

На правах рукописи



Пелевин Павел Сергеевич

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

Специальность 2.4.2 – Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Нижний Новгород
2023

Работа выполнена на кафедре «Электроэнергетика, электроснабжение и силовая электроника» Федерального государственного бюджетного учреждения высшего образования (ФГБОУ ВО) «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева» (НГТУ) и АО «Россети Научно-технический центр» (АО «НТЦ ФСК ЕЭС»)

Научный руководитель: **Куликов Александр Леонидович**

Доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Электроэнергетика, электроснабжение и силовая электроника» ФГБОУ ВО НГТУ (г. Нижний Новгород)

Официальные оппоненты: **Лачугин Владимир Федорович**

Доктор технических наук, старший научный сотрудник, профессор кафедры «Релейная защита и автоматизация энергосистем» ФГБОУ ВО "Национальный исследовательский университет "МЭИ" (г. Москва)

Хузяшев Рустэм Газизович

Кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры «Электроэнергетические системы и сети» ФГБОУ ВО "Казанский государственный энергетический университет" (г. Казань)

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова» (г. Чебоксары)

Защита состоится 18 января 2024 года в 14-00 в аудитории 1313 на заседании диссертационного совета 24.2.345.05 при НГТУ им. Р.Е. Алексеева по адресу: 603155, г. Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24, корпус 1.

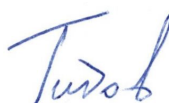
Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим направлять на имя ученого секретаря диссертационного совета 24.2.345.05 по адресу: 603155, Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГБОУ ВО «НГТУ им. Р.Е. Алексеева» (603155, г. Нижний Новгород, ул. Минина, д. 28Б) и на сайте:

<https://www.nntu.ru/structure/view/podrazdeleniya/fpsvk/obyavleniya-o-zashhitah>.

Автореферат разослан «__» _____ 2023 г.

Ученый секретарь диссертационного
совета 24.2.345.05, к.т.н.



Титов Дмитрий Юрьевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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

Согласно правилам устройства электроустановок (ПУЭ) на высоковольтных КВЛ должно предусматриваться автоматическое повторное включение (АПВ). Однако стандартные алгоритмы безусловного АПВ воздушных ЛЭП (ВЛ) неэффективны на КВЛ, поскольку на высоковольтных кабелях 110 кВ и выше, как правило, отсутствует явление самоустранения повреждения изоляции. Поэтому АПВ при поврежденном высоковольтном кабеле, особенно проходящем в жилой зоне, может привести к существенному ущербу, травмированию и гибели людей.

Таким образом для эффективного АПВ высоковольтных КВЛ необходимо реализовать селективное АПВ. При селективном АПВ КВЛ перед циклом АПВ за время бестоковой паузы определяется поврежденный участок КВЛ и, при определении повреждения на кабеле, АПВ блокируется. В работе показано, что существующие на текущий момент дифференциальные способы селективного АПВ КВЛ обладают недостатками, снижающими их эффективность. В связи с этим целесообразен поиск более простых (с точки зрения используемого оборудования) способов АПВ КВЛ, использующих измерения токов и напряжений на концах ЛЭП (на одном или двух). При этом перспективными являются методы на основе оценки высокочастотных (волновых) составляющих сигналов тока и напряжения.

Степень разработанности темы исследования. Вопросам АПВ КВЛ в последние годы уделяется все большее внимание как в России, так и в других

странах. Существенный вклад в изучение обозначенной проблемы и разработку способов селективного АПВ и определения мест повреждения (ОМП) КВЛ, а также волновых методов оценки переходного процесса внесли российские ученые и специалисты: Алексеев В.Г., Аржанников Е.А., Дмитриев М.В., Догадкин Д.И., Козлов В.Н., Куликов А.Л., Лачугин В.Ф., Линт М.Г., Лямец Ю.Я., Марин Р.С., Мисриханов М.Ш., Нудельман Г.С., Подшивалин А.Н., Хузяшев Р.Г., Шалыт Г.М., Шуин В.А. и др., а также иностранные ученые: Crossley P.A., Burek A., Felipe V.L., Gilany M.I., Guzman A., Kasztenny B., Klomjit J., Livani H., Naidu O.D., Sadeh J., и др.

