

*На правах рукописи*



**Ананьев Виталий Вениаминович**

**МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ МНОГОСТОРОННЕГО  
ВОЛНОВОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТ ПОВРЕЖДЕНИЙ НА  
ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ С ОТВЕТВЛЕНИЯМИ**

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Нижний Новгород 2017

Работа выполнена на кафедре «Электроэнергетика, электроснабжение и силовая электроника» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева» (НГТУ)

Научный руководитель: **Куликов Александр Леонидович**  
доктор технических наук, профессор кафедры «Электроэнергетика, электроснабжение и силовая электроника» ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева» (г. Н. Новгород).

Официальные оппоненты: **Хренников Александр Юрьевич**  
доктор технических наук, доцент, учёный секретарь НТС - начальник отдела обеспечения деятельности НТС и НТИ АО «Научно-технический центр Федеральной сетевой компании ЕЭС» (г. Москва),  
**Козлов Владимир Николаевич**  
кандидат технических наук, доцент, главный конструктор ООО «НПП Бреслер» (г. Чебоксары).

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный энергетический университет».

Защита состоится 26.12.2017 г. в 15:00, в аудитории 1315 на заседании диссертационного совета Д212.165.02 при Нижегородском государственном техническом университете им. Р.Е. Алексеева по адресу: 603950 г. Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24, корпус 1.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева» и на сайте <http://www.nntu.ru/content/aspirantura-i-doktorantura/dissertacii>.

Отзывы на автореферат (в двух экземплярах, заверенные печатью), просим направлять по адресу: 603950, г. Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24, корпус 1, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.165.02.

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2017 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.165.02, к.т.н.

Д.Ю. Титов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы диссертации.** Повреждения на воздушных линиях (ВЛ) электропередачи становятся причиной недоотпуска электрической энергии, снижения надежности электроснабжения, нарушений качества электроэнергии и, в ряде случаев, приводят к тяжелым последствиям для потребителей. При этом возникают быстропротекающие переходные процессы, которые со скоростью близкой к скорости света распространяются в виде бегущих волн к концам линии электропередачи (ЛЭП). На этих физических принципах основаны волновые методы определения мест повреждений (ВОМП) ЛЭП, которые позволяют быстро и точно рассчитать расстояние до повреждения.

Несмотря на то, что первые опыты ВОМП ЛЭП известны с 40-х годов прошлого столетия, только в последнее десятилетие соответствующие устройства начали выпускаться серийно и внедряться в практику эксплуатирующих организаций. Этому способствовал технический прогресс в области информационных технологий: высокоскоростного аналого-цифрового преобразования (АЦП), цифровой обработки сигналов (ЦОС), спутниковой синхронизации и навигации, а также развития цифровых коммуникаций. Наиболее известными устройства ВОМП ЛЭП, выпускаемыми отечественными и зарубежными производителями являются: Бреслер-0107.090 (ООО НПП «Бреслер», Россия), ЭНИС (ОАО «ЭНИН», Россия), SEL-T400L (SEL, США), RVP-31x (Reason, Франция), TWS Mk VI (Qualitrol, Канада), TWS FL-8 (Qualitrol, Канада), TFS 2100 (ISA, Италия).

В электротехническом комплексе современных электрических подстанций устройства ВОМП могут применяться как самостоятельно, так и в сочетании с устройствами определением места повреждения (ОМП) по параметрам аварийного режима (ПАР), обеспечивая взаимное резервирование. Особенно это актуально, когда высокие погрешности ОМП по ПАР (до 15-20%) приводят к результатам, выходящим за границы ЛЭП, и не имеют физической интерпретации. Перспективность ВОМП определяется, прежде всего, повышенной точностью (до одного пролета ЛЭП), слабой зависимостью ошибки от длины ЛЭП, что позволяет исключить процедуру расчета зоны обхода из алгоритма действия диспетчерских служб при ликвидации аварии.

Весомый вклад в развитие теории и создания устройств ВОМП ЛЭП внесли российские и зарубежные ученые: А.И. Айзенфельд, Е.А. Аржанников, Я.Л. Арцишевский, В.Н. Козлов, М.В. Костенко, А.Л. Куликов, В.Ф. Лачугин, Д.Р. Любарский, Ю.Я. Лямец, М.Ш. Мисриханов, И.Н. Попов, Г. М. Шалыт, В.А. Шуин, G.B. Ansell, M. Bashir, P. Chen, B. Cory, X. Dong, A. Dwivedi, A. Elhaffar, N. Fisher, M. Kezunovic, Li Jing, M. Lehtonen, S. Lin., Y. Lin, S. Ma, D.J. Spoor, A. Valenti, B. Wang, L.M. Wedepohl, Z. Yining, X. Zeng, и др.

Анализ научно-технической литературы показывает, что при реализации ВОМП ЛЭП в полной мере не использован потенциал имитационного модели-

рования для повышения точности расчета расстояния до места повреждения. Развитие специализированных программных средств, таких как PSCAD, позволяет более точно воспроизводить волновые процессы на ЛЭП, исследовать возникающие ошибки ВОМП и применять методы имитационного моделирования для их компенсации.

Важнейшим ресурсом сокращения времени ликвидации аварий в схемах электроснабжения с применением разветвленных ЛЭП является избыточность информации. Причем, собственники потребительских подстанций могут устанавливать дополнительные устройства ВОМП для выявления повреждений на участках ЛЭП, находящихся в зоне их эксплуатационной ответственности. Таким образом, синхронизированные многосторонние измерения и пространственное расположение устройств ВОМП на ЛЭП с ответвлениями определяют перспективность применения навигационных подходов.

**Цель работы:** Разработка методов ОМП повышенной точности на ВЛ с ответвлениями, основанных на регистрации волновых процессов и результатах имитационного моделирования.

**Основные задачи исследования.** Для достижения поставленной цели в диссертации реализован следующий комплекс задач:

1. Сравнительный анализ различных методов и средств ВОМП ЛЭП, выявление особенностей и вариантов их применения.
2. Определение факторов, влияющих на точность ВОМП ЛЭП, и разработка алгоритмов компенсации погрешностей с использованием моделирования в программном обеспечении PSCAD.
3. Исследование возможностей навигационного подхода с целью формирования новых способов многостороннего ВОМП повышенной точности на ЛЭП с ответвлениями.
4. Корректировка результатов методов ВОМП ЛЭП по данным эксплуатационной статистики.
5. Разработка устройства для реализации ВОМП с возможностью установки на ЛЭП с ответвлениями.
6. Апробация алгоритмов и разработанного устройства ВОМП на ЛЭП с ответвлениями на предприятии электрических сетей.

