

На правах рукописи



Смирнов Александр Николаевич

**ВОЛНОВОЙ МЕТОД ДВУХСТОРОННИХ ИЗМЕРЕНИЙ
ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА ПОВРЕЖДЕНИЯ
ВОЗДУШНОЙ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ 110 – 220 КВ**

Специальность: 05.14.02 – Электрические станции и
электроэнергетические системы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Иваново – 2015

Работа выполнена в лаборатории информационно-измерительных и управляющих систем в электроэнергетике Открытого акционерного общества «Энергетический институт им. Г. М. Кржижановского» (ОАО «ЭНИН»).

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор **Панфилов Дмитрий Иванович**,

Официальные оппоненты: **Куликов Александр Леонидович**, доктор технических наук, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, профессор кафедры «Электроэнергетика, электроснабжение и силовая электроника»,

Козлов Владимир Николаевич, кандидат технических наук, ООО «НПП «Бреслер», главный конструктор.

Ведущая организация: **ООО «ИЦ «БРЕСЛЕР»**, г. Чебоксары

Защита состоится « 26 » февраля 2016 г. в 11 часов на заседании диссертационного совета Д 212.064.01 при ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», по адресу: 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34, аудитория Б-237.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, Ученый совет ИГЭУ. Тел.: (4932) 38-57-12, 26-98-61, факс (4932) 38-57-01, e-mail: uch_sovet@ispu.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина».

Текст диссертации размещен http://ispu.ru/files/Dissertaciya_Smirnov.pdf

Автореферат диссертации размещен на сайте ИГЭУ <http://ispu.ru/>.

Автореферат разослан «___» _____ 2015 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
Д 212.064.01,
доктор технический наук,
доцент



Бушуев Евгений Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Воздушные линии (ВЛ) электропередачи 110 – 220 кВ подвержены коротким замыканиям (КЗ) и обрывам проводов. Эти повреждения приводят к перерывам электроснабжения и ухудшению его качества, увеличению потерь электроэнергии, а также – к нарушениям устойчивости работы энергосистемы. Причины возникновения повреждений различны – ухудшение состояния изоляции, воздействие внешних объектов, метеорологические условия.

Важным фактором для быстрого устранения последствий повреждений является точное дистанционное определение места повреждения (ОМП), позволяющее уменьшить зону обхода ВЛ оперативно-ремонтным персоналом электрических сетей. Точность ОМП особенно важна, если на элементах ВЛ отсутствуют видимые следы пробоя, не позволяющие достоверно определить место повреждения при осмотре ВЛ, а также – при успешных автоматических повторных включениях ВЛ, поскольку после устранения повреждения возможно ослабление уровня изоляции ВЛ, ведущее к повторным КЗ.

Наибольшее распространение в России и мире получила группа методов и устройств, осуществляющая измерение параметров аварийного режима на промышленной частоте. Однако погрешность данных методов и устройств составляет не менее 1 – 2 % от длины ВЛ. Поэтому повышение точности ОМП на ВЛ является актуальной проблемой, решение которой позволяет сократить время обнаружения места повреждения.

Степень разработанности темы исследования. Весомый вклад в разработку и исследование методов ОМП внесли Г. М. Шалыт, А. С. Малый, А. И. Айзенфельд, А. П. Кузнецов, Е. А. Аржанников, А.-С. С. Саухатас, Я. Л. Арцишевский, А. Л. Куликов, Д. Р. Любарский, Р. Г. Минуллин, Ю. А. Лямец, L. V. Bewley, T. Takagy, M. M. Saha и многие другие. В представленной работе уделено большое внимание исследованию способов повышения эффективности волнового метода двухсторонних измерений для ОМП. Новый этап в развитии волнового метода двухсторонних измерений, связанный с распространением спутниковых радионавигационных систем и систем цифровой обработки сигналов, начинается в конце XX века. В работах таких ученых как D. Fernandes Jr., W. L. A. Neves, A. M. Elhaffar, M. da Silva, M. Oleskovicz исследуются проблемы распознавания фронтов волн из всей совокупности электромагнитных процессов, имеющих место в линии электропередачи (ЛЭП).

На всех этапах работы автор пользовался консультациями к.т.н., с.н.с., заведующего лабораторией «Информационно-измерительных и управляющих систем в электроэнергетике» ОАО «ЭНИН» В.Ф. Лачугина, внесшего большой вклад в исследования волновых переходных процессов в ВЛ 6 – 1150 кВ.

Объектом исследования в работе являются ВЛ 110 – 220 кВ, **предметом** – волновой метод двухсторонних измерений для ОМП ВЛ 110 – 220 кВ.

Цель работы: Повышение эффективности волнового метода двухсторонних измерений для ОМП ВЛ 110 – 220 кВ.

Для достижения указанной цели в работе решены следующие **задачи:**

1. Анализ современных методов и устройств ОМП.
2. Разработка и исследование способа выделения волнового переходного процесса из совокупности электромагнитных переходных процессов в ВЛ 110 – 220 кВ.
3. Разработка и исследование способа определения времени достижения точки контроля фронтом электромагнитной волны, возникшей в месте повреждения.
4. Разработка аппаратно-программного обеспечения устройства волнового ОМП.

Соответствие паспорту специальности. Работа соответствует паспорту специальности: **в части формулы специальности** – «...В рамках специальности проводятся исследования по развитию и совершенствованию теоретической и технической базы электроэнергетики с целью обеспечения экономичного и надежного производства электроэнергии, ее транспортировки и снабжения потребителей электроэнергией в не-обходимом для потребителей количестве и требуемого качества»; **в части области исследования** – п.9: «Разработка методов анализа и синтеза систем автоматического регулирования, противоаварийной автоматики и релейной защиты в электроэнергетике»; п.12: «Разработка методов контроля и анализа качества электроэнергии и мер по его обеспечению»; п. 13: «Разработка методов использования ЭВМ для решения задач в электроэнергетике».

Научная новизна работы:

1. Предложен способ выделения волнового переходного процесса для повышения эффективности волнового ОМП, отличающийся использованием преобразования фазных токов и напряжений в междуфазные составляющие с учетом геометрии расположения проводов, их удаленности от поверхности земли при вариации значений удельного сопротивления земли, с последующим вычислением аварийных составляющих напряжения падающей волны, что позволяет снизить влияние степени искажения формы электромагнитной волны, распространяющейся от места повреждения.
2. Для повышения точности волнового ОМП предложен способ определения времени достижения фронтом электромагнитной волны точки контроля, отличающийся применением статистических методов для анализа сигналов и помех предшествующего режима во временной области.
3. Разработана имитационная модель расчета переходных электромагнитных процессов в электрических сетях 110 – 220 кВ для предложенных способов повышения эффективности волнового метода двухсторонних измерений для ОМП ВЛ 110 – 220 кВ.
4. Разработаны алгоритмы ОМП волновым методом двухсторонних измерений с применением предложенных способов повышения его эффективности.