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

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

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

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

- п.1. «Развитие общей теории электротехнических комплексов и систем, анализ системных свойств и связей, физическое, математическое, имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем, включая электромеханические, электромагнитные преобразователи энергии...»;

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

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

- п.4. «Исследование работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов, систем и их компонентов в различных режимах,

при разнообразных внешних воздействиях, диагностика электротехнических комплексов».

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

Задачи исследования:

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

Научная новизна и основные результаты.

1. Разработан новый способ волнового АПВ, отличающийся применением односторонних измерений, формированием волновых портретов повреждения КВЛ и распознаванием волновых портретов с использованием коэффициентов корреляции;
2. Разработан упрощенный способ волнового АПВ, отличающийся использованием двусторонних несинхронизированных измерений амплитуды фронта начальных волн, распространяющихся от места повреждения КВЛ;
3. Предложены методы определения поврежденного участка и места повреждения КВЛ, основанные на двусторонних синхронизированных измерениях, отличающиеся от существующих способов двустороннего волнового ОМП тем, что вначале вычисляется время распространения волны от места повреждения до одного из концов КВЛ с последующей итерационной оценкой

вычисленного значения и определением поврежденного участка.

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

Теоретическая и практическая значимость работы. Применение АПВ КВЛ является обязательным и определено ПУЭ. В настоящее время отсутствует техническое решение АПВ КВЛ 110 кВ и выше, принятое в российской эксплуатационной практике. В крупных городах явно прослеживаются тенденции к увеличению доли КВЛ 110 кВ и выше, численность которых составляет не менее несколько сотен, все они не соответствуют требованиям ПУЭ. Разработанные новые способы АПВ КВЛ позволяют без установки оборудования на кабельно-воздушных переходах осуществить надежное селективное АПВ КВЛ.

Методология и методы исследования. Разработанные в диссертации научные положения основываются на комплексе теоретических и экспериментальных достижений в области теоретических основ электротехники, теории электромагнитных переходных процессов, имитационного моделирования, статистического анализа, цифровой обработки сигналов.

Положения, выносимые на защиту:

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

Степень достоверности и апробация результатов. Проведенные исследования на имитационных моделях, точность которых подтверждена высокой

корреляцией модельных и реальных сигналов (значение корреляции составило 0,89), показали, что характер протекания волновых процессов при повреждениях на разных участках КВЛ существенно отличается. Это обуславливает возможность определения поврежденного участка КВЛ путем оценки высокочастотных составляющих сигналов тока и напряжения.

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

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

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

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

Структура и объем работы. Работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений, списка использованной литературы и 5

приложений. Работа изложена на 156 страницах основного текста, иллюстрирована на 99 рисунках и 15 таблицах.

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

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

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

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

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 рассматриваются варианты решения задачи АПВ КВЛ за рубежом и в России, описаны различные виды конфигурации комплексов КВЛ и обосновывается целесообразность перехода к применению селективного АПВ

КВЛ. При селективном АПВ КВЛ перед циклом включения-отключения определяется поврежденный участок КВЛ и, при определении повреждения на кабельном участке, АПВ блокируется.

Проведена классификация способов селективного АПВ КВЛ по используемому принципу измерения электрических сигналов при определении поврежденного участка (рисунок 1) и рассмотрены конкретные технические решения, структурные схемы которых изображены на рисунке 2.