**Обоснование соответствия диссертации паспорту научной специальности 05.09.03 - «Электротехнические комплексы и системы».**

*Соответствие диссертации формуле специальности:* в соответствии с формулой специальности 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы» в диссертационной работе **объектом** исследования являются воздушные линии электропередачи с ответвлениями, как составная часть электротехнических комплексов и систем электроснабжения, **предметом** исследования являются методы повышения точности алгоритмов ВОМП на ЛЭП с ответвлениями.

*Соответствие диссертации области исследования специальности:* пред-

ставленные в диссертационной работе результаты отвечают следующим пунктам паспорта специальности:

- п. 1 Развитие общей теории электротехнических комплексов и систем, изучение системных свойств и связей, физическое, математическое, имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем;

- п. 2 Обоснование совокупности технических, технологических, экономических, экологических и социальных критериев оценки принимаемых решений в области проектирования, создания и эксплуатации электротехнических комплексов и систем;

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

**Методы научных исследований.** Разработанные в диссертации научные положения основываются на использовании комплекса теоретических и экспериментальных достижений в области теоретических основ электротехники, теории электромагнитных и электромеханических переходных процессов, теории радионавигации, имитационного моделирования и цифровой обработки сигналов.

#### **Научная новизна.**

1. Предложено применение навигационных подходов для ВОМП на ЛЭП с ответвлениями, отличающихся повышенной точностью ОМП за счет многосторонней фиксации электромагнитных волн на концах ЛЭП.

2. Разработаны методы компенсации погрешностей ВОМП ЛЭП с применением имитационного моделирования в программном обеспечении PSCAD. Методы отличает возможность индивидуализировать ВОМП под особенности технического исполнения и изменения эксплуатационных параметров ЛЭП.

3. Разработано устройство, позволяющее реализовать ВОМП на ЛЭП с ответвлениями. Отличительной особенностью устройства является возможность регистрации проходящих электромагнитных волн с использованием как трансформаторов тока, так и высокочастотного присоединения ЛЭП.

4. Исследовано применение эксплуатационной статистики повреждений ЛЭП для повышения точности ВОМП. Технические решения ВОМП ЛЭП защищены патентами.

#### **Практическая значимость работы.**

1. Предложенные способы многостороннего ВОМП на ЛЭП с ответвлениями позволяют повысить точность расчета расстояния до повреждения от 1,5 до 10 раз. Способы могут быть внедрены в существующие устройства ВОМП ЛЭП без переработки аппаратной части.

2. Предложены методы учета эксплуатационной статистики повреждений для повышения точности ВОМП ЛЭП. Методы позволяют адаптировать ВОМП к параметрам конкретной ЛЭП.

3. Разработанное устройство ВОМП может найти применение на ЛЭП различной конфигурации. В настоящее время устройство находится в опытной эксплуатации в филиале ОАО «МРСК Центра и Приволжья» - Нижновэнерго на ВЛ 110кВ «Кулебаки-Сапфир» на ПС 110/35/6 «Кулебаки» и ВЛ 110кВ «Сапфир-Дивеево» на ПС 110/35/6 «Дивеево».

4. Материалы исследований используются в учебном процессе Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева; реализованы в прикладном научном исследовании (ПНИ) «Разработка интеллектуальной релейной защиты с характеристиками, не зависящими от режимов работы активно-адаптивной электрической сети» в составе экспериментального образца.

**Достоверность результатов** исследования подтверждается опытами имитационного моделирования ВОМП на ЛЭП с ответвлениями. Результаты имитационного моделирования сопоставлялись с известными данными, полученными в этой области другими авторами, а также с опытом применения устройств ВОМП на ЛЭП ПАО «ФСК ЕЭС».

#### **Основные положения, выносимые на защиту.**

1. Результаты сопоставительного анализа методов и средств ВОМП, а также особенности их применения на ЛЭП различного технического исполнения.

2. Оценки погрешностей ВОМП ЛЭП из-за воздействия влияющих на ошибку факторов и способы их компенсации.

3. Новые алгоритмы многостороннего ВОМП ЛЭП с ответвлениями, основанного на навигационных принципах.

4. Методы учета эксплуатационной статистики для повышения точности ВОМП ЛЭП.

5. Аппаратное исполнение устройства для применения при многостороннем ВОМП на ЛЭП с ответвлениями.

**Личный вклад аспиранта.** Постановка и формализация задач, разработка теоретических и методических положений, математических моделей и методов, проведение имитационного моделирования ВОМП ЛЭП, анализ результатов, а также практические рекомендации.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационной работы докладывались на научно-технических конференциях: международная молодежно-техническая конференция «Будущее технической науки» (Н. Новгород, 2013, 2015 г.), XIX нижегородская сессия молодых ученых (Н. Новгород, 2014 г.), 5-я международная научно-техническая конференция «Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем» (РНК СИГРЭ, Сочи, 2015 г.), всероссийская научно-техническая конференция «Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем» (Чебоксары, 2015 г.), научно-техническая конференция «Актуальные проблемы электроэнергетики», (Н. Новгород, 2015 г.), международный семинар имени Ю.Н. Руденко «Актуальные проблемы надежности систем энергетики» (Минск, 2015 г.), VI

международная молодежная научно-техническая конференция «Электроэнергетика глазами молодежи» (Иваново, 2015 г.), X всероссийская научно-техническая конференция «Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике» (Чебоксары, 2016 г.).

**Опубликованные работы.** По теме диссертации опубликовано 26 работ, из них 7 в рецензируемых изданиях по списку ВАК, 4 в рецензируемых изданиях по списку Web of Science и Scopus, 4 патента на изобретение.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы из 256 наименований и 6 приложений. Работа изложена на 190 страницах основного текста, иллюстрирована 158 рисунками и 39 таблицами.

**Работа выполнена** при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (соглашение № 14.577.21.0124 о предоставлении субсидии от 20.10.2014г., уникальный идентификатор проекта RFMEFI57714X0124; соглашение № 14.577.21.0244 о предоставлении субсидии от 26.09.2017г., уникальный идентификатор проекта RFMEFI57717X0244).

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, поставлена цель, определены решенные научные задачи и новизна исследований. Приведена теоретическая и практическая значимость работы, а также сведения об апробации и внедрении ее результатов.

**В первой главе** отражены особенности ВОМП ЛЭП, уточнена классификация методов, а также выполнен сравнительный анализ технических решений устройств ВОМП воздушных ЛЭП.