Практическая значимость работы:

1. Разработанные для проверки достоверности предложенных способов повышения эффективности волнового ОМП методы имитационного моделирования электромагнитных переходных процессов в электрической сети 110 – 220 кВ могут быть использованы при исследовании задач быстродействующей релейной защиты и устройств автоматики.
2. Результаты разработки и испытаний устройства волнового ОМП, использующего предложенные способы повышения эффективности волнового ОМП рекомендованы для организации производства опытно-промышленных устройств ОМП ВЛ 110 – 220 кВ.
3. Разработанное аппаратно-программное обеспечение устройства волнового ОМП является основой для выполнения многофункционального измерительного устройства с функциями контроля качества электроэнергии и синхронизированных векторных измерений в электрической сети 110 – 220 кВ.

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты разработки и исследования способа выделения волнового переходного процесса из совокупности электромагнитных процессов в ВЛ 110 – 220 кВ, основанного на расчете напряжения падающей волны из междофазных составляющих с последующим вычислением аварийных составляющих.
2. Результаты разработки и исследования способа определения времени достижения фронтом электромагнитной волны точки контроля, основанного на применении статистических методов для анализа сигналов и помех предшествующего режима во временной области.
3. Результаты имитационного моделирования переходных электромагнитных процессов в электрических сетях 110 – 220 кВ и предложенных способов повышения эффективности волнового метода двухсторонних измерений для ОМП ВЛ 110 – 220 кВ.
4. Результаты разработки алгоритма ОМП волновым методом двухсторонних измерений с применением предложенных способов повышения его эффективности.

Методы исследования базируются на фундаментальных положениях теоретических основ электротехники, преобразования и передачи электрической энергии в электрических сетях, теории вероятностей, обработки сигналов, имитационного моделирования.

Степень достоверности диссертационной работы обеспечивается совпадением результатов расчетов, полученных при использовании разработанной имитационной модели, реализованной в программном комплексе АТР/ЕМТР с результатами, опубликованными в научных изданиях и обусловлена использованием положений теоретических основ электротехники, преобразования и передачи электрической энергии в электрических сетях, методов теории вероятностей, методов обработки сигналов и обоснованностью принятых допущений.

Апробация полученных результатов. Основные научные и практические результаты работы докладывались и обсуждались на XIV Международной научно-технической конференции «Интеллектуальная электроэнергетика, автоматика и высоковольтное коммутационное оборудование» («ТРАВЭК»), Москва, 2012 г.; на XIX Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика», Москва, 2013 г. и на Конкурсе молодых специалистов ОАО «ЭНИН», Москва, 2013 г.

Внедрение результатов работы. Результаты работы использовались при подготовке отчетов по договору с ОАО «ФСК ЕЭС» по программе инновационного развития ОАО «ФСК ЕЭС» до 2016 г. с перспективой до 2020 г.

Результаты диссертационной работы защищены патентами на изобретение [5, 6], патентами на полезную модель [7, 8], свидетельствами о государственной регистрации программ для ЭВМ [9, 10], а также внедрены в виде усовершенствованных алгоритмов для ОМП в составе многофункционального устройства, что подтверждено актом внедрения ООО «ИРЗ ТЭК».

Личный вклад соискателя. В работах, опубликованных в соавторстве, соискателю принадлежит:

- В публикациях [1], [3], [5], [11] – результаты разработки и исследования способа выделения волнового переходного процесса из совокупности электромагнитных процессов в ВЛ 110 – 220 кВ, основанного на расчете напряжения падающей волны из междофазных составляющих с последующим вычислением аварийных составляющих.
- В публикациях [1], [2], [3], [4], [6], [7], [11] – результаты разработки и исследования способа определения времени достижения фронтом электромагнитной волны точки контроля, основанного на применении статистических методов для анализа сигналов и помех предшествующего режима во временной области.
- В публикациях [1], [3] – результаты имитационного моделирования переходных электромагнитных процессов в электрических сетях 110 – 220 кВ и предложенных способов повышения эффективности волнового метода двухсторонних измерений для ОМП ВЛ 110 – 220 кВ.
- В публикациях [1], [3], [8], [9], [10] – результаты разработки алгоритма ОМП волновым методом двухсторонних измерений с применением предложенных способов повышения его эффективности.

Публикации. Результаты диссертации опубликованы в 11 работах (5 статей, 2 патента на изобретение, 2 патента на полезную модель, 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ), из них 10 в изданиях, входящих в «Перечень рецензируемых научных изданий».

Структура и объем работы. Диссертация изложена на 209 страницах, имеет 120 иллюстраций, включает титульный лист, оглавление, введение, 4 главы, заключение, список сокращений и условных обозначений, список литературы (113 позиций) и 6 приложений на 14 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой главе «Состояние вопроса исследования. Анализ современных методов и устройств ОМП» показано, что наибольшей точностью среди дистанционных способов ОМП обладают импульсные методы, действия которых не зависят от режимов работы электрической сети. Волновой метод двухсторонних измерений, являющийся частным случаем импульсного метода, выбран для исследования с целью повышения его эффективности, так как в отличие от других импульсных методов – использует сигналы с измерительных трансформаторов и не требует применения генерирующей аппаратуры.

Волновой метод двухсторонних измерений основан на определении времени между моментами достижения концов ЛЭП фронтами электромагнитных волн, возникающих непосредственно в месте повреждения. Зная длину линии L , скорость распространения волны v , время появления фронтов волн по концам линии t_1 и t_2 , расстояние l от точки контроля до места повреждения определяется как

$$l = \frac{L}{2} - \frac{\Delta t}{2} \cdot v. \quad (1)$$

Из выражения (1) следует, что погрешность измерения расстояния до места повреждения при использовании волнового метода двухсторонних измерений зависит от погрешности определения:

- длины ВЛ;
- скорости распространения электромагнитной волны в ВЛ;
- времени достижения волной точки контроля.

Текущее изменение длины ВЛ зависит от природно-климатических факторов, нагрузки по линии, марки проводов, расстояния между опорами в пролете ВЛ. Неточность задания длины ВЛ присуща всем методам ОМП, но устройства использующие импульсные методы, как правило, способны уточнять длину ВЛ. Например, после включения или отключения ВЛ образуется волна, которая отражается от противоположного конца. По времени пробега волны по ВЛ можно уточнить длину ЛЭП.

Скорость распространения волны в ВЛ, как правило, принимается близкой скорости света в вакууме ($0,98 \cdot c - 0,98 \cdot c$, при $c \approx 299793 \frac{\text{км}}{\text{с}}$) в петле «фаза-фаза».

Приближенный выбор значения скорости распространения электромагнитной волны и оценка длины ВЛ окажут меньшее влияние на точность ОМП, чем погрешность метода фиксации фронта волны.

В свою очередь, погрешность определения времени появления фронта электромагнитной волны зависит от:

- погрешности функционирования источника синхронизации;
- точности измерения формы волны по концам ВЛ;
- погрешности метода определения времени достижения фронтом волны конца ВЛ.