Рисунок 1 – Классификация методов селективного АПВ КВЛ

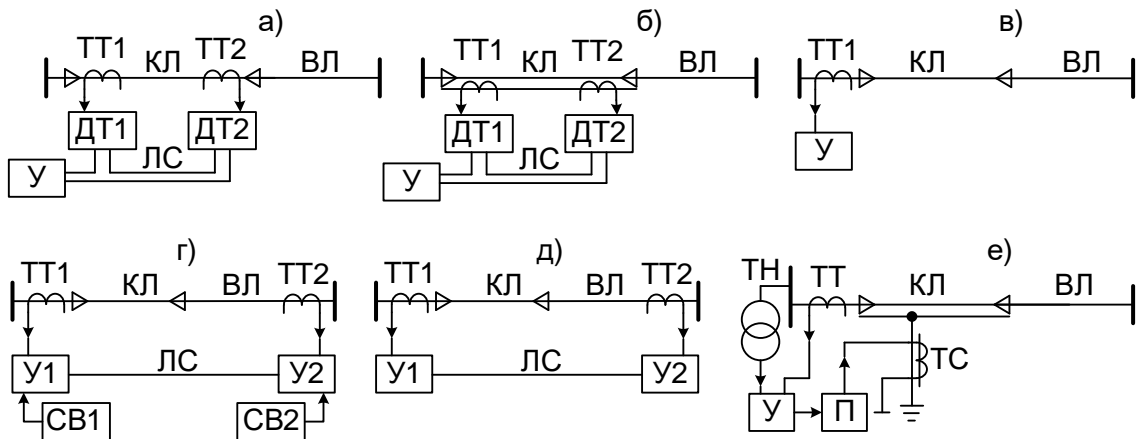


Рисунок 2 – Схемы электротехнических комплексов АПВ КВЛ

На рисунке 2 изображены следующие элементы: трансформаторы тока (ТТ); датчик тока (ДТ) – устройство измерения и передачи сигнала; основное устройство АПВ КВЛ (У); линия связи (ЛС); передатчик (П) – генератор наложенного сигнала; трансформатор сигнала (ТС); устройство синхронизации времени (СВ).

В работе показано, что дифференциальные способы селективного АПВ КВЛ (рис. 2а, б) обладают недостатками, снижающими их эффективность. Основные

недостатки связаны прежде всего с необходимостью установки дополнительного оборудования как на подстанции (ПС), так и в месте кабельно-воздушного переходного пункта (ПП) (ТТ, ДТ, устройства питания собственных нужд и обогрева), организации специальной ЛС, что приводит к существенному усложнению и удорожанию, а также к снижению надежности комплекса АПВ КВЛ. Так на рисунке 3 показаны простой ПП (а), на котором установлены только кабельные концевые муфты и ограничители перенапряжения, и сложный ПП (б) со специальной площадкой обслуживания и дополнительным оборудованием.

Обосновано, что дистанционные пассивные методы АПВ КВЛ (рис. 2в-д) целесообразно применять в большинстве вариантов конфигураций КВЛ, поскольку это позволяет упростить электротехнический комплекс АПВ КВЛ, снизить затраты и повысить надежность. В дистанционных методах АПВ КВЛ для определения поврежденного участка может использоваться оценка места повреждения. При этом методы ОМП по параметрам аварийного режима (ПАР) обладают недостаточной точностью для эффективного применения на КВЛ. Перспективными являются методы на основе оценки высокочастотных (волновых) составляющих сигналов тока и напряжения.

Во второй главе были проведены исследования волновых переходных процессов на КВЛ различной конфигурации посредством имитационного моделирования электротехнических комплексов (ЭТК) КВЛ. Вводится понятие *волновой портрет*, под которым понимается записанный и специальным образом обработанный сигнал тока или напряжения на заданном временном интервале вначале электромагнитного переходного процесса. Показано, что основные факторы, влияющие на волновой портрет, возможно учесть при разработке модели.

