvert \cdot 100\%/L$, %
1	Фаза А – земля (на тело опоры)	307,6	308,2	0,6	0,14
2	Фаза А – земля (на дерево)	307,7	308,0	0,3	0,07
3	Фазы А и В – земля (грозовое перекрытие через изолятор)	314,4	317,2	2,8	0,64
4	Фаза С – земля (грозовое перекрытие через изолятор)	61,7	60,3	1,4	0,32

Вторая глава посвящена разработке и исследованию метода пассивного ВОМП на основе анализа волновых рядов.

Фиксация отраженных от места повреждения волн помимо шума осложнена их малой амплитудой и наличием альтернативных волн. Пример рабочей величины при КЗ на КВЛ 220 кВ показан на рисунке 4 (нулевой момент времени совмещен с фронтом волны КЗ), первая отраженная от КЗ волна возвращается в место наблюдения после альтернативных волн – через 864 мкс. Погрешность одностороннего волнового метода в данном случае составляет 2,7 км. Выявлена необходимость совершенствования алгоритма одностороннего пассивного ВОМП для обработки всех доступных для наблюдателя отраженных от КЗ волн. Для активного ВОМП альтернативные отражения являются стационарными (координаты точек неоднородностей не меняются), а потому не препятствуют фиксации отражения от аварийной неоднородности.

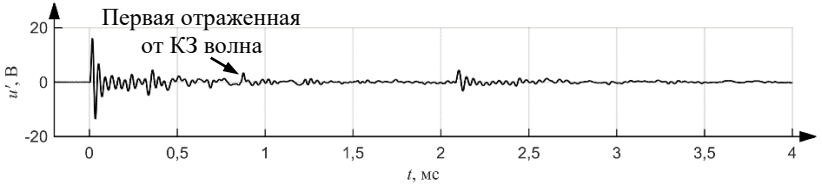

Рисунок 4 – Осциллограмма с множественными отраженными волнами

Начало переходного процесса после коммутации ветви повреждения представляется наблюдателю чередой электромагнитных волн. Момент прихода каждой волны в точку наблюдения линейно зависит от момента повреждения, пройденного волной расстояния и ее скорости. В применении к обособленной однородной двухпроводной ЛЭП (рисунок 5) длиной L, поврежденной на расстоянии x_f от ПС А, может быть составлена система линейных уравнений в матричной форме:

$$\mathbf{A}[x_f \;\; L]^{\mathrm{T}} = \mathbf{T}, \tag{2}$$

где $\mathbf{T} = [t_2 - t_1,\; t_3 - t_1,\; t_4 - t_1, \ldots]^{\mathrm{T}}$ – вектор-столбец времен фронтов волнового ряда относительно первой волны с меткой времени t_1, с; $\mathbf{A}$ [с/м] – матрица, для случая на рисунке 5 имеющая вид:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -2/v & 2/v \\ 2/v & 0 \\ -4/v & 4/v \\ & \ldots \end{bmatrix},$$

где v – скорость распространения волны, м/с.

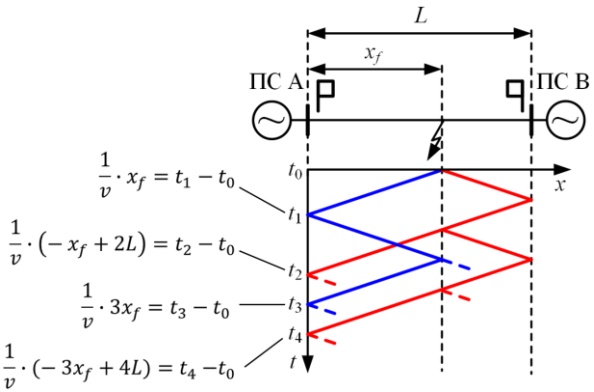

Рисунок 5 – Схема однородной ЛЭП и диаграмма Бержерона волнового процесса

Состав и порядок строк матрицы **A**, называемой далее шаблоном, связан с координатой повреждения x_f. Вид шаблона не меняется при малых изменениях x_f. При бóльших изменениях происходит наложение волн, затем их перестановка, вид шаблона меняется. Интервалы действия и вид шаблонов для первой половины линии представлены в таблице 2 в зависимости от числа обрабатываемых волн. Аналогичным образом формируются шаблоны для второй половины линии и для любого N.

Таблица 2 – Границы и вид шаблонов

Интервал действия шаблона, о.е. от L	**A**		
	N=4	N=3	N=2
[0 1/4]	$\begin{bmatrix} 2/v & 0 \\ 4/v & 0 \\ 6/v & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 2/v & 0 \\ 4/v & 0 \end{bmatrix}$	$[2/v \quad 0]$
[1/4 1/3]	$\begin{bmatrix} 2/v & 0 \\ 4/v & 0 \\ -2/v & 2/v \end{bmatrix}$		
[1/3 1/2]	$\begin{bmatrix} 2/v & 0 \\ -2/v & 2/v \\ 4/v & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 2/v & 0 \\ -2/v & 2/v \end{bmatrix}$	

Разбиение на отдельные подматрицы $\mathbf{A}=[\mathbf{A}_x\ \mathbf{A}_L]$ позволяет получить систему уравнений (3), однородность и переопределенный характер которой при N>2 позволяет выполнить оценку координаты повреждения $\hat{x}_f$ и, при необходимости, длины линии $\hat{L}$ методом наименьших квадратов. Количество решений (3) определяется числом возможных шаблонов при данном N. Минимизация невязки ε (4) позволяет выбрать оптимальный шаблон. Добавление в **T** случайной ошибки в некоторых случаях приводит к выбору смежного шаблона, тем не менее погрешность оценки $\hat{x}_f$ практически не зависит от истинной координаты x_f. Вектор **T** одинаков на обоих концах линии, следовательно присутствует инвариантность решения относительно середины линии. Отсеивание ложного результата предложено с помощью методов ОМП по параметрам аварийного режима (ПАР), обладающих повышенной погрешностью, но не имеющих недостатка зеркальных результатов. Фактически, предложенный метод пассивного ВОМП уточняет результат ОМП по ПАР.