В данной работе погрешность синхронизации в точках контроля при исследовании способа ОМП принята постоянной $\Delta t_{\text{синхр}} = 1$ мкс (максимальное отклонение импульса синхронизации). Серийно выпускаемые источники синхронизации обладают меньшей погрешностью (до 100 нс).

Задача повышения эффективности волнового метода двухсторонних измерений решается за счет повышения достоверности распознавания волны и повышения точности определения времени достижения фронтом волны точки контроля.

Во второй главе «Разработка и исследование способа выделения волнового переходного процесса из совокупности электромагнитных процессов в ВЛ 110 – 220 кВ» показано, что при использовании волнового метода важной задачей является получение формы волны наиболее близкой к той, что формируется непосредственно в месте повреждения. Эффективным способом для анализа электромагнитных переходных процессов в многофазной ВЛ является преобразование фазных токов и напряжений к модальным координатам (волновым каналам). Составляющие волнового переходного процесса в модальных координатах распространяются с общей скоростью и одновременно затухают по экспоненциальному закону. Равенство скоростей распространения позволяет получить форму волны с минимальными искажениями после пробега по ВЛ.

Значения напряжений и токов в волновых каналах получены по следующим выражениям:

$$U_m = T_u^{-1} \times U_{ph}, \quad (2)$$

$$I_m = T_i^{-1} \times I_{ph}, \quad (3)$$

где U_m и I_m - матрицы-столбцы модальных напряжений и токов, U_{ph} и I_{ph} - матрицы-столбцы фазных напряжений и токов.

Матрицы преобразований токов T_i и напряжений T_u зависят от геометрии расположения проводов, марок проводов, их удаленности от поверхности земли и удельной проводимости земли. В общем виде матрицы T_u и T_i – комплексные и частотно зависимые. В работе показано, что величина мнимой части элементов матриц не превышает 3 % от действительной части, а изменение элементов матрицы для частот более 1 кГц составляет не более 10 %, что позволит использовать усредненное значение действительной части элементов матриц T_u и T_i при ОМП.

В качестве одного из примеров, иллюстрирующего предложенный подход, в работе рассматривается трехпроводная ВЛ с треугольным расположением проводов (тип опоры П 220-3, марка проводов АС 240/32, один провод в фазе,

марка троса С-70). В этом случае матрицы T_u^{-1} и T_i^{-1} (матрицы обратные T_u и T_i), полученные усреднением в диапазоне 1 кГц – 500 кГц и нормирования элементов по первому столбцу, имеют вид

$$T_u^{-1} \approx \begin{pmatrix} 1 & -4,06 & 2,38 \\ 1 & -0,20 & -0,82 \\ 1 & 0,67 & 0,97 \end{pmatrix}, \quad (4)$$

$$T_i^{-1} \approx \begin{pmatrix} 1 & -4,96 & 2,42 \\ 1 & -0,25 & -0,84 \\ 1 & 0,83 & 1 \end{pmatrix}, \quad (5)$$

где строки характеризуют соответственно первый и второй волновые каналы (междуфазные составляющие) и нулевой волновой канал, а столбцы – фазы линии. На Рисунке 1 условно показано формирование волновых каналов для данной ВЛ.

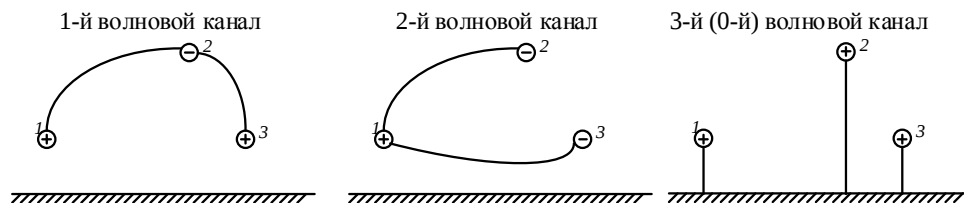


Рисунок 1. Формирование волновых каналов в ВЛ

Каждому волновому каналу ВЛ соответствует своя передаточная характеристика $H(\omega, l)$. Для оценки искажений формы волны в зависимости от длины пробега рассчитаны амплитудно-частотные характеристики $|H(\omega, l)|$ волновых каналов (Рисунок 2 и Рисунок 3) с учетом зависимости T_u и T_i от частоты.

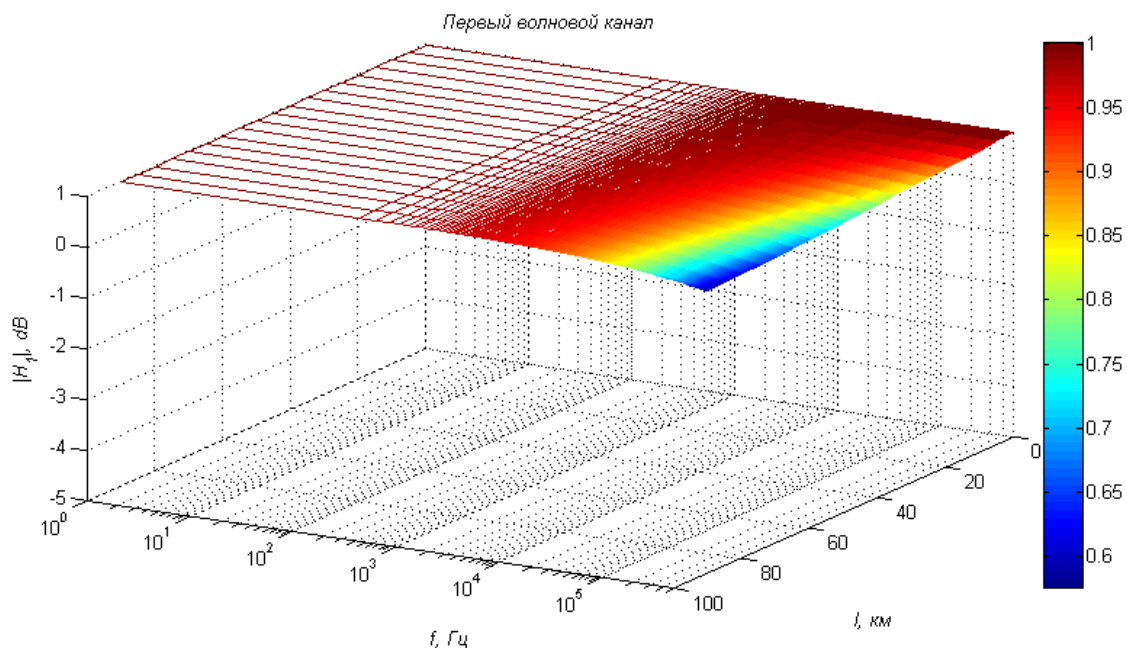


Рисунок 2. Амплитудно-частотная характеристика первого волнового канала в зависимости от длины пробега l