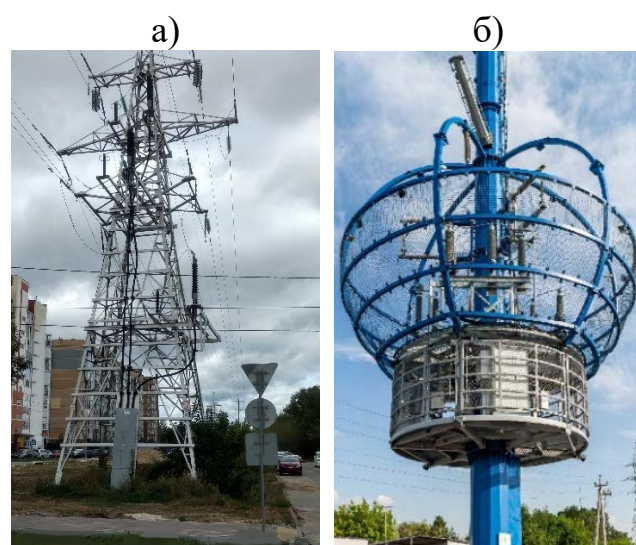


Рисунок 3 – Простой (а) и сложный (б) ПП

Исследован процесс разработки и верификации имитационной модели ЭТК КВЛ с использованием сигналов реальных осциллограмм, записанных с высокой частотой дискретизации (≥ 1 МГц), на примере комплекса КВЛ 220кВ Тамань-Кафа (Энергомост в Крым), конфигурация которого отображена на рисунке 4. Структура модели рассматриваемого ЭТК в программе имитационного моделирования PSCAD приведена на рисунке 5.

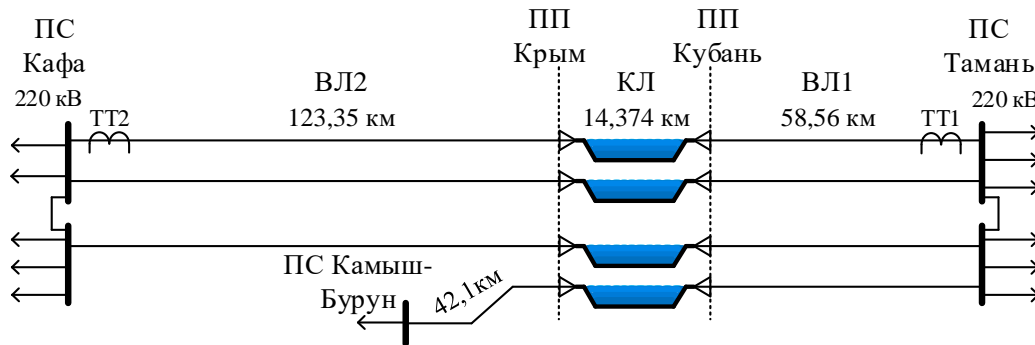


Рисунок 4 – Конфигурация комплекса КВЛ 220кВ Тамань-Кафа

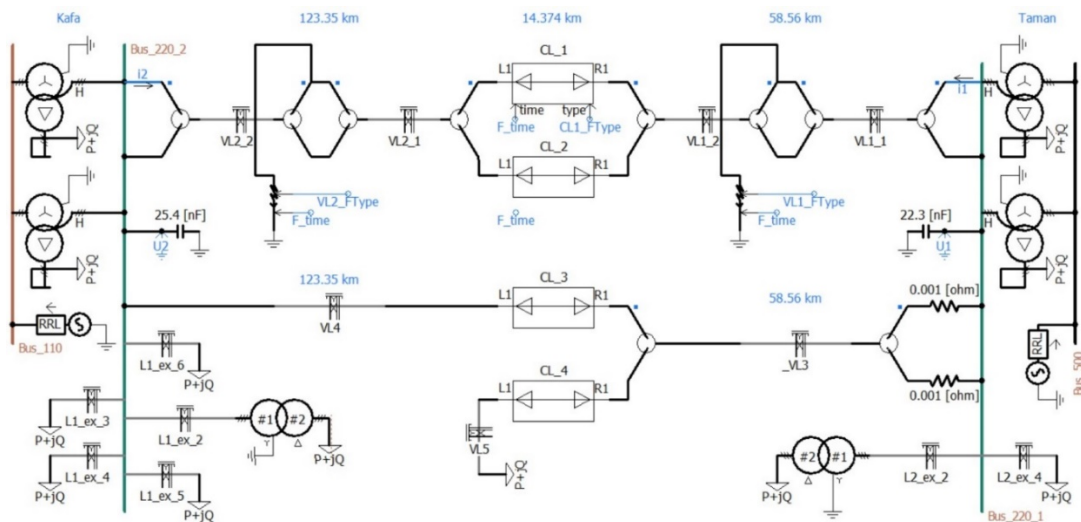


Рисунок 5 – Модель электротехнического комплекса КВЛ в PSCAD

Проанализирован процесс косвенного вычисления частотных характеристик токовых измерительных цепей на ПС по реальному и модельному сигналам. Полученные характеристики затем учитываются в модельных сигналах для повышения соответствия реальным сигналам. Для примера на рисунке 6 изображено сопоставление реального ($\Delta i_{2R(\Phi, A)}$, красный) и модельного ($\Delta i_{2M(\Phi, A)}$, синий) сигналов тока для одного из случаев КЗ на КВЛ 220кВ Тамань-Кафа на коротком (рис. 6а) и длинном (рис. 6б) временных интервалах, а также коэффициент корреляции (R_{xy}), вычисляемый по выражению (1).