Точное определение расстояния до места повреждения на воздушных ЛЭП является важной научно-технической задачей, решаемой в течении нескольких десятилетий. Устройства, использующие для этого волновые переходные процессы, возникающие при повреждениях ЛЭП, появились сравнительно недавно (таблица 1). Методы ВОМП основаны на синхронизированной регистрации токов и напряжений по концам ЛЭП с последующей специальной обработкой сигналов для выделения импульсных сигналов. Наиболее широкое распространение для магистральных ЛЭП получили методы двухстороннего ВОМП (рисунок 1(а)), расчет расстояния до повреждения по которым выполняется согласно выражения

$$d = \frac{L}{2} + \frac{v \cdot (t_i - t_j)}{2}, \quad (1)$$

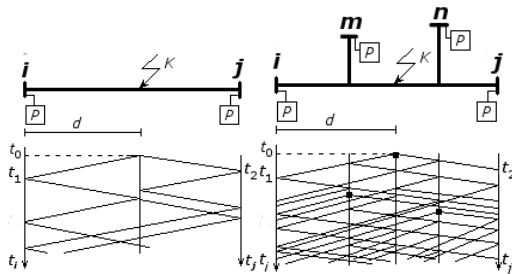


Рисунок 1 – Принцип реализации двухстороннего (слева) и многостороннего (справа) ВОМП

где  $v$  – скорость распространения электромагнитной волны;  $L$  – длина линии;  $t_i$  и  $t_j$  – время регистрации волны по концам ЛЭП.

Для воздушных ЛЭП с ответвлениями задача ВОМП носит более сложный характер и установкой лишь двух специализированных устройств в полной мере не решается из-за возникающей неопределенности при повреждении на ответвлениях (рисунок 1(б)).

Несмотря на многократные переотражения волновых сигналов от концов ЛЭП и мест ответвлений (рисунок 1), методы двух- и многостороннего ВОМП используют лишь первые зарегистрированные волновые импульсные сигналы на концах линии для расчетов расстояния до места повреждения. Важно отметить, что при установке регистрирующих устройств на всех концах ответвлений ЛЭП (рисунок 1(б)) возникает информационная избыточность, ресурс которой целесообразно использовать для уточнения расстояния до повреждения.

Важно отметить, что точность ВОМП, в отличие от ОМП по ПАР, не зависят от режима функционирования электрических сетей, слабо зависят от сопротивления повреждения и ряда других факторов, что обеспечивает перспективность применения устройств ОМП различного технического исполнения (таблица 1).

С учетом высокой синхронизации измерений на ответвлениях воздушных ЛЭП (до десятков-сотен наносекунд) основным фактором, определяющим точность ВОМП (выражение 1) является скорость распространения электромагнитных колебаний. Эта скорость зависит прежде всего от конструктивных особенностей исполнения отдельных участков воздушных линий, текущих температурно-влажностных условий и ряда других параметров, выражающихся в изменяемых реактивных параметрах ЛЭП. Причем ресурс имитационного моделирования и избыточность многосторонних измерений целесообразно направить на повышение точности ВОМП воздушных ЛЭП с ответвлениями.

**Во второй главе** рассмотрены факторы, влияющие на точность ВОМП воздушных ЛЭП, определены количественные характеристики влияния. Выполнен анализ методов компенсации ошибок ВОМП с применением имитационного моделирования.

Диспергирующий характер среды распространения электромагнитных волн по воздушным ЛЭП при повреждениях определяет основные ошибки ВОМП. Реактивное сопротивление ЛЭП обуславливает различную скорость распространения частотных составляющих фронта электромагнитной волны, приводит к его искажению, распространению на отдельных участках с различной групповой скоростью, отличной от принятой в расчетах.

Возможный диапазон изменения параметров ЛЭП определяется изменением погодных условий, которые влияют прежде всего на удельное сопротивление грунта и стрелу провеса провода в полете воздушной ЛЭП и др. Изменение таких характеристик вносит ошибки ВОМП, дополняющие идеализированные аппаратные погрешности, принятые различными производителями (таблица 1).



Таблица 1 – Сопоставительный анализ современных устройств ВОМП

Параметр сопоставления	HPR7000 (прототип)	RVP-31x	TWS Mk VI	TWS FL-8, TWS FL-1	IDM+	TFS 2100	SEL-T400L, SEL-411L	Бреслер-0107.090	ЭНИС
Страна	Китай	Франция	Канада	Канада	Канада	Италия	США	Россия	Россия
Производитель	Tsinghua Univ.	Reason	Qualitrol	Qualitrol	Qualitrol	ISA	SEL	Бреслер	ЭНИН
Функциональные возможности <sup>1</sup>	РАС, ОМП ПАР, ВОМП	РАС, ВОМП, ОМП ПАР, СВИ	ВОМП	ВОМП	РАС, СВИ, ОМП ПАР и ВОМП	ВОМП	ВОМП	ВОМП	ВОМП, измерение ПКЭ, РАС
Область применения	магистральные электрические сети	нет данных	линии 6-750 кВ	линии 6-750 кВ	линии 6-750 кВ	линии 6-220 кВ, передачи постоянного тока	линии 6-750 кВ	линии 6-750 кВ	линии 110-1150 кВ
Методы ОМП	двухсторонний метод ВОМП, ОМП ПАР	двухсторонний метод ВОМП	двухсторонний метод ВОМП	двухсторонний метод ВОМП	двухсторонний метод ВОМП, ОМП ПАР	одно- и двухсторонний метод ВОМП	одно- и двухсторонний метод ВОМП	двухсторонний метод ВОМП	одно- и двухсторонний метод ВОМП
Заявленная погрешность, м	нет данных	нет данных	150	60	60	50-500	25-300	нет данных	500
Частота дискретизации	1 МГц	5 МГц	1,25 МГц	1,25-20 МГц	1,25-20 МГц	0,5-4 МГц	1 МГц	2,5 МГц	1 МГц
Фиксация импульса повреждения	пороговая уставка по току	пороговая уставка по току, напряжению и мощности	пороговая уставка по току	пороговая уставка по току	пороговая уставка по току	пороговая уставка по току и напряжению	пороговая уставка по току с контролем полярности напряжения	пороговая уставка	пороговая уставка по коэф. эксцесса напряжения пад. волны волн. канала
Точность синхронизации времени	1 мкс	0,1 мкс	1 мкс	0,1 мкс	0,1 мкс	1 мкс	0,1 мкс	1 мкс	1 мкс
Интерфейсы	CAN Com.Card	Ethernet (2xRJ45, 2xST), RS232	RS232, Ethernet RJ45, ModemRJ11	3 x RS232, RS485, Ethernet (2xRJ45, 1xST), PSTN v.90, USB	2 x Ethernet RJ45, 3 x RS232, RS485	2 x RS232, Ethernet RJ45	USB 2.0 B, Ethernet (2xSFP), Fiber Optic Serial Port (ST)	USB A, mini-USB, RS422, RS485, Ethernet RJ45	Ethernet RJ45, RS232
Поддерживаемые протоколы	CAN 2.0	IEC 61850-8-1 (MMS), IEEE C37.118.1/2-2011, IEEE C37.118.1a-2014, Modbus, DNP3.0, SNTP, HTTP	DNP3.0, PPP, HTTP	IEC 60870-5, IEC 61850 (GOOSE), Modbus, NTP, ITO V.90, HTTP	IEEE C37.118 2005, IEC 61850 (GOOSE), IEC 60870-5, DNP3.0, PPP	IEC61850-8, IEC60870-5, DNP3.0	IEC 61850 (MMS), GOOSE, IEC 60870-5-101/104, DNP3, Modbus, FTP, Telnet, IEEE Std. C37.111-2013	IEC 60870-5-103, IEC 60870-5-101, IEC 60870-5-104, IEC 61850	IEC 61850-8-1 (MMS), Modbus, FTP