$$\mathbf{A}_x\hat{x}_f = \mathbf{T} - \mathbf{A}_L L. \tag{3}$$

$$\varepsilon = \left\| \mathbf{A}[\hat{x}_f \;\; L]^{\mathrm{T}} - \mathbf{T} \right\|. \qquad (4)$$

Для практической реализации метода в условиях множества альтернативных волн предложен алгоритм последовательного декодирования вектора **T**, полученного с помощью некоторого измерительного органа (задача рассмотрена в предыдущей главе), с наращиваем строк шаблона и прогнозированием следующих элементов **T**. В процессе декодирования оценивается ошибка ε, превышение заданного порога означает несостоятельность шаблона. Пример работы алгоритма на КВЛ 220 кВ Томмот-Майя длиной 434,7 км при реальном КЗ на расстоянии 127,1 км от ПС Томмот по первой модальной составляющей напряжения, показанной на рисунке 6а (основная гармоника удалена), продемонстрирован на рисунке 6б. Вертикальными пунктирными линиями отмечены предполагаемые фронты волн, точка указывает на возможное решение, линия – на непрерывность успешного декодирования без пропуска строк волнового ряда **T**. Для большинства шаблонов выявлены частные решения, не нашедшие развития более N=3, однако два шаблона №6 и №12, первый из которых охватывает истинную координату, развились до N=6, что указывает на высокую вероятность нахождения повреждения в данных точках.

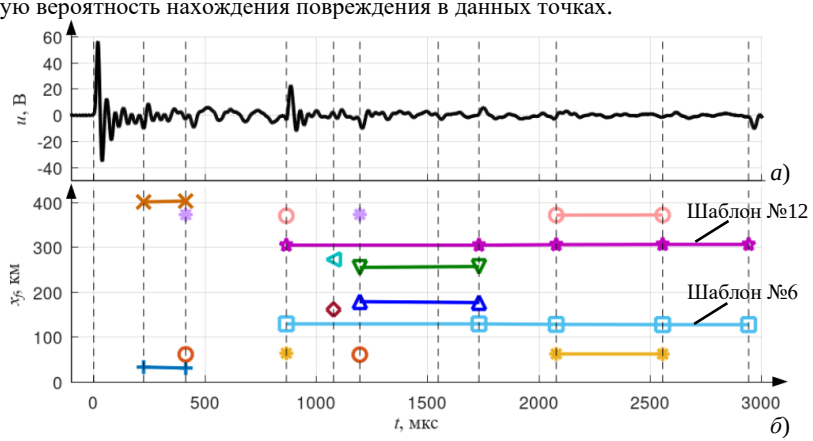

Рисунок 6 – Анализ реального повреждения: *а* – сигнал; *б* – диаграмма развития шаблонов

Этапы декодирования представлены в таблице 3. Погрешность оценки $\hat{x}_f$ при N=2, равная 2,6 км и соответствующая погрешности известного одностороннего метода по одной отраженной волне, снизилась до 1 км с наращиванием N. Положительные результаты получены и для других случаев КЗ на данной линии, что свидетельствует об эффективности разработанного одностороннего способа пассивного ВОМП, не требующего выявления направленности волны, а значит, способного работать непосредственно с метками времени фронтов волн.

Таблица 3 – Этапы декодирования волнового ряда по шаблону №6

Параметр	Номер волны				
	4	8	9	10	11
N	2	3	4	5	6
$\hat{x}_f$, км	305,0	305,0	306,1	306,6	306,6
ε, мкс	0,0	0,0	13,4	10,4	10,4
$x_f - \hat{x}_f$, км	2,6	2,6	1,5	1,0	1,0

В третьей главе представлен способ синтеза волновой модели ЛЭП на основе передаточных функций и определения ее параметров по методу идентификации. Предложен также способ уточнения меток времени фронтов волн с применением данной модели.

Функции $f(t)$, описывающей мгновенный сигнал, поставлено в соответствие изображение $F(p)$:

$$\mathcal{L}\{f(t)\} = F(p),$$

где $\mathcal{L}$ – оператор преобразования Лапласа. Тогда для сосредоточенных элементов сети справедливо:

$$W(p)=F_{\text{вых}}(p)/F_{\text{вх}}(p),$$

где $F_{\text{вх}}(p)$ и $F_{\text{вых}}(p)$ – изображения входного и выходного сигналов соответственно, $W(p)$ – передаточная функция элемента сети. В длинной линии сигналы описываются более сложными уравнениями, требующими эквивалентирования всей электрической сети относительно зажимов линии. Предложен способ упрощенного формирования волновой модели с помощью двух однонаправленных звеньев, описываемых уравнениям бесконечно длинной линии. Для соединения двух двухпроводных длинных линий по схеме на рисунке 7а модель показана рисунке 7б: отдельные звенья передают волну условно в прямом и обратном направлениях. Волна, идущая по линии $W_1(p)$ с волновым сопротивлением $Z_{C1}(p)$, попадает в узел, где линия $W_1(p)$ соединяется с линией $W_2(p)$, волновое сопротивление которой $Z_{C2}(p)$. Волна претерпевает преломление и отражение с соответствующими коэффициентами $K_{\text{П}\,1\,2}(p)=\frac{2Z_{C2}(p)}{Z_{C1}(p)+Z_{C2}(p)}$ и $K_{\text{О}\,1\,2}(p)=\frac{Z_{C2}(p)-Z_{C1}(p)}{Z_{C1}(p)+Z_{C2}(p)}$. Преломленная волна попадает в линию $W_2(p)$, отраженная волна возвращается в $W_1(p)$, но в условно обратнонаправленное звено. Аналогичное звено предусмотрено и для $W_2(p)$, при этом $K_{\text{П}\,2\,1}(p)=\frac{2Z_{C1}(p)}{Z_{C1}(p)+Z_{C2}(p)}$ и $K_{\text{О}\,2\,1}(p)=\frac{Z_{C1}(p)-Z_{C2}(p)}{Z_{C1}(p)+Z_{C2}(p)}$.