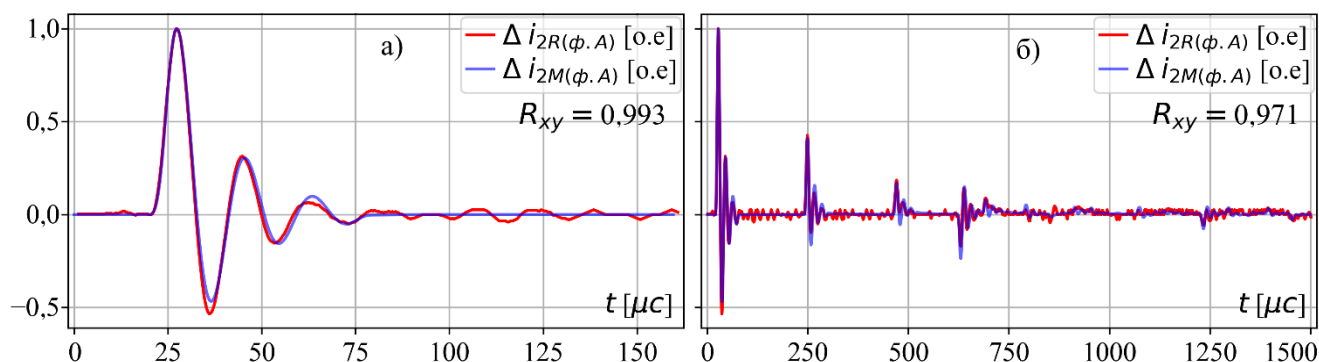


Рисунок 6 – Сравнение реального и модельного сигналов

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

где R_{xy} – коэффициент корреляции для двух сигналов x и y ; m – величина дискретного сдвига одного сигнала относительно другого; N – количество отсчетов сигнала, используемых для оценки взаимной корреляции.

Результаты имитационных экспериментов показали, что в зависимости от того, на каком участке КВЛ произошло повреждение, волны по-разному распространяются от места повреждения, отражаясь и проходя через места резкой неоднородности (шины ПС, кабельно-воздушный переход и т.д.). Таким образом, волновые переходные составляющие сигнала, зарегистрированные на определенном временном промежутке, формируют уникальный волновой портрет, характеризующий конкретный поврежденный участок и МП КВЛ.

В третьей главе представлены разработанные новые способы АПВ и ОМП КВЛ, основанные на оценке волнового процесса, а также их апробация на имитационных моделях комплексов КВЛ различной конфигурации.

Разработан способ одностороннего АПВ и ОМП КВЛ, основанный на распознавании волновых портретов с применением корреляции. Структурная схема разработанного одностороннего алгоритма ОМП и АПВ КВЛ показана на рисунке 7. Измеряемый сигнал тока или напряжения (ИС на рисунке 7) подвергается цифровой фильтрации и специальной обработке и, таким образом, формируется фиксируемый волновой портрет. Далее вычисляются коэффициенты корреляции зафиксированного сигнала (реальный волновой портрет) с эталонными портретами, полученными заранее путем имитационного моделирования.