**Примечание:** <sup>1</sup> РАС – регистратор аварийных событий, СВИ – синхронные векторные измерения, ПКЭ – показатели качества электроэнергии.

Например, на рисунке 2 приведены ошибки ВОМП при изменении погодных условий, соответствующих средней полосе России, для ЛЭП напряжением 220 кВ, выполненной на промежуточных опорах П 21, П 220-2 и ПБ 220-4. Зависимости (рисунок 2) получены путем имитационного моделирования в программном комплексе PSCAD, длина ВЛ была принята 105 км.

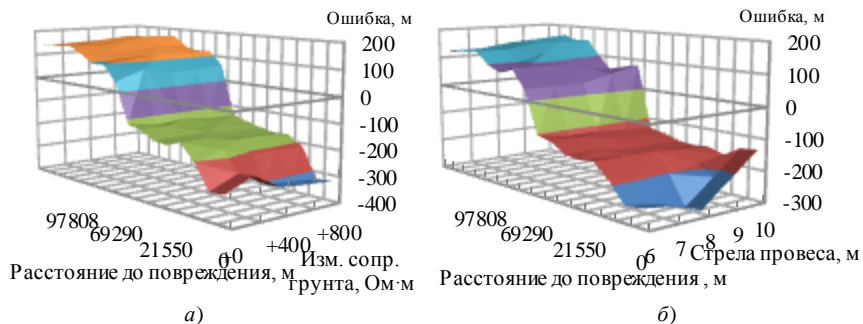


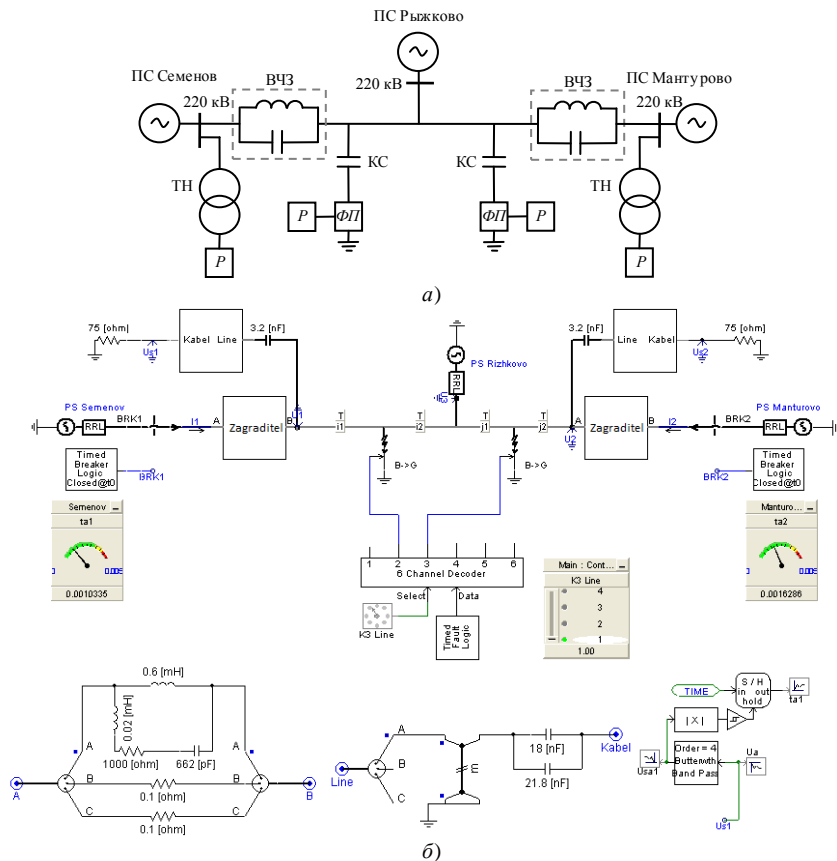
Рисунок 2 – Ошибки ВОМП, обусловленные изменением удельного сопротивления грунта (а) и стрелы провеса (б) воздушной ЛЭП

Следует отметить, что подавляющее большинство современных устройств ВОМП (таблица 1) позволяют задавать расчетную групповую скорость распространения волны по линии, однако такая операция приводит лишь к смещению графика ошибки или изменению его наклона, но не позволяет реализовать в полной мере процедуру компенсации.

В диссертационной работе разработан метод повышения точности, учитывающий индивидуальные особенности ЛЭП (прежде всего конструктивное исполнение) и основанный на компенсации ошибок, сформированных по результатам имитационного моделирования.

Пример имитационной модели в программном комплексе PSCAD ВЛ 220 кВ «Семенов-Рыжково-Мантурово» приведен на рисунке 3. При моделировании предполагалось, что регистрация электромагнитных волн производится с помощью высокочастотного (ВЧ) присоединения для обеспечения высокой точности ВОМП. Разработанный метод повышения точности ВОМП ВЛ предполагает следующие этапы:

- формирование модели PSCAD на основе данных, характеризующих индивидуальные особенности ЛЭП: тип опор и грунта, марка провода и грозотроса, стрела провеса и информацию о транспонировании проводов (рисунок 3);
- проведение множественных модельных экспериментов с имитацией повреждений в различных точках, регистрацией электромагнитных импульсов и последующим расчетом расстояния до места повреждения по выражению (1);
- сопоставление имитируемых и расчетных мест повреждения с построением зависимости  $\Delta d(d')$  корректирующих коэффициентов  $\Delta d$  ВОМП от расчетного места повреждения  $d'$ ;



На схеме: ФП – фильтр присоединения, ВЧЗ – высокочастотный заградитель, КС – конденсатор связи, ТН – трансформатор напряжения, Р – регистратор высокочастотных переходных процессов  
 Рисунок 3 – Схема (а) и модель в программном комплексе PSCAD (б) ВЛ 220 кВ «Семенов-Рыжково-Мантурово» Нижегородской энергосистемы

- реализацию ВОМП с вычислениями по выражению (1) с получением расстояния  $d'$  и последующей корректировкой результата для конкретного места повреждения согласно выражению

$$d = d' + \Delta d(d'). \quad (2)$$

Так, применение разработанного метода повышения точности ВОМП для ВЛ 220 кВ «Семенов-Рыжково-Мантурово» позволяет существенно до 5 раз сократить ошибки расчета расстояния до повреждения. На рисунке 4 приведена зависимость ошибки ВОМП имитируемой ЛЭП (рисунок 3) от расстояния до повреждения. Очевидно, что дальнейшим ресурсом повышения точности ВОМП является предварительная оценка погодных условий и выбор корректирующего коэффициента для выражения (2) из семейства зависимостей, построенных при различных погодных условиях.