Схожим образом построены модели для других соединений на рисунках 8 и 9. Схемы воздействий могут применяться в различных комбинациях для составления эквивалентной схемы сети, при этом изменение схемы приводит лишь к изменению коэффициентов отражения и преломления. Например, при размыкании первой и второй линий на рисунке 7: $K_{\text{П}\,1\,2}(p)=K_{\text{П}\,2\,1}(p)=0$, $K_{\text{О}\,1\,2}(p)=K_{\text{О}\,2\,1}(p)=1$.

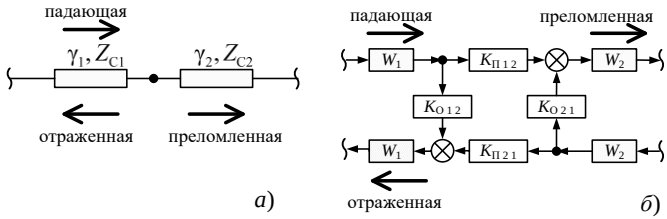

Рисунок 7 – Соединения двух длинных линий: *а* – электрическая схема; *б* – модель

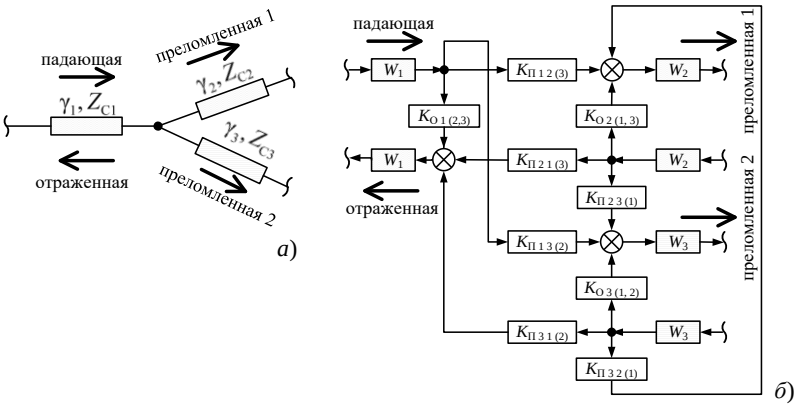

Рисунок 8 – Соединения трех длинных линий: *а* – электрическая схема; *б* – модель

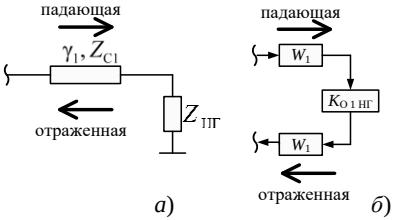

Рисунок 9 – Включение элемента с сосредоточенными параметрами:
а – электрическая схема; *б* – модель

При рассмотрении одной падающей волны до момента возврата в точку наблюдения отраженной волны допустимо рассматривать только преломляющие звенья. На рисунке 10а показан пример двухпроводной ЛЭП, через преобразователи ИП1 и ИП2 с передаточными функциями $W_{ИП1}(p)$ и $W_{ИП2}(p)$ соответственно доступны для наблюдения сигналы $Y_1(p)$ и $Y_2(p)$. По отношению к падающей в линию волне $X'(p)$ схема передачи воздействий показана на рисунке 10б, где $W_{ЛЭП}(p)$ – передаточная функция ЛЭП (5), $K_{П\,ЛЭП\,С2}(p)$ – коэффициент преломления падающей из ЛЭП на шины системы С2 волны. Преобразованная путем переноса воздействий и перестановки звеньев схема показана на рисунке 10в, получена связь $Y_2(p)=W'_Э(p)Y_1(p)$, где $W'_Э(p)=W_{ЛЭП}(p)K_{П\,ЛЭП\,С2}(p)W_{ИП2}(p)/W_{ИП1}(p)$ – эквивалентное звено передачи по отношению к внешнему воздействию.

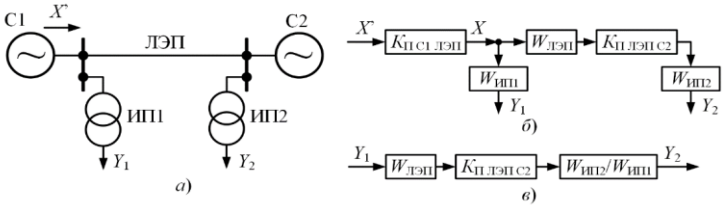

Рисунок 10 – Фрагмент сети при внешнем воздействии: *а* – схема; *б* – модель;
в – преобразованная модель

При нахождении источника X' непосредственно в наблюдаемой ЛЭП эквивалентная передаточная функция в общем случае имеет вид:

$$W''_{Э}(p)=\frac{W_{2ЛЭП}(p)}{W_{1ЛЭП}(p)}\frac{K_{П\ ЛЭП\ С2}(p)}{K_{П\ ЛЭП\ С1}(p)}\frac{W_{ИП2}(p)}{W_{ИП1}(p)},$$

где $K_{П\ ЛЭП\ С1}(p)$ – коэффициент преломления волны, падающей из ЛЭП на шины системы С1, $W_{2ЛЭП}(p)$ и $W_{1ЛЭП}(p)$ – передаточная функция участков справа и слева источника $X'(p)$. Обе функции $W'_{Э}(p)$ и $W''_{Э}(p)$ содержат $W_{Э\ ИП}(p)=W_{ИП2}(p)/W_{ИП1}(p)$, следовательно $W_{Э\ ИП}(p)$ является свойством наблюдаемого объекта.