Разработан способ двустороннего АПВ КВЛ, использующий несинхронизированные измерения и упрощенную обработку волновых сигналов, позволяющий определить поврежденный участок КВЛ и заблокировать АПВ при КЗ на

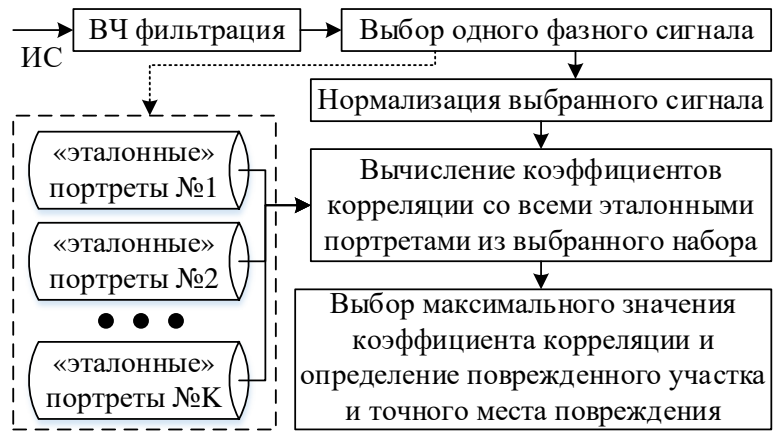


Рисунок 7 – Этапы вычислений корреляционного алгоритма АПВ и ОМП КВЛ

КЛ. На рисунке 8 на примере двух разных КВЛ (а и б) показаны зависимости отношения амплитуд падающих волн напряжения от места повреждения, что демонстрирует различимость повреждений на разных участках КВЛ. Метод основан на том факте, что в зависимости от поврежденного участка КВЛ и места повреждения электромагнитные волны претерпевают различное затухание на пути к ПС из-за рассогласованности волновых сопротивлений разных участков КВЛ. Поэтому, оценив амплитуду фронтов волновых сигналов по концам ЛЭП, можно определить поврежденный участок.

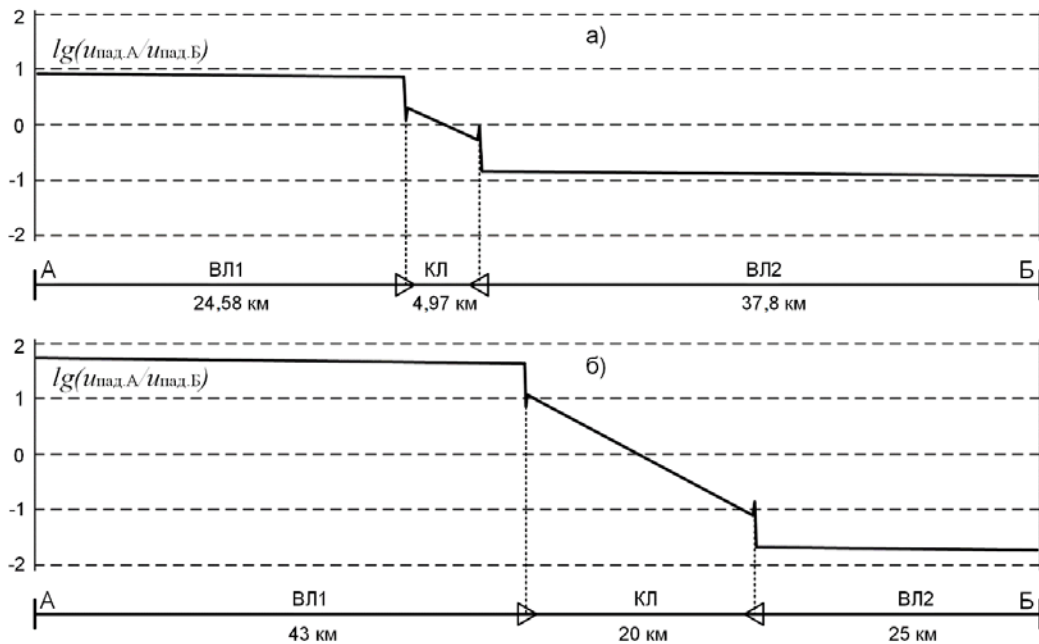


Рисунок 8 – Зависимости отношения амплитуд падающих волн напряжения по двум концам КВЛ от места повреждения и поврежденного участка

Разработан метод АПВ и ОМП КВЛ, основанный на двусторонних синхронизированных измерениях времени обнаружения начальных волн и применимый для КВЛ с любым количеством участков. Для пояснения метода удобно рассмотреть КЗ на одном из участков КВЛ, показанной на рисунке 9. Анализируя путь, пройденный волнами, и прошедшее при этом время нетрудно получить выражение для определения времени распространения волны от КЗ до выбранного конца КВЛ (2). Полученное значение времени сравнивается со значениями времени распространения по участкам КВЛ и по результатам сравнения определяется поврежденный участок.