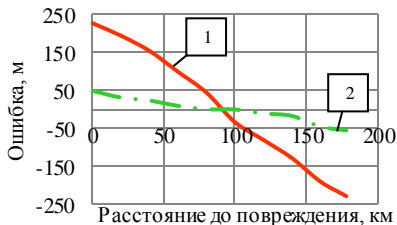


Рисунок 4 – Ошибка ВОМП для ВЛ 220 кВ «Семенов-Рыжково-Мантурово» для двухстороннего (1) и разработанного (2) методов

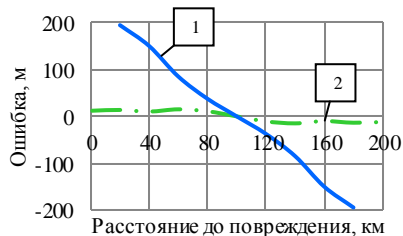


Рисунок 5 – Ошибка двухстороннего ВОМП при регистрации импульса в фазном (1) и волновом (2) канале

Имитационные модельные исследования показали, что меньшими ошибками (в 2 и более раза, в зависимости от устройства фиксации переходного процесса) обладает ВОМП с регистрацией электромагнитных импульсов не в фазных, а в волновых каналах. Рисунок 5, иллюстрирующий это утверждение, получен на основе имитационных экспериментов с пересчетом мгновенных значений фазных импульсных сигналов и последующей регистрацией в волновых каналах. В ходе экспериментов моделировалась ВЛ 220 кВ на промежуточных опорах ПС 220-5 длиной 200 км.

**В третьей главе** разработаны новые алгоритмы многостороннего ВОМП, основанные на навигационных принципах. В отличие от пространственных навигационных задач, ВОМП на ЛЭП с ответвлениями носит специфичный линейный характер. Произведена оценка точности разработанных алгоритмов и обоснование преимуществ их применения.

В системах спутниковой навигации широко используются три метода определения местоположения в пространстве: псевдодальномерный, разностно-дальномерный и дифференциальный. Причем, чем больше спутников задействовано в решении такой задачи, тем точнее производится оценка координат.

Аналогичная ситуация может быть распространена на ВОМП ВЛ с ответвлениями, где на концах линии установлены регистраторы волновых процессов. Таким образом, чем больше вариантов синхронизированной регистрации волновых процессов и расчетов расстояния до места повреждения, тем точнее может быть реализовано ВОМП. При этом важной задачей является разработка специальных алгоритмов, позволяющих использовать ресурс избыточности информации и приводить к формированию наиболее точного результата ВОМП.

Псевдодальномерный метод ВОМП основан на использовании псевдодальности, под которой понимается измеренная дальность до точки повреждения, отличающаяся от истинной дальности на величину  $\Delta d = d_{\text{изм}} - d$ . Пусть для пары устройств  $i$  и  $j$  (рисунок 1(б)), местоположение которых известно, выполнена регистрация импульсов в моменты времени  $t_i$  и  $t_j$  соответственно. Выполнив измерение расстояния по двухстороннему методу, получим псевдодальность

$$d_{\text{изм1}} = 0,5[L_i + L_j + P_{ij} + v(t_i - t_j)], \quad (3)$$

где  $L_i$  и  $L_j$  – длина ответвлений;  $P_{ij}$  – расстояние между точками подключения ответвлений  $i$  и  $j$ . Измеренная псевдодальность отличается от истинного расстояния до повреждения на  $\Delta d$ . Выбрав вторую пару устройств, например,  $i$  и  $n$ , выполним второе измерение псевдодальности и компенсируем ошибку  $\Delta d = d_{\text{изм1}} - d$ . Уточненное расстояние  $d$  может быть найдено из системы уравнений

$$\begin{cases} d = 0,5[L_i + L_j + P_{ij} + v(t_i - t_j)] + \Delta d; \\ \Delta d = 0,5[L_i + L_n + P_{in} + v(t_i - t_n)] - d. \end{cases} \quad (4)$$

Решая систему уравнений и распространяя псевдодальномерный принцип ВОМП для последующего пункта регистрации волнового процесса  $m$  (рисунок 1(б)), получим окончательное уравнение с учетом времени регистрации на всех ответвлениях ВЛ

$$d = 0,25[2L_i + L_j + L_n + P_{MN} + v(2t_i - t_j - t_n)]. \quad (5)$$

Применение псевдодальномерного метода ВОМП исследовано на модели ЛЭП 220 кВ «Семенов-Мантурово» с промежуточной ПС 220 кВ «Рыжково». Обработка результатов измерений с дополнительного узла на ПС 220 кВ «Рыжково» позволила повысить точность до 100 м (рисунок 6) в сравнении с двухсторонним методом



Рисунок 6 – Повышение точности ВОМП в результате применения псевдодальномерного метода

ВОМП. Также псевдодальномерный метод показал устойчивость точностных характеристик ВОМП в условиях изменения погодных условий по сравнению с двухсторонним методом.

Разностно-дальномерный метод ВОМП основан на измерении разности дальностей от места повреждения до точек установки регистрирующих устройств. Несмотря на отличный от псевдодальномерного метода посыл в расчетно-формульных рассуждениях, конечное решение линейной задачи многостороннего ВОМП приводит к аналогичному выражению (5). Таким образом, точностные характеристики псевдодальномерного и разностно-дальномерного методов ВОМП идентичны.

Дифференциальный метод применяется для уточнения скорости распространения электромагнитной волны по ВЛ при ВОМП. В основе метода лежит информация о времени прихода волны к концам ЛЭП и координатах точек регистрации. Для электрической схемы (рисунок 1(б)) составляются матрицы времени  $T$  и расстояний  $L$  (выражение (6)). В последующем уточненная групповая скорость  $v$  применяется при ВОМП двухсторонним или многосторонним методами.