Для определения передаточной функции исследуемого звена $W'_{Э}(p)$ применен метод идентификации на основе уравнения Винера-Хопфа (5) по наблюдениям за $Y_1(p)$ и $Y_2(p)$ при КЗ, где весовая функция $g(t)$ является оригиналом передаточной функции: $\mathcal{L}(g(t))=W_{Э}(p)$. В предположении ступенчатого характера коммутации ветви КЗ сделан вывод о достаточной для волновой модели репрезентативности идентифицированной передаточной функции.

$$R_{Y_1Y_2}(v)=\int_{0}^{t_1\to\infty} g(t)R_{Y_1Y_1}(v-t)dt, \qquad (5)$$

где $R_{Y_1Y_2}$ – корреляционная функция входного и выходного сигналов, $R_{Y_1Y_1}$ – автокорреляционная функция входного сигнала, $v\in(-t_1, t_1)$.

Описанным методом получена передаточная функция первого модального канала КВЛ 220 кВ по сигналам первой моды напряжения $y_1(t)$ и $y_2(t)$ на двух концах линии при реальном КЗ:

$$W_{Э}(p)=e^{1,459\cdot10^{-3}p}\frac{7,18\cdot10^{-3}p^3+6,47\cdot10^4p^2+7,27\cdot10^9p+1,50\cdot10^{15}}{p^3+1,61\cdot10^5p^2+3,34\cdot10^{10}p+3,46\cdot10^{15}}.$$

Подтвержден устойчивый характер функции $W_{Э}(p)$, выявлен один полюс на частоте 26,7 кГц с постоянной времени затухания 49,8 мкс и один ноль на частоте 142,9 кГц, коэффициент передачи квазистационарной постоянной составляющей (до прихода следующей волны) равен 0,43 о.е. Чистая задержка сигнала составляет 1,459 мс, что соответствует истинной длине линии 434,7 км. Переходная характеристика, АЧХ и ФЧХ в логарифмическом масштабе показаны на рисунках 11б, 11в и 11г соответственно.

Для рассматриваемого КЗ рассчитана и показана на рисунке 11а модель сигнала $\hat{y}_2$ из уравнения:

$$\hat{y}_2(t)=\mathcal{L}^{-1}\{W_{Э}(p)\}*y_1(t),$$

где $\mathcal{L}^{-1}$ – оператор обратного преобразования Лапласа. Модель имеет приемлемую сходимость с истинным сигналом y_2 (рисунок 11а), в том числе вне интервала идентификации, по крайней мере, на следующих 100 мкс.

Модель успешно применена для устранения искажений фронта волны при анализе реальных КЗ на КВЛ 220 кВ, благодаря этому удалось повысить точность фиксации фронта волны на 5 мс по сравнению с работой по измеренным сигналам.

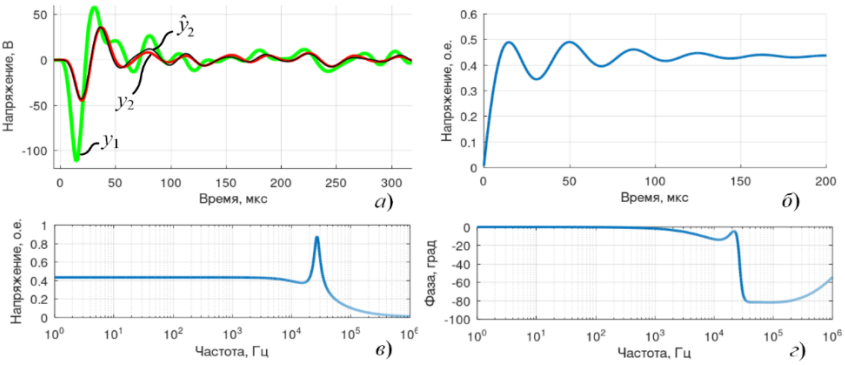

Рисунок 11 – Измерения ИП1, ИП2 и модель (*а*), переходная характеристика, отвечающая передаточной функции $W_Э$ (*б*), и ее АЧХ (*в*) и ФЧХ (*г*)

В четвертой главе разработан способ выявления ГИО на участках ВЛ и выработан критерий адаптации активного ВОМП к условиям повышенного затухания сигнала в ЛЭП.

Гололедно-изморозевые отложения (ГИО) на проводах увеличивают затухание высокочастотных сигналов в ЛЭП, что снижает чувствительность всех видов волнового ОМП. Теоретическое добавочное затухание под действием ГИО α зависит от ряда параметров:

$$\alpha = K(f, Z, T)\lg\left(1 + \frac{d_{ГИО}}{r_п}\right)$$

где $K(f, Z, T)$ – функция частоты f, волнового сопротивления линии Z и температуры ГИО T, $d_{ГИО}$ – толщина стенки ГИО, $r_П$ – радиус провода. Пример зависимости α(T) для линии 35 кВ при $d_{ГИО}$=20 мм показан на рисунке 12. Для пассивного ВОМП необходимо обеспечивать чувствительность к расчетной волне с учетом добавочного α(T). Для активного ВОМП добавочное α(T) имеет критическое значение из-за снижения аварийной составляющей отражения от поврежденной в условиях ГИО линии.

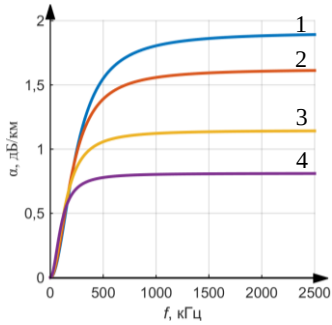

Рисунок 12 – Теоретическое затухание, вносимое ГИО при T=0 °С (кривая 1), –3 °С (кривая 2), –6 °С (кривая 3), –10 °С (кривая 4)

Вносимое ГИО удельное затухание $\alpha_{измn}$ на участке n с границами x_n и x_{n-1} предложено определять как разность удельных затуханий на данном участке в условиях ГИО и без ГИО по (6), двойка в знаменателе учитывает двойное затухание зондирующего сигнала при прохождении прямом и обратном направлениях.

$$\alpha_{измn} = \frac{R_Н(x_n) - R_Н(x_{n-1}) - R_Г(x_n) + R_Г(x_{n-1})}{2(x_n - x_{n-1})}, \quad (6)$$

где $R_Н$ и $R_Г$ – рефлектограммы при отсутствии и наличии ГИО соответственно, дБ.