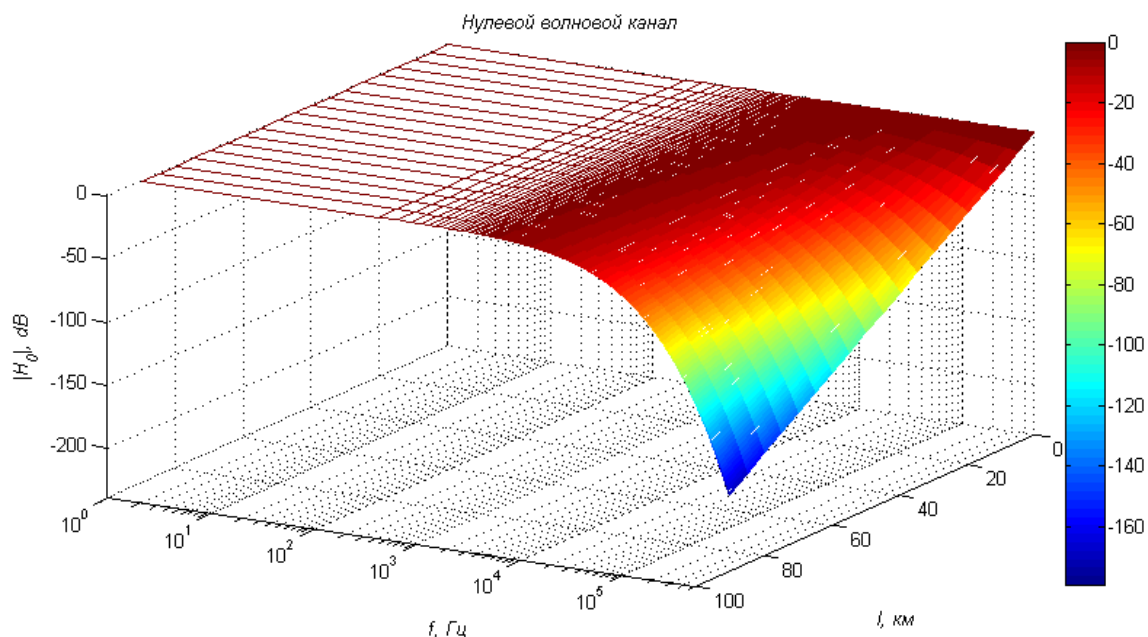


Рисунок 3. Амплитудно-частотная характеристика нулевого волнового канала в зависимости от длины пробега l

По зависимостям на Рисунках 1, 2 и 3 определено, что нулевой канал имеет наиболее высокую степень затухания гармонических составляющих (более 3 дБ для частот выше 3 кГц при пробеге более 10 км), что приводит к существенным искажениям фронта волны, например, при коротком замыкании фазы А на землю (Рисунок 4).

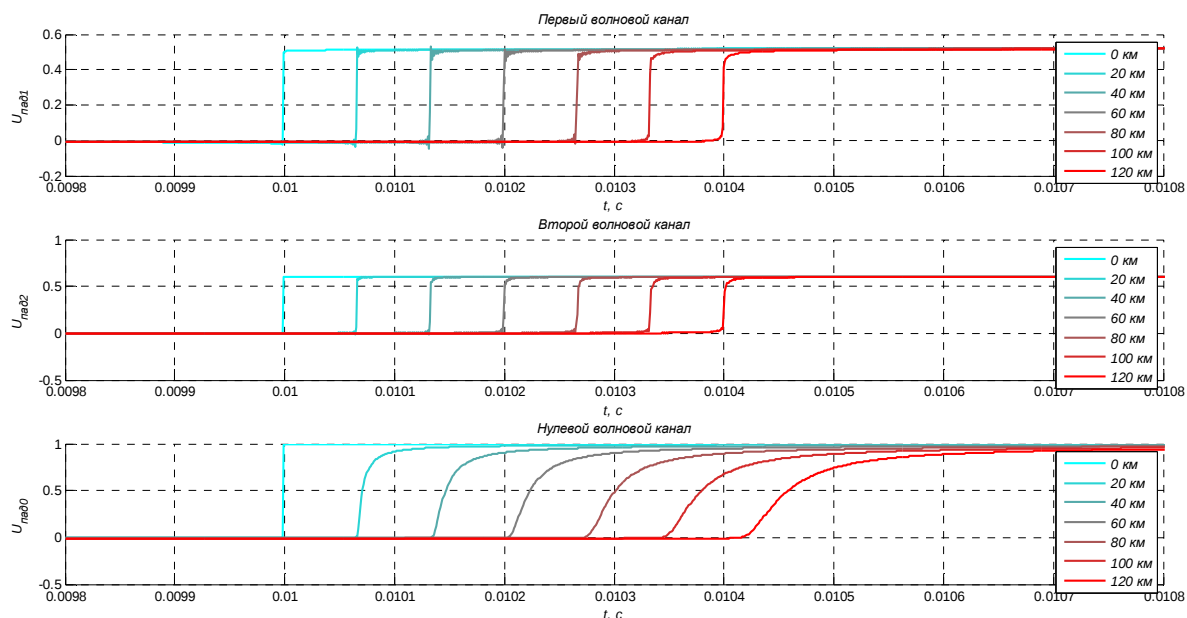


Рисунок 4. Изменения фронтов волны по волновым каналам в зависимости от длины пробега при КЗ фазы А на землю

Таким образом, расчет амплитудно-частотных характеристик волновых каналов и форм волн по каналам показывает целесообразность применения расчета в модальных координатах и использования междофазных волновых каналов (первого и второго) для получения формы волны, наиболее близкой к той, что формируется в месте повреждения.

Места нарушения однородности ВЛ, такие как, транспозиция и в большей степени – ответвления от линии, оказывают влияние на распространение электромагнитных волн в волновых каналах. В местах нарушения однородности происходит преломление и отражение волн. В работе показано, что нарушение однородности не вносит значительного воздействия на форму фронта волны, что позволяет эффективно использовать волновые каналы при практической реализации. Хотя наличие неоднородностей вызывает появление отраженных волн, данное явление не оказывает существенного влияния на погрешность метода двухсторонних измерений, благодаря работе метода на исходных волнах от места КЗ.

Использование высокой частоты дискретизации входных сигналов токов и напряжений линий для максимально точного определения фронта волны требует от измерительных трансформаторов тока (ТТ) и трансформаторов напряжения (ТН) широкой полосы пропускания частот с минимальными искажениями. ТН и ТТ, применяемые на действующих подстанциях, проектируются для измерения сигналов промышленной частоты. Как показал ряд сторонних исследований, ТТ имеют полосу пропускания (на уровне 3 дБ) не менее 100 кГц. Метрологические характеристики ТН не позволяют проводить измерения в полосе частот более нескольких килогерц. Однако волновой метод можно успешно применять как отдельно по токам, либо по напряжениям, так и совместно, но при этом напряжения играют вспомогательную роль. Измерение напряжения позволяет повысить уровень сигнала при ОМП на ВЛ с высоким эквивалентным сопротивлением энергосистемы, где амплитуды тока волны незначительны.