Эффективность применения дифференциального метода иллюстрирует таб-

лица 2, полученная на основе имитационного моделирования электротехнического комплекса (рисунок 1(б)). Анализ таблицы показывает, что повышение точности ВОМП может достигать 200 м с учетом введения компенсации ошибок (глава 2).

$$T = \begin{bmatrix} t_j - t_m \\ t_j - t_n \\ t_m - t_n \end{bmatrix}, \quad L = \begin{bmatrix} L_j + P_{ij} - L_m - P_{im} \\ L_j + P_{ij} - L_n - P_{in} \\ L_m + P_{im} - L_n - P_{in} \end{bmatrix}, \quad v = (T^T \cdot T)^{-1} \cdot T^T \cdot L. \quad (6)$$

Таблица 2 – Оценка эффективности применения дифференциального метода

Расстояние до повреждения, км	Ошибка двухстороннего ВОМП, м	Ошибка с учетом компенсации, м	Уточненная скорость, м/с	Ошибка уточненного ВОМП, м	Снижение ошибки, %
0	380	205	298 696 029	-56	73
1	390	215		-42	80
15	320	145		-51	65
30	275	100		-30	70
45	215	40		-25	38
59	175	0		-4	-

Важной задачей ОМП, и волнового в частности, является формирование зоны обхода. Анализ влияющих факторов (глава 2) и реализация алгоритмов двух- и многостороннего ВОМП путем выполнения экспериментов с моделями ЭТК позволяет сделать вывод, что в задании зоны обхода нет необходимости, поскольку ошибки малы и вероятное место повреждения находится в пределах прямой видимости.

**В четвертой главе** исследованы вопросы технической реализации ВОМП на воздушных ЛЭП. Предложен способ обнаружения импульсных сигналов от повреждений в условия воздействия шумов и помех. Проанализированы возможности использования эксплуатационной статистики в интересах повышения точности ВОМП, а также рассмотрены варианты аппаратурного исполнения устройства ВОМП.

Обнаружение импульсного сигнала электромагнитной волны от повреждения ЛЭП происходит на фоне шумов и помех, в качестве которых выступают, например, коронный разряд, внешние радиоизлучения, коммутационные помехи и др. Причем, согласно теоретических положений оптимальная процедура обнаружения состоит в использовании фильтрации сигнала. В работе предложено формировать импульсную характеристику цифрового фильтра на основе имитационного моделирования, соответствующую сигналу, приходящему от повреждения ВЛ (рисунок 7). Обоснован выбор порогового (уставочного) значения обнаружителя, исходя из критерия Неймана-Пирсона и обеспечения ожидаемой вероятности ложного срабатывания обнаружителя, в окне данных. Целесообразность разработанного подхода подтверждена моделированием ВОМП и сопоставлением с наиболее перспективными техническими решениями ВОМП (таблица 1). В качестве критерия сравнения выступает вероятность правильного обнаружения волнового импульса при различных соотношениях сигнал/шум (рисунок 8).

Анализ рисунка 8 показывает, что предложенный метод обладает более высокой вероятностью обнаружения при больших отношениях сигнал/шум.

Важным ресурсом повышения точности ВОМП является использование эксплуатационной статистики, основанной на фактах повреждения ЛЭП. При этом объединение результатов реальных обходов ВЛ и данных имитационных экспериментов целесообразно проводить обратно пропорционально дисперсиям ошибок с учетом компенсационных процедур (глава 2).

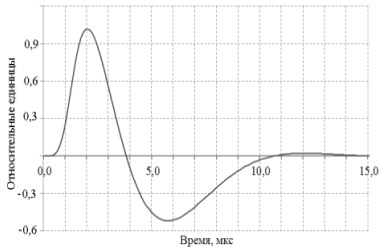


Рисунок 7 – Пример импульсной характеристики разработанного фильтра для ВОМП ЛЭП 220 кВ «Семенов-Мантурово»

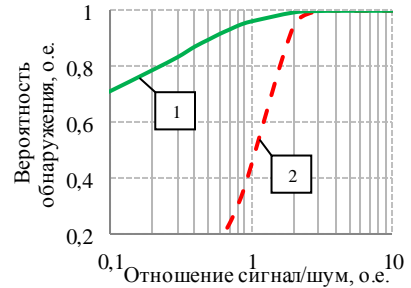


Рисунок 8 – Рабочие характеристики разработанного фильтра (1) и фильтра на основе расчета коэффициента эксцесса (2) (ЭНИС, таблица 1)

Общая структурная схема разработанного алгоритма для устройства ВОМП приведена рисунке 9. Рисунок 10 иллюстрирует повышение точности для двухстороннего ВОМП с применением разработанного алгоритма. Зависимости (рисунок 10) получены путем имитационного моделирования ЭТК, включающего ЛЭП 220 кВ «Борская - Семеновская» и «Семенов - Рыжково - Мантурово».

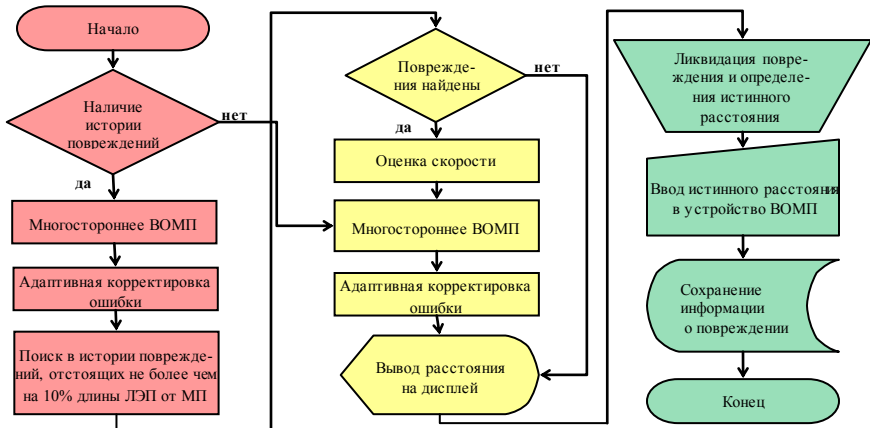


Рисунок 9 – Блок-схема алгоритма ВОМП, учитывающего данные эксплуатационной статистики

В работе рассмотрена структурная схема микропроцессорного устройства (рисунок 11) для реализации многостороннего ВОМП на ВЛ с ответвлениями. Схемные решения были модернизированы (рисунок 12) для включения в состав «устройства интеллектуальной релейной защиты с характеристиками, не зависящими от режимов работы активно-адаптивной электрической сети» (работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ, соглашение № 14.577.21.0124 о предоставлении субсидии от 20.10.2014 г, уникальный идентификатор проекта RFMEFI57714X0124).