Теоретическое затухание α в условиях цилиндрической формы ГИО зависит от параметров:

$$\alpha = K(f, Z, T)\lg\left(1 + \frac{d_{\text{ГИО}}}{r_{\text{п}}}\right),$$

где $K(f, Z, T)$ – функция частоты f, волнового сопротивления линии Z и температуры ГИО T, $d_{\text{ГИО}}$ – толщина стенки ГИО, $r_{\text{п}}$ – радиус провода. Зондирование выполняется широкополосным сигналом в диапазоне частот от f_1 до f_2, предложена оценка усредненного затухания $\alpha_{\text{расч}}$ на основе спектральной плотности $A(f)$ зондирующего сигнала:

$$\alpha_{\text{расч}} = \frac{\int_{f_1}^{f_2} A(f)\alpha(f)\mathrm{d}f}{\int_{f_1}^{f_2} A(f)\mathrm{d}f}.$$

Во время опытной эксплуатации устройства активного ВОМП на ВЛ 35 кВ зафиксировано образование ГИО, от службы линий получено значение $d_{\text{ГИО}}$ для одной точки линии. Определена величина $\alpha_{\text{расч}}$ из предположения равенства температур воздуха и провода. В результате зондирования линии измерена рефлектограмма $R_{\text{Г}}$. В таблице 4 приведены оценки $\alpha_{\text{изм}}$ для всей линии, а также при делении линии на три последовательных участка: $\alpha_{\text{изм1}}$, $\alpha_{\text{изм2}}$, $\alpha_{\text{изм3}}$. Получены относительно близкие значения расчетного и измеренного затуханий на всей линии, но существенные расхождения по участкам. Неравномерный характер ГИО подтверждается службой линий.

Таблица 4 – Оценка затухания под влиянием ГИО

№	$d_{\text{ГИО}}$, мм	T, ºС	$\alpha_{\text{расч}}$, дБ/км	$\alpha_{\text{изм}}$, дБ/км	$\alpha_{\text{изм1}}$, дБ/км	$\alpha_{\text{изм2}}$, дБ/км	$\alpha_{\text{изм3}}$, дБ/км
1	70	-6,5	2,01	2,22	1,30	0,99	3,46
2	20	-7,0	1,11	1,74	1,32	0,89	2,57

Для оценки чувствительности метода активного ВОМП к повреждению ЛЭП в условиях ГИО определены количественные параметры отражения. Например, при зондировании ОЗЗ и однофазного КЗ по каналу «поврежденная фаза - земля» составляющая первой моды отраженного напряжения определяется из выражения: $u_{1\text{отр}} = -u_{1\text{пад}}\frac{2Z_1}{2Z_1+Z_0}$, где $u_{1\text{пад}}$ – составляющая первой моды зондирующего сигнала, Z_1 и Z_0 – волновые сопротивления первого и нулевого модального каналов соответственно. Аварийное отражение должно быть различимо на фоне естественных неоднородностей ЛЭП. Оценен нижний порог чувствительности к ОЗЗ, аварийное отражение составляет не менее $D(x_f)$=4,5 дБ, на практике – не менее 6,1 дБ. Предложен критерий оценки чувствительности к повреждениям в условиях ГИО (7), означающий, что внесенное в линию суммарное затухание $\alpha_{\text{изм}\Sigma}(x_f)$ до некоторой точки x_f не должно превышать уровень предполагаемого отражения от повреждения в этой точке. При нарушении (7) опорная РФГ должна быть обновлена в условиях ГИО.

$$D(x_f) > \alpha_{\text{изм}\Sigma}(x_f). \quad (7)$$

На ВЛ 35 кВ выполнен 21 опыт с разными видами КЗ и ОЗЗ на отключенной и включенной ВЛ 35 кВ Алакуртти-Кайралы, результаты приведены в таблице 5. Достигнута высокая точность метода активного ВОМП, определен нижний порог $D(x_f)$. Полученная величина $D(x_f)$ может быть учтена в (7) для принятия решения об обновлении опорной РФГ.

Таблица 5 – Результаты испытаний активного ВОМП на ВЛ 35 кВ Алакуртти-Кайралы

№	x_f, км	Схема замыкания	Состояние линии	$D(x_f)$, дБ	$\hat{x}_f$, км	$\lvert x_f - \hat{x}_f \rvert$, км
1-12	9,15	фаза-земля	Отключена	23,6-55,8	9,2-9,3	0,05 - 0,15
13, 14	9,15	фаза-фаза	Отключена	12,2-67,4	9,2-9,3	0,05 - 0,15
15-17	35,00	фаза-земля	Отключена	15,8-49,8	34,8-34,9	0,15 - 0,20
18, 19	22,85	фаза-земля	Отключена	23,6-38,2	22,7	0,15
20, 21	22,85	фаза-земля	Включена	24,4-38,2	22,7	0,15

Пятая глава посвящена разработке комплекса «АПВК», обеспечивающего автоматическое повторное включение КВЛ только при самоустранении повреждения. Функциональная схема «АПВК» представлена на рисунке 13, фотографии шкафов внутренней и наружной (в месте кабельно-воздушного перехода) установки приведены на рисунках 14а и 14б соответственно. Диагностика КВЛ включает следующие этапы: фиксация метки времени волны напряжения устройствами ВОЛНА2, фиксация замера предаварийных и аварийных величин устройствами АУВ2 и ДТ, зондирование воздушного участка в бестоковую паузу цикла АПВ устройствами ВОЛНА2, обмен данными между устройствами, расчет зоны и места повреждения волновыми методами и по ПАР. Поврежденный участок определяется по замерам ПАР, состояние воздушного участка оценивается по результатам зондирования. Устройство АУВ2 выполняет АПВ КВЛ только при отсутствии повреждения кабеля и самоустранении повреждения воздушного участка.