В результате предлагается для получения формы волны, близкой к той, что возникла непосредственно в месте повреждения и уменьшения влияния отраженных волн, применять расчет напряжения падающей волны U_{nad} для волновых каналов по выражению

$$U_{nad} = \frac{U_m + Z_m \times I_m}{2}, \quad (6)$$

где Z_m – величина, характеризующая сопротивление волнового канала, U_m и I_m – напряжение и ток в точке контроля. Для исключения сигнала промышленной частоты и его гармоник применяется расчет аварийных составляющих известными методами.

В третьей главе «Разработка и исследование способа определения времени достижения фронтом электромагнитной волны точки контроля» показано, что сигналы во вторичных обмотках ТТ и ТН имеют сложный состав. К сигналу основной составляющей, кроме гармонических составляющих, «подмешаны» помехи, вызванные коронным разрядом и действием различных высокочастотных сигналов в линии, на подстанции и в окружающей среде. Поэтому помехи во вторичных обмотках ТТ и ТН близки по своим характеристикам к нормально распределенному шуму с равномерной спектральной плотностью.

Точность и достоверность определения фронта волны во многом зависит от используемого математического аппарата. Современными математическими методами определения фронта волны являются анализ сигналов в частотно–

временной области с помощью оконного преобразования Фурье и вейвлет-преобразования. Вейвлет-преобразования позволяют обнаружить сильно локализованные изменения сигналов, в отличие от оконного преобразования Фурье, которое не может одновременно обеспечить высокого разрешения по частоте и по времени. Однако имеются ограничения в применении оконного преобразования Фурье и вейвлет-преобразования в случае низкого отношения сигнал/помеха.

Предлагаемый в диссертации способ определения фронта волны основан на анализе сигналов и помех предшествующего режима во временной области с помощью статистических методов. Использование этих методов позволит уменьшить влияние помех на вычисление времени прихода фронта волны к концам линии и, тем самым, повысить точность ОМП.

Для фиксации времени прихода фронта волны с помощью методов математической статистики предлагается использовать расчет коэффициента эксцесса для аварийных составляющих падающих волн междуфазных волновых каналов, имеющих наименьшую степень искажения формы волны. Коэффициент эксцесса является мерой остроты пика распределения случайной величины и рассчитывается по выражению

$$K_e = \frac{\mu_4}{\sigma^4} - 3, \quad (7)$$

где μ_4 и σ — четвертый и второй центральные моменты статистического распределения соответственно, определяемые как

$$\mu_4 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^4, \quad (8)$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2, \quad (9)$$

где x_i — исследуемый сигнал, n — число точек измерения, $\bar{x}$ — среднее арифметическое значение.

При отсутствии переходного процесса измеряемый сигнал аварийных составляющих определяется уровнем помех в токах и напряжениях ВЛ и подчиняется нормальному закону распределения, поэтому значение коэффициента эксцесса для данного сигнала будет находиться на уровне нуля. При возникновении повреждения начинает распространяться электромагнитная волна в противоположных направлениях от места повреждения. При достижении волны точки контроля аварийные составляющие перестают подчиняться нормальному закону распределения, указывая на факт появления переходного процесса в линии. При этом коэффициент эксцесса сигнала резко возрастает и появление фронта волны фиксируется в момент превышения коэффициентом эксцесса величины заданного порогового значения. Чувствительность коэффициента эксцесса к отклонению распределения функции от нормального закона очень высока. Это позволяет достаточно точно определить факт начала формирования фронта волны (Рисунок 5).

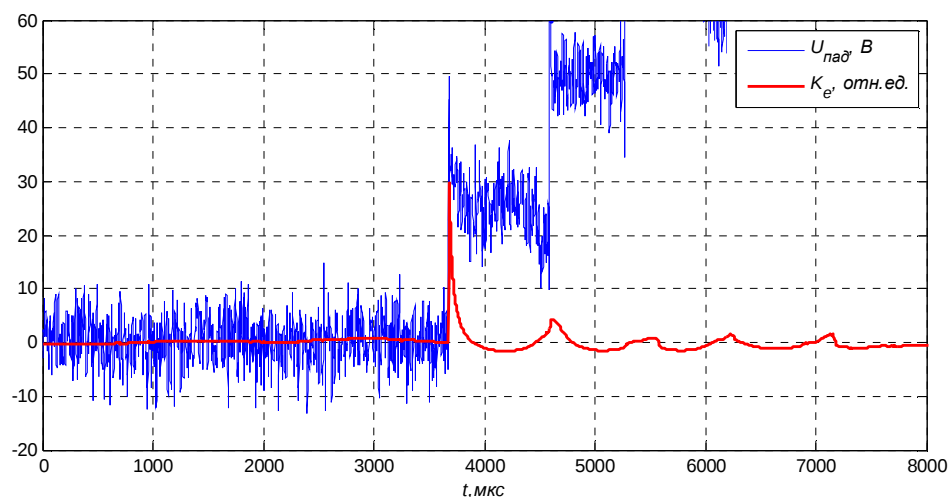


Рисунок 5. Определения фронта волны с помощью коэффициента эксцесса

Для анализа волновых переходных процессов, возникающих при повреждениях в ВЛ, в работе применяется имитационное моделирование, реализуемое в программах АТР/ЕМТР и Matlab/Simulink. При исследовании волновых переходных процессов ВЛ необходимо рассматривать как длинную линию. Поэтому в работе используются частотно зависимые модели ВЛ с распределенными параметрами, с учетом геометрического расположения проводов.

Возможности способа исследованы при различных видах повреждений и параметрах ВЛ с двухсторонним питанием. Проведено имитационное моделирование для одноцепной линии с треугольным расположением проводов и двухцепной линии, рассмотрены различные виды КЗ (однофазные на землю, междуфазные и т.д.), мгновенные значения напряжения в месте КЗ, предшествующие повреждению, величины переходного сопротивления в месте КЗ, длины линии, расстояния до места повреждения, частотные характеристики измерительных ТН и ТТ, а также отношения сигнала/помеха. Во всех случаях способ показал свою высокую чувствительность требуемую для обеспечения высокой точности ОМП.

В качестве примера в Таблице 1 показана погрешность способа (абсолютная Δ и относительная δ) при разных значениях переходного сопротивления R_n при КЗ фазы А на землю. На Рисунке 6 иллюстрируется абсолютная погрешность способа ОМП при различных видах КЗ для ВЛ длиной 90 км с треугольным расположением проводов.

Таблица 1. Погрешность способа ОМП при различных значениях переходного сопротивления в месте КЗ

Δ , м/ε, %	Расстояние до места повреждения, км							
R_n , Ом	10	20	30	40	50	60	70	80
10^{-3}	373/0,41	267/0,29	10/0,01	96/0,10	53/0,05	10/0,01	267/0,29	224/0,24
10	373/0,41	267/0,29	10/0,01	96/0,10	53/0,05	10/0,01	267/0,29	224/0,24
100	373/0,41	267/0,29	10/0,01	53/0,05	53/0,05	10/0,01	267/0,29	224/0,24
1000	373/0,41	267/0,29	10/0,01	53/0,05	53/0,05	160/0,17	267/0,29	373/0,41

Абсолютная погрешность для данной серии экспериментов (при различных значениях R_n) не превышает 373 м, при этом подтверждается отсутствие зависимости погрешности волновых способов от величины переходного сопротивления в месте КЗ. В главе показано, что для всех проведенных серий экспериментов максимальная абсолютная погрешность способа ОМП составляет не более 523 м.