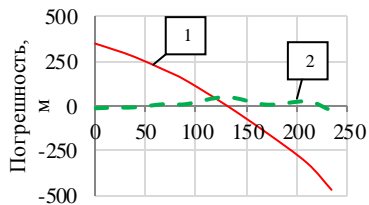


Рисунок 10 – Погрешность ВОМП двухстороннего метода (1) и предложенного метода (2)



Рисунок 11 – Опытное промышленное устройство ВОМП НПП «АЛИМП»



Рисунок 12 – Устройство интеллектуальной релейной защиты с характеристиками, не зависящими от режимов работы активно-адаптивной электрической сети

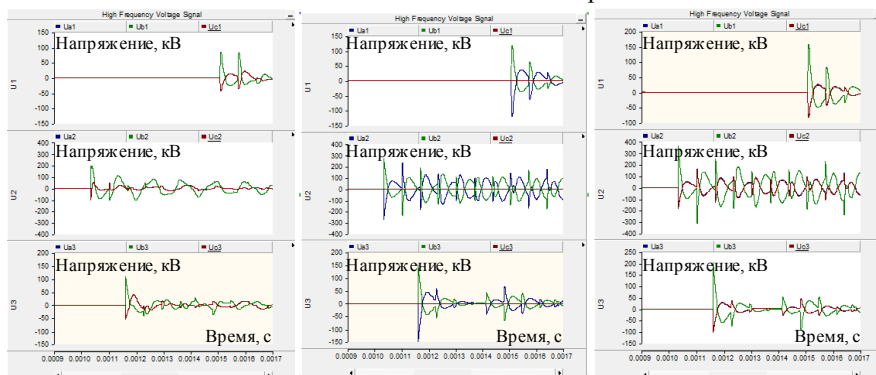


Рисунок 13 – Осциллограммы волновых импульсных сигналов напряжения при повреждении на ЛЭП 220 кВ «Сасово - Арзамасская» с ответвлением на ПС 220 кВ «Саровская» (слева-направо): одно-, двух- и трехфазное КЗ на участке между отпайкой и ПС 500 кВ «Арзамасская»

С участием автора выполнены экспериментальные исследования образцов устройств (рисунок 11, 12). Осциллограммы волновых импульсных сигналов,



использованные при проведении исследовательских испытаний, приведены на рисунке 13 (осциллограммы импульсных сигналов повреждения ЛЭП). Исследовательские испытания подтвердили точностные характеристики ВОМП при условии их точной синхронизации.

Аппаратно-программный комплекс ВОМП находится с 01.09.2016 г в опытно-промышленной эксплуатации в филиале ОАО «МРСК Центра и Поволжья» - Нижновэнерго на ВЛ 110 кВ «Кулебаки - Сапфир» со стороны ПС 110/35/6 Кулебаки и ВЛ 110 кВ «Сапфир - Дивеево» со стороны ПС 110/35/6 Дивеево. Отличительной особенностью технического решения является подключение устройств ВОМП к ЛЭП посредством ВЧ-присоединения для обеспечения широкой полосы (малых искажений) импульсных волновых сигналов.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

1. Сопоставительный анализ аппаратных решений ВОМП показал возможность их применения на воздушных ЛЭП с ответвлениями. Неоднозначность определения ошибок устройств ВОМП (от 25 до 500 м) обусловила необходимость моделирования их алгоритмов и разработку методов повышения точности расчета расстояния до повреждения ЛЭП.

2. Установлена зависимость скорости распространения электромагнитной волны от конструктивного исполнения ВЛ, эксплуатационного изменения стрелы провеса и удельного сопротивления грунта. Определена ошибка ВОМП на основании результатов имитационного моделирования ЭТК в программной среде PSCAD. Неучет указанных факторов приводит к ошибке, достигающей 500-2000 м и сопоставимой с ОМП по ПАР.

3. Предложен метод адаптации, обеспечивающий снижение ошибки ВОМП от 2 до 10 и более раз. Метод основан на компенсации изменений скорости на отдельных участках ВЛ на основе заранее вычисленных скоростных коэффициентов с применением имитационного моделирования.

4. Разработаны и запатентованы навигационные (псевдодальномерный, разностно-дальномерный, дифференциальный) методы многостороннего ВОМП ЛЭП, позволяющие сократить ошибку оценки расстояния до повреждения от 1,5 до 4 раз. Основу для повышения точности составляет ресурс избыточности измерений при регистрации волновых процессов на ответвлениях ВЛ. Эффективность методов проверена на имитационных моделях ЭТК Нижегородской энергосистемы.

5. Обосновано, что для ВОМП (многостороннего в особенности) отсутствует необходимость расчета зоны обхода ЛЭП линейной бригадой. С учетом методов компенсации ошибок ВОМП повреждение ЛЭП оказывается в зоне прямой видимости относительно расчетной точки.

6. Предложено аппаратное исполнение специального фильтра для регистрации волнового импульса в условиях шумов и помех при повреждении ЛЭП. Раз-

рабочее техническое решение обеспечивает обнаружение волнового сигнала при более низком в 1,5-8 раз соотношении сигнал/шум.

7. С участием автора и использованием исследованных алгоритмов разработаны устройства ВОМП, которые прошли успешные испытания. Аппаратно-программный комплекс ВОМП находится в опытно-промышленной эксплуатации в филиале ОАО «МРСК Центра и Поволжья» - Нижновэнерго на ВЛ 110 кВ «Кулебаки - Дивеево» с заходом на ПС 110 кВ «Сапфир».

## СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

*Научные работы, опубликованные в изданиях, рекомендованных ВАК:*

1. Куликов, А.Л. Адаптивное волновое определение места повреждения линии электропередач / А.Л. Куликов, **В.В. Ананьев** // Вестник ИГЭУ. – 2014. – №4. – С. 21-25.

2. Куликов, А.Л. Дифференциальный принцип в волновом методе определения мест повреждений на ВЛ с ответвлениями / А.Л. Куликов, В.Ф. Лачугин, **В.В. Ананьев** // Электрические станции. – 2015. – №10. – С. 34-37.

3. Куликов, А.Л. Методы радионавигации в задаче волнового определения места повреждения линии электропередачи / А.Л. Куликов, **В.В. Ананьев** // Научные технологии. – 2016. – № 11. – С. 9-18.

4. Куликов, А.Л. Моделирование волновых процессов на линиях электропередачи для повышения точности определения места повреждения / А.Л. Куликов, **В.В. Ананьев**, В.Ф. Лачугин, В.Ю. Вуколов, П.С. Платонов // Электрические станции. – 2015. – №7. – С.45-53.

5. Куликов, А.Л. Оценка скорости распространения электромагнитных волн в задаче определения места повреждения линии электропередачи / А.Л. Куликов, **В.В. Ананьев** // Вестник Чувашского университета. – 2016. – №1. – С. 56-64.