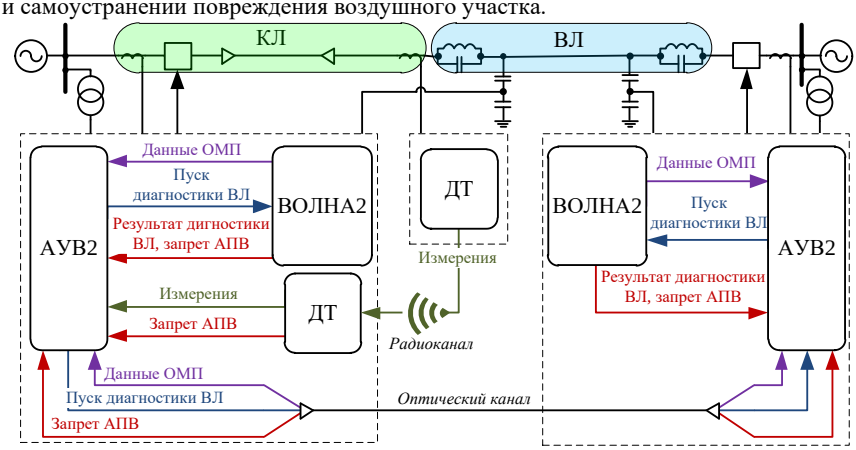

Рисунок 13 – Функциональная схема АПВК

Применен ряд оригинальных для мировой практики технических решений. 1) Передача данных между ДТ выполнена по относительно зашумленному и медленному радиоканалу. Малый объем данных одного замера векторов ПАР при многократном дублировании в течение цикла АПВ обеспечивает высокую надежность передачи. 2) Поврежденный участок выявляется токовым дифференциальным принципом с применением одного замера векторов ПАР с каждого узла линии. 3) Тороидальные трансформаторы тока в месте кабельно-воздушного перехода установлены

поверх основной изоляции кабеля и поверх заземляющего спуска экрана кабеля, фотография приведена на рисунке 14в. Ток жилы кабеля определяется из разности токов данных трансформаторов.

а) *б*) *в*)

Рисунок 14 – Элементы АПВК: *а* – шкаф в оперативном пункте управления; *б* – шкаф в месте кабельно-воздушного перехода; *в* – трансформаторы тока в месте кабельно-воздушного перехода

Комплекс АПВК установлен на КВЛ 220 кВ Костино-Горенки с ответвительной ПС Балашиха длиной 21,6 км. Результаты натурных испытаний при КЗ на воздушной части линии приведены в таблице 6 – при всех металлических КЗ сформирован запрет АПВ, в прочих случаях запрет АПВ отсутствовал. Во второй серии опытов имитировались повреждения кабельного участка с шунтированием одной из фаз на входных клеммах шкафа АПВК, выполнялась постановка КВЛ в транзит. Пуск замеров ОМП по ПАР по набросу токов с последующей блокировкой АПВ по небалансу токов плеч получен во всех случаях. При исправных токах запрет АПВ отсутствовал. Погрешность двустороннего пассивного ВОМП при постановке линии в транзит не превысила 0,1 км. Успешные испытания подтвердили работоспособность комплекса АПВК.

Таблица 6 – Результаты испытаний АПВК при КЗ на воздушном участке

№	Вид повреждения	x_f, км	Сигнал запрета АПВ	$\lvert x_f - \hat{x}_f \rvert$, км
1-5	Все виды КЗ	21,0	+	0,2-0,6
6	Однофазное КЗ	16,1	+	0,1-0,5
7, 8	Однофазное КЗ	16,4	+	0,3
9	Однофазное КЗ	11,4	+	0,1-0,8
10	Однофазное КЗ	5,3	+	0,1-0,7

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Дана оценка негативных факторов, влияющих на методы волнового ОМП. Рассмотрено влияние шумов в измеряемых сигналах, осложняющих фиксацию фронта волны, альтернативных волн перед приходом в точку наблюдения отраженной от места повреждения волны и гололедно-изморозевых отложений на проводах, увеличивающих затухание сигнала в ЛЭП.

2. Разработан способ анализа шумов нормального режима, позволяющий выбрать статистически обоснованный порог срабатывания волновых измерительных органов, обеспечивающий коэффициент чувствительности до 72,7 к волнам КЗ на реальных объектах. Получены положительные результаты применения при натурных испытаниях разработанных устройств «ТОР 300 ЛОК 550» и «ТОР 300 ВОМП» на объектах ПАО «ФСК ЕЭС». Способ реализован в алгоритме автоматической подстройки порога срабатывания в опытном образце «ТОР 300 ВОЛНА».

3. Разработан способ пассивного одностороннего волнового ОМП на основе анализа волновых рядов, обеспечивающий обработку множества связанных с координатой повреждения волн. Способ опробован на осциллограммах реальных КЗ на объекте ПАО «ФСК ЕЭС» и за счет использования нескольких волн показал снижение погрешности ОМП до 2,6 раз по сравнению с классическим односторонним пассивным волновым метод по одной отраженной волне.

4. Разработан способ синтеза волновой модели ЛЭП и идентификации ее параметров на основе наблюдения за коммутациями в электрической сети, дающий возможность вычислять и анализировать передаточные функции реальных ЛЭП. Восстановление искаженных в ЛЭП и измерительных преобразователях сигналов на основе идентифицированной модели обеспечивает повышение точности выявления фронта волны до 5 мкс относительно работы по невосстановленным сигналам.

5. Разработан способ оценки затуханий зондирующего сигнала в ЛЭП с тем, чтобы выявлять наличие ГИО на проводах. Подтверждена возможность выявления реальных условий ГИО по результатам наблюдения за ВЛ 35 кВ «Алакуртти-Кайралы» Карельского ПМЭС. Теоретическая и практическая оценки порога чувствительности метода активного ВОМП позволили выработать критерий запуска обновления опорной рефлектограммы в зависимости от внесенного в линию затухания под влиянием ГИО.