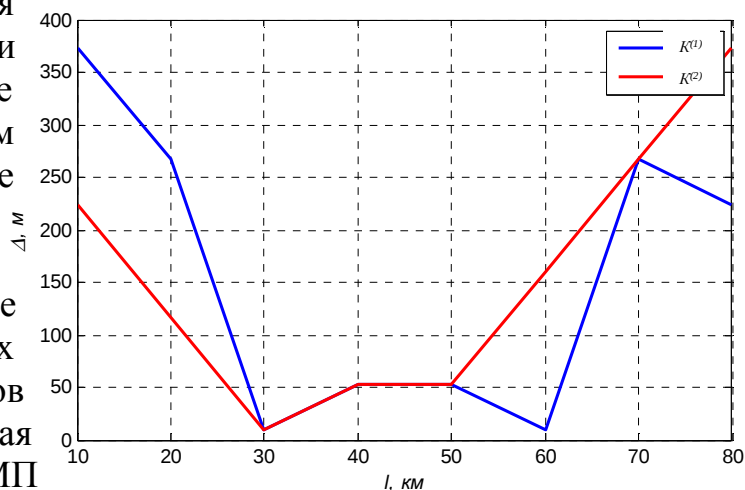


Рисунок 6. Абсолютная погрешность способа ОМП при различных видах КЗ

В четвертой главе «Разработка аппаратно-программного обеспечения устройства ОМП волновым методом двухсторонних измерений» показано, что в настоящее время существует тенденция к интеграции различных средств защиты, автоматики, диагностики и измерения в одно комбинированное устройство. Поставлена задача разработки многофункционального устройства (МФУ) для реализации ОМП волновым методом двухсторонних измерений и предложенных способов повышения эффективности данного метода, а также для централизации средств измерений и диагностики для сетей высокого напряжения 110 – 220 кВ. Основными функциями устройства являются ОМП, измерение показателей качества электроэнергии (ПКЭ) и проведение синхронизированных векторных измерений. Приведенные функции актуальны для электрических сетей 110 – 220 кВ и могут успешно сочетаться в структуре одной аппаратной-программной платформы.

Каждая функция МФУ вносит свои требования к аппаратно-программному обеспечению. Для измерителя ПКЭ предъявляются повышенные требования к метрологическим характеристикам (в соответствии с ГОСТ Р 51317.4.30–2008). Для устройств волнового ОМП эти требования необязательны, но важна достоверность формы сигналов, требующая наличия минимальных нелинейных искажений и широкой частотной полосы измеряемого сигнала. Ставится задача обеспечить одновременное выполнение всех функций, многие из которых (измерение ПКЭ и синхронизированных векторов) должны исполняться в реальном времени, что предъявляет высокие требования к производительности микропроцессорной системы и программному обеспечению.

Проведен анализ нормативных документов, на основе которого сформулированы общие требования к техническим характеристикам МФУ и разработана структурная схема МФУ. Результаты анализа показали, что совокупность технических требований, таких как наличие единого источника синхронизации, требования к частоте дискретизации и разрядности аналогово-цифрового преобразования, а также производительности микропроцессорной системы, позволяют разработать устройство, выполняющее функции ОМП,

измерителя ПКЭ и синхронизированных векторов в рамках одной аппаратной платформы.

МФУ ориентировано на традиционные подстанции, в которых преобразование токов и напряжений сети производится с помощью электромагнитных ТН и ТТ. Измерительный преобразователь МФУ, подключаемый к вторичным цепям этих трансформаторов, производит дискретизацию и квантование аналоговых электрических сигналов. Отказ от интеграции устройства в шину процесса МЭК 61850-9-2 и от применения измерительных трансформаторов, имеющих отличный от электромагнитных трансформаторов принцип работы (например, оптические ТТ, электронные ТН), продиктован тем, что в них применяется цифровой выход по стандартам SV80 и SV256 с частотой дискретизации 80 и 256 отсчетов за период основной частоты. Данные стандарты ограничивают полосу пропускания сигналов на уровнях 2 кГц и 6,4 кГц, что достаточно для целей защиты и измерений, но явно недостаточно для волнового ОМП, которому, например, для погрешности ± 1 км верхняя граница полосы пропускания должна быть не менее 150 кГц. Однако в настоящее время ведутся разработки измерительных ТН и ТТ, в том числе поддерживающих шину процесса, с верхней границей полосы пропускания более 6,4 кГц. Стоит отметить, что в разработанном аппаратном обеспечении МФУ частота дискретизации составляет 1 МГц, что ограничивает минимальную погрешность функции ОМП на ± 150 м.

Модуль синхронизации в МФУ отвечает строгим требованиям к параметрам синхронизации. В устройствах с повышенными требованиями к точности синхронизации, таких как МФУ с функциями волнового ОМП и измерителя синхронизированных векторов, должен применяться источник синхронизации с отклонением от всемирного координированного времени не более 1 мкс, основанный на приемниках спутниковых систем GPS или ГЛОНАСС, либо внешних источниках на основе стандартов IRIG-B или IEEE 1588. В МФУ предлагается использовать источник синхронизации на основе приемника сигналов GPS.

Интерфейсный преобразователь в МФУ одновременно обеспечивает работу всех протоколов, являющихся стандартами, либо рекомендованными для вывода информации и интеграции МФУ в информационную сеть подстанции. Для совместимости с различными системами интерфейсный преобразователь поддерживает МЭК 61850-8-1 (MMS) и Modbus.