6. Куликов, А.Л. Повышение точности многостороннего волнового определения места повреждения линий электропередачи за счет использования псевдодальномерного метода / А.Л. Куликов, **В.В. Ананьев** // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2015. – №3. – С. 73-76.

7. Куликов, А.Л. Повышение точности многостороннего волнового определения места повреждения линий электропередачи за счет использования разностно-дальномерного метода / А.Л. Куликов, **В.В. Ананьев** // Электротехника. – 2016. – №1. – С. 25-30.

*В изданиях, индексируемых в Web of Science и Scopus:*

8. Kulikov, A.L. An Improved Accurate Travelling Wave Fault Location Method Based on Navigation Algorithms / A.L. Kulikov, V.V. **Anan'ev** // Russian Electromechanics. – 2015. – No. 3. – pp. 73-76. – DOI: 10.17213/0136-3360-2015-3-73-76.

9. Kulikov, A.L. Differential principle in the traveling wave method of determining fault locations in overhead lines with branches / A.L. Kulikov, V.F. Lachugin, **V.V. Anan'ev** // Power Technology and Engineering. – 2016. – No. 6. Vol. 49. – pp. 472-475.

10. Kulikov, A.L. Improving the Accuracy of Multisided Travelling Wave Determination of Location of a Fault in a Power Line by Means of the Difference-Distance Measuring Technique / A.L. Kulikov, V.V. **Anan'ev** // Russian electrical engineering. – 2016. – Vol. 87. No. 1. – pp. 23-27.

11. Kulikov, A.L. Modelling of wave processes on power transmission lines to improve the accuracy of fault location / A.L. Kulikov, V.F. Lachugin, V.V. **Anan'ev**, V. Yu. Vukolov, and P. S. Platonov // Power Technology and Engineering. – 2016. – Vol. 49. No. 5. – pp. 378-385. – DOI: 10.1007/s10749-016-0632-8.

*Патенты:*

12. Патент на изобретение № 2555195 Российская Федерация, МПК G01R31/08. Способ определения места повреждения линии электропередачи / Куликов А.Л., **Ананьев В.В.** – Оpubл. 10.07.2015. – Бюл. № 19.

13. Патент на изобретение № 2584266 Российская Федерация, МПК G01R31/08. Способ определения расстояния до места повреждения на линии электропередачи / Куликов А.Л., **Ананьев В.В.**, Вуколов В.Ю. – Оpubл. 20.05.2016. – Бюл. № 14.

14. Патент на изобретение № 2603247 Российская Федерация, МПК G01R31/08. Способ определения места повреждения линии электропередачи / Куликов А.Л., **Ананьев В.В.**, Вуколов В.Ю. – Оpubл. 27.11.2016. – Бюл. № 33.

15. Патент на изобретение № 2632583 Российская Федерация, МПК G01R31/08. Способ определения расстояния до места повреждения на линии электропередачи / Куликов А.Л., Вуколов В.Ю., Шарыгин М.В., **Ананьев В.В.** – Оpubл. 06.10.2017. – Бюл. № 28.

*Прочие опубликованные научные работы:*

16. Куликов, А.Л. Влияние конструктивных параметров линий электропередач на точность волнового определения места повреждения / А.Л. Куликов, **В.В. Ананьев** // XIX нижегородская сессия молодых ученых. Технические науки: материалы конференции. – Нижний Новгород, 2014. – С. 192-194.

17. Куликов, А.Л. Волновое определение места повреждения на линиях с ответвлениями / А.Л. Куликов, **В.В. Ананьев** // Материалы конференции РНК СИГРЭ: 5-я Международная научно-техническая конференция «Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем». – Сочи, 2015.

18. Куликов, А.Л. Использование имитационного моделирования для повышения точности волнового определения места повреждения линий электропередачи / А.Л. Куликов, **В.В. Ананьев** // Релейщик. – 2014. – №2. – С. 30-34.

19. Куликов, А.Л. Использование навигационного метода для повышения точности волнового определения места повреждения линии электропередачи / А.Л. Куликов, **В.В. Ананьев** // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем: материалы 11-й Всерос. научн.-техн. конф. –

Чебоксары, 2015. – С. 331-332.

20. Куликов, А.Л. Использование псевдодальномерного метода для повышения точности многостороннего волнового определения места повреждения линий электропередачи / А.Л. Куликов, **В.В. Ананьев** // Электроэнергетика глазами молодежи: труды VI международной научно-технической конференции. – Иваново, 2015. – Т.2, вып. 2. – С. 47-50.

21. Куликов, А.Л. Определение места повреждения ЛЭП с регистрацией электромагнитных переходных процессов в волновых каналах / А.Л. Куликов, **В.В. Ананьев** // Сборник конференции: Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике материалы X всероссийской научно-технической конференции. – Чебоксары, 2016. – С. 221-222.

22. Куликов, А.Л. Особенности защит линий электропередач от перегрузки / А.Л. Куликов, **В.В. Ананьев** // Будущее технической науки: материалы конференции. – Нижний Новгород, 2013. – С. 50.

23. Куликов, А.Л. Оценка скорости распространения электромагнитных волн в задаче определения места повреждения линии электропередачи / А.Л. Куликов, **В.В. Ананьев**, В.Ю. Вуколов // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. Сборник научных статей. Актуальные проблемы надежности систем энергетики. Материалы Международного семинара имени Ю.Н. Руденко. – Минск, 2015. – Выпуск 66. – С. 433-440.

24. Куликов, А.Л. Применение псевдодальномерного метода для повышения точности многостороннего волнового определения места повреждения линий электропередачи / А.Л. Куликов, **В.В. Ананьев** // Будущее технической науки: сборник материалов XIV международной молодежной научно-технической конференции. – Нижний Новгород, 2015. – С. 84.

25. Куликов, А.Л. Статистические методы повышения точности волнового определения места повреждения линии электропередачи / А.Л. Куликов, **В.В. Ананьев** // Релейщик. – 2015. – №1(21). – С.18-21.

26. Куликов, А.Л. Уточнение расстояния до повреждения при волновом ОМП ЛЭП / А.Л. Куликов, **В.В. Ананьев** // Актуальные проблемы электроэнергетики. Сборник статей Всероссийской научно-технической конференции. – Нижний Новгород, 2015. – С. 128-132.

Подписано в печать 00.00.2017. Формат 60x84  $\frac{1}{16}$ . Бумага офсетная

Печать офсетная. Усл. печ. л. 1,0. Тираж 130 экз. Заказ 000.

---

Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексева.

Типография НГТУ.

Адрес университета и полиграфического предприятия:

603950, г. Нижний Новгород, ул. К. Минина, 24