6. Разработан способ селективного АПВ КВЛ на основе методов ОМП, исключающий подачу напряжения на линию при сохранении в ней устойчивого повреждения. Способ применен в опытном комплексе «АПВК» и успешно опробован при натурных испытаниях на объекте ПАО «МОЭСК».

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

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

1. Исмуков, Г. 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. (0,62 п.л. / 0,31 п.л.).

2. Исмуков, Г. 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. Клюшкин, А. С. Шеметов // Электрические станции. – 2021. – №8. – С. 34-40. (0,88 п.л. / 0,08 п.л.). (Izmukov G.N. Field Tests of a Traveling Wave Fault Location Service for Overhead Transmission Lines / V. F. Lachugin, P. S. Platonov, V. G. Alekseev, M. V. Vazyulin, N. N. Mitrofanov, S. G. Popov, G. N. Izmukov, A. N. Podshivalin, S. A. Artyunov, N. G. Klyushkin, A. S. Shemetov // Power Technology and Engineering. – 2022. – Vol. 55, No. 5. – P. 783-789. – DOI 10.1007/s10749-022-01432-5)

3. Исмуков, Г. 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. (0,38 п.л. / 0,13 п.л.).

4. Исмуков, Г. Н. Волновая имитационная модель электрической сети с использованием операторного метода / Г. Н. Исмуков, А. Н. Подшивалин. // Электрические станции. – 2018. – №1. – С. 36-39. (0,5 п.л. / 0,25 п.л.) (Ismukov G. N. Wave simulation model of an electrical network using the operator method / G. N. Ismukov, A. N. Podshivalin // Power Technology and Engineering. – 2018. – vol. 52, № 2 – P.227-230. DOI – 10.1007/s10749-018-0936-y)

5. Исмуков, Г. Н. Устройство автоматического повторного включения кабельно-воздушных линий электропередачи мегаполисов / Д. И. Догадкин, Р. С. Марин, Е. А. Ширшова, Г. Н. Исмуков, А. Л. Куликов, М. Г. Линт, А. Н. Подшивалин. // Электроэнергия. Передачи и распределение. – 2016. – №5 (38). – С. 98-103 (0,75 п.л. / 0,11 п.л.).

Патенты:

6. Пат. 2739433 Российская Федерация, МПК G01R 31/08. Способ определения места повреждения на линии электропередачи / В. Ф. Лачугин, П. С. Платонов, С. В. Иванов, Г. Н. Исмуков, А. Н. Подшивалин, В. Г. Алексеев, М. В. Вазюлин, Н. Н. Митрофанов, С. Г. Попов, А. С. Шеметов. Опубл. 24.12.2020, Бюл. №36. (1,03 п.л. / 0,10 п.л.).

7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2020661473 Российская Федерация. Система волнового определения места повреждения (Система волнового ОМП) / Л. А. Петров, И. А. Капустина, О. Г. Перепелкина, С. В. Иванов, Г. Н. Исмуков, В. Ф. Лачугин, С. Г. Попов, В. Г. Алексеев, Н. Н. Митрофанов, М. В. Вазюлин. – Опубл. 24.09.2020, Бюл. №10. (0,12 п.л. / 0,01 п.л.).

8. Пат. 165635 Российская Федерация, МПК H02H 3/06, G01R 1/00. Устройство автоматического повторного включения кабельно-воздушной линии электропередачи / Д. И. Догадкин, Г. Н. Исмуков, А. Л. Куликов, Р. С. Марин, А. Н. Подшивалин, А. В. Смиронов, Е. А. Ширшова. Опубл. 27.10.2016, Бюл. №30. (0,81 п.л. / 0,11 п.л.).

9. Пат. 2505825 Российская Федерация, МПК G01R 31/08. Способ определения места двойного замыкания многопроводной электрической сети / Ю. Я. Лямец, Ю. В. Романов, П. И. Воронов, Г. Н. Исмуков. Опубл. 27.01.2014, Бюл. №3. (0,69 п.л. / 0,17 п.л.).

10. Пат. 2505826 Российская Федерация, МПК G01R 31/08. Способ определения места и характера повреждения многопроводной электрической сети / Ю. Я. Лямец, Ю. В. Романов, П. И. Воронов, Г. Н. Исмуков. Опубл. 27.01.2014, Бюл. №3. (1,39 п.л. / 0,35 п.л.).

11. Пат. 2492493 Российская Федерация, МПК G01R 31/08. Способ определения места повреждения многопроводной электрической сети при двухстороннем

наблюдении / Ю. Я. Лямец, Ю. В. Романов, П. И. Воронов, Г. Н. Исмуков. Опубл. 10.09.2011, Бюл. №25. (1,16 п.л. / 0,29 п.л.).

Публикации в других изданиях:

12. Исмуков, Г. Н. Опыт эксплуатации системы волнового ОМП на линии электропередачи 220 кВ Томмот-Майя / В. Ф. Лачугин, А. Н. Подшивалин, Г. Н. Исмуков, А. П. Львов // Всероссийская науч.-техн. конф. по релейной защите и автоматизации энергетических систем : сб. докл. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2024. – С. 70-73. (0,25 п.л. / 0,06 п.л.).

13. Исмуков, Г. Н. Распознаваемость коротких замыканий в задаче определения места повреждения по одностороннему наблюдению параметров аварийного режима / А. Н. Подшивалин, Г. Н. Исмуков // Релейная защита и автоматизация энергосистем - 2023: Межд. науч.-практ. конф.: сб. докл. – Москва: АО «СО ЕЭС», 2023. – С. 154-159. (0,75 п.л. / 0,38 п.л.).

14. Исмуков, Г. Н. Идентификация структурной модели участка электрической сети в задаче волнового ОМП / А. Н. Подшивалин, Г. Н. Исмуков // Релейная защита и автоматизация энергосистем - 2023: Межд. науч.-практ. конф.: сб. докл. – Москва: АО «СО ЕЭС», 2023. – С. 160-163. (0,5 п.л. / 0,25 п.л.).