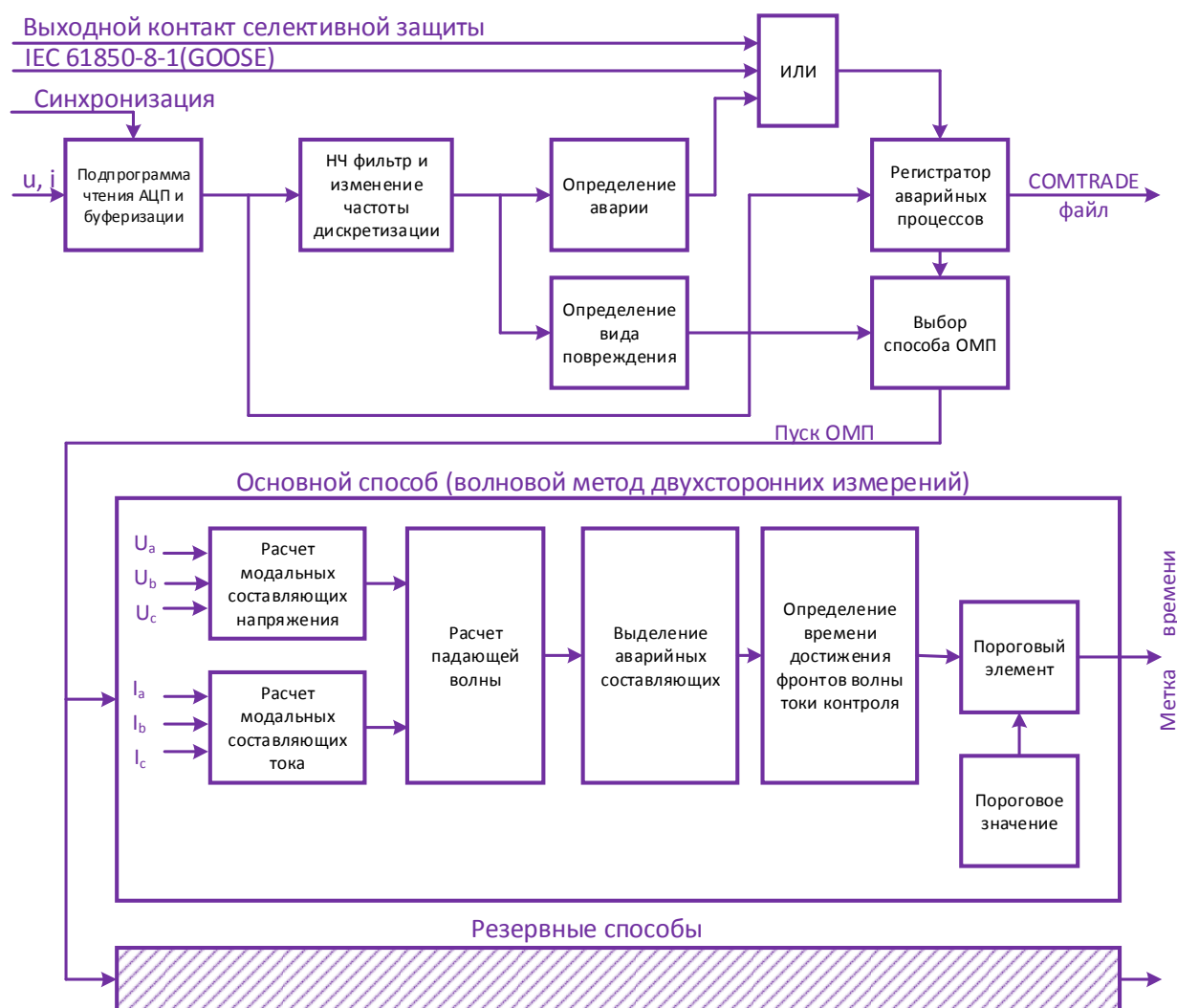


Рисунок 7. Структура программного обеспечения ОМП

Реализация волнового ОМП (Рисунок 7) осуществляется с учетом общих требований к устройствам и способам ОМП, сформулированных в IEEE Std C37.114-2004. Уточненные технические требования к устройству ОМП формулировались по результатам анализа и моделирования работы алгоритмов на математических моделях. Передача результатов не стандартизирована и выбор интерфейсов и протоколов оставлен за разработчиком устройства. Пуск ОМП в устройстве может осуществляться селективной защитой через протокол МЭК 61850-8-1(GOOSE) в случае интеграции в цифровую подстанцию или через дискретный вход при использовании в традиционных подстанциях.

Разработка программного модуля измерения ПКЭ проводилась с учетом ГОСТ Р 51317.4.30–2008 «Методы измерений показателей качества электрической энергии». Для электрических сетей 110 кВ и выше нецелесообразно измерение всего перечня ПКЭ, определенного вышеуказанным стандартом. Наиболее актуальными ПКЭ являются частота, напряжение, провалы напряжения, перенапряжения и несимметрия напряжения. Поскольку в стандарте отсутствуют требования к интерфейсам и протоколам передачи информации, выбор конкретного протокола также оставлен за разработчиком устройства.

Измеритель синхронизированных векторов построен на основе стандарта IEEE Std C37.118-2011, в котором помимо основных понятий и методов

вычисления векторов описан протокол передачи векторов в информационную сеть подстанции.

Предполагается работа способа ОМП по ранее зафиксированной осциллограмме аварийного процесса. Поэтому регистратор (частота дискретизации 1 МГц, измерения синхронизированы с всемирным координированным временем) является сопутствующей функцией волнового ОМП, что позволит дополнить функции МФУ. Осциллограммы выводятся в формате COMTRADE (IEEE Std C37.111-1999), который является стандартом сохранения осциллограммы устройств релейной защиты.

Основные аналитические расчетные соотношения, используемые при разработке алгоритмов вычислений проверялись на имитационных моделях, реализованных в программе MATLAB/Simulink. Оценка результатов моделирования основных функций МФУ показала соответствие всем техническим требованиям.

В главе кратко описаны структурные и функциональные схемы макета МФУ (Рисунок 8), а также приведены особенности аппаратного и программного обеспечения.

Сформулированы задачи экспериментального исследования макета МФУ. К наиболее важным из них относятся:

- проверка работы основных функциональных блоков устройства;
- проверка функционирования основных каналов приема, обработки и передачи информации;
- оценка погрешности синхронизации измерений;
- оценка погрешности ОМП;
- оценка погрешности измерения ПКЭ и синхронизированных векторов.

На основе методики экспериментальных исследований автором разработана программа и методика лабораторных испытаний. Программа и методика лабораторных испытаний является основой программ и методик квалификационных и приемо-сдаточных испытаний для завода изготовителя МФУ – ООО «ИРЗ ТЭК» (Ижевский радиозавод).

Проведен анализ результатов опытно-промышленной эксплуатации макетов МФУ в Верхне-Донской ПМЭС на подстанциях «Тамбовская-500» и «Давыдовская», показавший высокую чувствительность устройства к КЗ.

Под руководством автора осуществлялась доработка конструкторской документации для завода изготовителя. В частности, проведена корректировка перечня элементов и доработка сопроводительной документации. На Рисунке 9

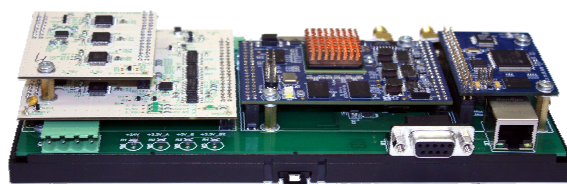


Рисунок 8. Макет МФУ



Рисунок 9. Опытный образец МФУ

представлена фотография опытного образца МФУ – «ЭНИС», разработанного совместно с заводом изготовителем

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предложен и исследован способ повышения эффективности волнового ОМП ВЛ 110 – 220 кВ, отличающийся использованием метода волновых каналов, учитывающего геометрию расположения проводов ВЛ, их удаленность от поверхности земли и значения удельного сопротивления земли, с последующим вычислением аварийных составляющих напряжения падающей волны, что позволит снизить влияние степени искажения формы распространяющейся от места повреждения электромагнитной волны.

2. Предложен и исследован способ определения фронта волны для волнового ОМП ВЛ 110 – 220 кВ, отличающийся применением статистических методов для анализа сигналов и помех предшествующего режима во временной области.

3. Эффективность предложенного способа ОМП подтверждена результатами имитационного моделирования процессов в электрической сети 110 – 220 кВ при различных видах КЗ, мгновенных значениях напряжения в момент КЗ, переходных сопротивлений в месте КЗ и изменениях нагрузки.

4. Разработано аппаратно-программное обеспечение, эскизная конструкторская документация и макеты устройства ОМП, позволяющие в структуре одного устройства реализовывать функции ОМП, измерения показателей качества электроэнергии и синхронизированных векторных значений, а также регистрацию аварийных процессов. Квалификационные лабораторные испытания макетов устройства ОМП подтвердили соответствие устройства заявленным характеристикам. По результатам получены 2 патента на изобретение, 2 патента на полезную модель, 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ и акт о внедрении результатов работы.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В рецензируемых научных изданиях:

1. Лачугин В.Ф., Панфилов Д.И., **Смирнов А.Н.** Реализация волнового метода определения места повреждения на линиях электропередачи с использованием статистических методов анализа данных [Текст] / Лачугин В.Ф., Панфилов Д.И., Смирнов А.Н. // Известия РАН. Энергетика. - 2013. - № 6. - С. 137 – 146.
2. Лачугин В.Ф., Панфилов Д.И., **Смирнов А.Н.**, Образцов С.А., Рывкин А.А., Шими́на А.О. Многофункциональное устройство регистрации процессов, контроля качества электроэнергии и определения места повреждения на линиях электропередачи [Текст] / Лачугин В.Ф., Панфилов Д.И., Смирнов А.Н., Образцов С.А., Рывкин А.А., Шими́на А.О. // Электрические станции. - 2013. - № 8. - С. 29 – 36.
3. V. F. Lachugin, D. I. Panfilov, **A. N. Smirnov** Travelling Wave Fault Location in Power Transmission Lines Using Statistic Data Analysis Methods

- / V. F. Lachugin, D. I. Panfilov, A. N. Smirnov // Thermal Engineering. – 2014. - v. 61. - № 13, pp. 985–991.
4. Lachugin V.F., Panfilov D.I., **Smirnov A.N.**, Obratsov S.A., Ryvkin A.A., Shimina, A.O. A Multifunctional Device for Recording the Monitoring of Electric Power Quality and for Fault Finding on Electric Transmission Lines / Lachugin V.F., Panfilov D.I., Smirnov A.N., Obratsov S.A., Ryvkin A.A., Shimina A.O. // Power technology and engineering. - 2014. - v. 47. - № 5. - pp. 386 – 392.

Патенты и свидетельства:

5. Пат. 2472169 Российская Федерация, МПК G 01 R 31/08. Способ определения расстояния до места повреждения на линии электропередачи [Текст] / Лачугин В.Ф., Панфилов Д.И., Сидорук С.В., Краснышов С.В., Манжелей М.И., Денисов Д.В., Образцов С.А., **Смирнов А.Н.**; заявители и патентообладатели ОАО «ФСК ЕЭС», ОАО «ЭНИН» – № 2011121762; заявл. 31.05.2011; опубл. 10.01.2013. Бюлл. №1.
6. Пат. 2475768 Российская Федерация, МПК G 01 R 31/08. Способ определения расстояния до места повреждения на линии электропередачи [Текст] / Панфилов Д.И., Арутюнов С.А., Горюшин Ю.А., Образцов С.А., **Смирнов А.Н.**, Лачугин В.Ф., Сидорук С.В., Краснышов С.В., Манжелей М.И., Денисов Д.В.; заявители и патентообладатели ОАО «ФСК ЕЭС», ОАО «ЭНИН» – № 2011142836; заявл. 24.10.2011; опубл. 20.02.2013, Бюлл. №5.
7. Пат. 113016, Российская Федерация, МПК G 01 R 31/08. Устройство для определения места повреждения на линии электропередачи [Текст] / Арутюнов С.А., Горюшин Ю.А., Сидорук С.В., **Смирнов А.Н.**, Лачугин В.Ф., Образцов С.А., Панфилов Д.И.; заявители и патентообладатели ОАО «ФСК ЕЭС», ОАО «ЭНИН» – № 2011142837; заявл. 24.10.2011; опубл. 27.01.2012.
8. Пат. 128341, Российская Федерация, МПК G 01 R 31/00. Многофункциональное устройство регистрации процессов на линии электропередачи [Текст] / Панфилов Д.И., Лачугин В.Ф., **Смирнов А.Н.**, Образцов С.А., Ахметов И.М., Рывкин А.А., Шими́на А.О., Артемьев И.Ф., Арутюнов С.А., Горюшин Ю.А.; заявители и патентообладатели ОАО «ФСК ЕЭС», ОАО «ЭНИН» – № 2013105234; заявл. 08.02.2013; опубл. 20.05.2013.
9. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013612374, Программное обеспечение сервера и автоматизированного рабочего места ЭНИС (ПО ЭНИС-АРМ) [Текст] / Артемьев И.Ф., **Смирнов А.Н.**, Панфилов Д.И., Лачугин В.Ф.; заявители и патентообладатели ОАО «ФСК ЕЭС», ОАО «ЭНИН» – № 2013612374; заявл. 26.02.2013; опубл. 20.06.2013.
10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013612409, Встроенное метрологическое программное обеспечение ЭНИС (ПО ЭНИС-метр) [Текст] / **Смирнов А.Н.**, Образцов С.А.,

Артемов И.Ф., Рывкин А.А., Шими́на А.О., Панфилов Д.И., Лачугин В.Ф.; заявители и патентообладатели ОАО «ФСК ЕЭС», ОАО «ЭНИН» – № 2012661760; заявл. 29.12.2013; опубл. 20.06.2013.

В других изданиях:

11. Лачугин В.Ф., Панфилов Д.И., **Смирнов А.Н.**, Образцов С.А., Сидорук С.В. Многофункциональное устройство регистрации процессов и определения места повреждения в ВЛ [Текст] / Лачугин В.Ф., Панфилов Д.И., Смирнов А.Н., Образцов С.А., Сидорук С.В. // Энерго-info. - 2013. - №5. - С. 70 – 74.

Смирнов Александр Николаевич

**ВОЛНОВОЙ МЕТОД ДВУХСТОРОННИХ ИЗМЕРЕНИЙ
ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА ПОВРЕЖДЕНИЯ
ВОЗДУШНОЙ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ 110 – 220 КВ**

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук**

Подписано в печать 22.12.2015 г. Заказ ____

Тираж 100 экз. П.л. 1,25

Отпечатано в типографии «Реглет»

г. Москва, Ленинский пр-т, д. 2

+7 (495) 978-66-63