15. Исмуков, Г. Н. Исследование токового пускового органа дистанционной защиты в переходных режимах / А. Н. Подшивалин, Г. Н. Исмуков // Релейная защита и автоматизация энергосистем - 2023: Межд. науч.-практ. конф.: сб. докл. – Москва: АО «СО ЕЭС», 2023. – С. 227-232. (0,75 п.л. / 0,38 п.л.).

16. Исмуков, Г. 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: Изд-во Чуваш. ун-та, 2023. – С. 272-276. (0,31 п.л. / 0,16 п.л.).

17. Исмуков, Г. Н. Применение волновых рядов для ОМП длинных линий электропередачи / Г. Н. Исмуков, А. Н. Подшивалин // Современные тенденции развития цифровых систем релейной защиты и автоматики: сборник докладов научно-технической конференции молодых специалистов «РЕЛАВЭКСПО-2023». – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2023. – С. 54-59. (0,38 п.л. / 0,19 п.л.).

18. Исмуков, Г. Н. Статистический измерительный орган волновых устройств РЗА / А. Н. Подшивалин, Г. Н. Исмуков // Известия академии электротехнических наук РФ. – 2021. – №23. – С. 16-27 (1,5 п.л. / 0,75 п.л.).

19. Исмуков, Г. 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 «РЕЛАВЭКСПО-2021». – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2021. – С. 240-244. (0,31 п.л. / 0,08 п.л.).

20. Исмуков, Г. 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 «РЕЛАВЭКСПО-2021». – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2021. – С. 44-49. (0,38 п.л. / 0,19 п.л.).

21. Исмуков, Г. Н. Испытание волновых устройств защиты и диагностики линий электропередачи / Г. Н. Исмуков, А. Н. Подшивалин // Сборник материалов науч.-техн. конф. молодых специалистов форума «РЕЛАВЭКСПО-2019». – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2019. – С. 8-13. (0,38 п.л. / 0,19 п.л.).

22. Исмуков, Г. Н. Спектральные составляющие переходных процессов при коммутациях в электрической сети / Г. Н. Исмуков, А. Н. Подшивалин, Г. В. Терентьев // Сборник материалов науч.-техн. конф. молодых специалистов форума «РЕЛАВЭКСПО-2019». – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2019. – С. 14-17. (0,25 п.л. / 0,08 п.л.).

23. Исмуков, Г. Н. Задача волнового ОМП секционированных линий распределительных электрических сетей / Г. Н. Исмуков, М. В. Михайлов, А. Н. Подшивалин // Сборник материалов науч.-техн. конф. молодых специалистов форума «РЕЛАВЭКСПО-2019». – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2019. – С. 4-8. (0,31 п.л. / 0,1 п.л.).

24. 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 науч.-техн. конф. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2018. – С. 89-99. (0,68 п.л. / 0,34 п.л.).

25. Исмуков, Г. Н. Волновая имитационная модель электрической сети с использованием операторного метода / Г. Н. Исмуков, А. Н. Подшивалин // Труды академии электротехнических наук ЧР. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2018. – №1. – С. 36-39. (0,25 п.л. / 0,13 п.л.).

26. Ismukov, G. Transmission Line Status Monitoring for Successful Auto-Reclosing / A. Podshivalin, G. Ismukov // Secure and Efficient Delivery of Energy: Enabled by World Forum for Power Systems. CIGRE B5 Colloquium 2017. – Auckland, New Zealand, 2017. – PS3_311. – pp. 1-6. (0,75 п.л. / 0,37 п.л.).

27. Исмуков, Г. Н. Синтез моделей для волновых защит / Г. Н. Исмуков, А. Н. Подшивалин // Релейщик. – 2017. – № 3. – С. 20-22. (0,38 п.л. / 0,19 п.л.).

28. Исмуков, Г. Н. Практический способ определения параметров настройки волновых защит линий электропередачи / А. Н. Подшивалин, Г. Н. Исмуков // Релейная защита и автоматика энергосистем: Материалы междунар. науч.-техн. конф. – Санкт-Петербург, 2017. – С. 881-888. (1 п.л. / 0,5 п.л.).

29. Исмуков, Г. Н. Современный взгляд на ОМП по параметрам аварийного режима / А. Н. Подшивалин, Г. Н. Исмуков // Релейщик. – 2014. – № 3. – С. 21-25. (0,63 п.л. / 0,31 п.л.).

30. Исмуков, Г. 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, 2013. – Режим доступа: http://www.cigre.ru/activity/conference/relayprotect5/conference/speakers/26%20C.1.2-14..pdf. (0,75 п.л. / 0,37 п.л.).

31. Исмуков, Г. Н. Опыт применения системы ОМП исследовательского центра «Бреслер» / А. Н. Подшивалин, Г. Н. Исмуков, А. В. Жарков // Сборник докладов международной выставки-конференции «РЗА-2012» – Москва: 2012. – С. 303-309. (0,44 п.л. / 0,15 п.л.).

32. Исмуков, Г. Н. Интервальная локация повреждений линии электропередачи / Ю. Я. Лямец, А. Н. Подшивалин, Г. Н. Исмуков // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем-2011: Материалы IX Всеросс. науч.-техн. конф. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2011. – С. 251-253. (0,19 п.л. / 0,06 п.л.).

33. Исмуков, Г. Н. Потоки мощности в моделях поврежденной электропередачи / Ю. Я. Лямец, А. Н. Подшивалин, Г. Н. Исмуков // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем-2011: Материалы IX Всеросс. науч.-техн. конф. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2011. – С. 253-256. (0,25 п.л. / 0,08 п.л.).

ИСМУКОВ ГРИГОРИЙ НИКОЛАЕВИЧ

ИССЛЕДОВАНИЕ И РЕАЛИЗАЦИЯ ПАССИВНОГО И АКТИВНОГО ВОЛНОВОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА ПОВРЕЖДЕНИЯ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 01.07.2024 г. Формат 60×84 1/16.
Печ. л. 1,25. Бумага офсетная. Печать оперативная.
Тираж 100 экз. Заказ №813.

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