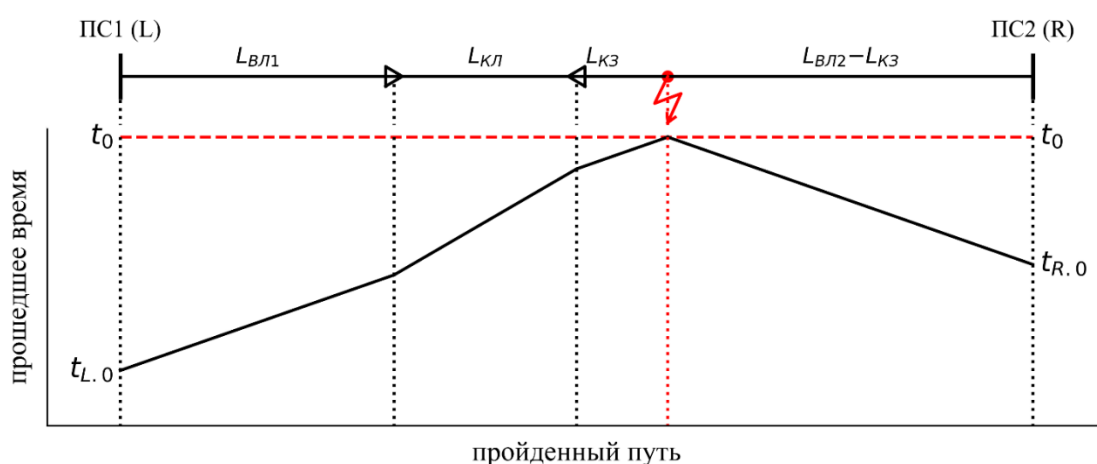


Рисунок 9 – Диаграмма распространения начальных волн от КЗ до концов КВЛ

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

где $t_{L.0}$, $t_{R.0}$ – момент времени прихода волн к ПС1 (L) и к ПС2 (R) соответственно; $\tau_{КВЛ} = \tau_{ВЛ1} + \tau_{КЛ} + \tau_{ВЛ2}$ – полное время распространения волн по КВЛ.

Расстояние от начала поврежденного участка до места повреждения может быть определено по выражению (3):

$$L_{КЗ} = (\tau_{КЗ-ПС1} - \sum_{m=1}^{k-1} \tau_m) \cdot \frac{L_k}{\tau_k}, \quad (3)$$

где L_k и τ_k – соответственно длина и время распространения для поврежденного участка КВЛ, имеющего номер k (отсчет ведется от ПС1); τ_m – время распространения для участка с номером m .

Проведен анализ алгоритмов цифровой фильтрации высокочастотных составляющих электромагнитного волнового процесса при повреждениях ЛЭП с

применением фильтров, имеющих конечную импульсную характеристику. Исследовано применение методов цифровой фильтрации, позволяющих уменьшить искажения сигналов тока и напряжения.

В четвертой главе приведены результаты полунатурных испытаний разработанных способов АПВ и ОМП КВЛ с использованием сигналов реальных осциллограмм пяти случаев КЗ на комплексе КВЛ 220кВ Тамань-Кафа, а также рассмотрены вопросы практической реализации разработанных способов.

Определен процесс задания настроек разработанных алгоритмов АПВ и ОМП КВЛ. Построены кросскорреляционные карты для рассматриваемой КВЛ, обосновывающие уникальность волновых портретов каждого места КЗ.

Испытания способа АПВ КВЛ с применением корреляционных функций сопровождалась погрешностью ОМП, соответствующей шагу моделирования повреждения КВЛ при составлении эталонных портретов. В качестве иллюстрации на рисунке 10 показаны схема КВЛ с обозначением реального места повреждения одного из случаев КЗ и зависимости значений коэффициента корреляции от возможного места повреждения при проведении измерений на двух ПС, пик корреляции соответствует наиболее вероятному месту КЗ для этого случая.

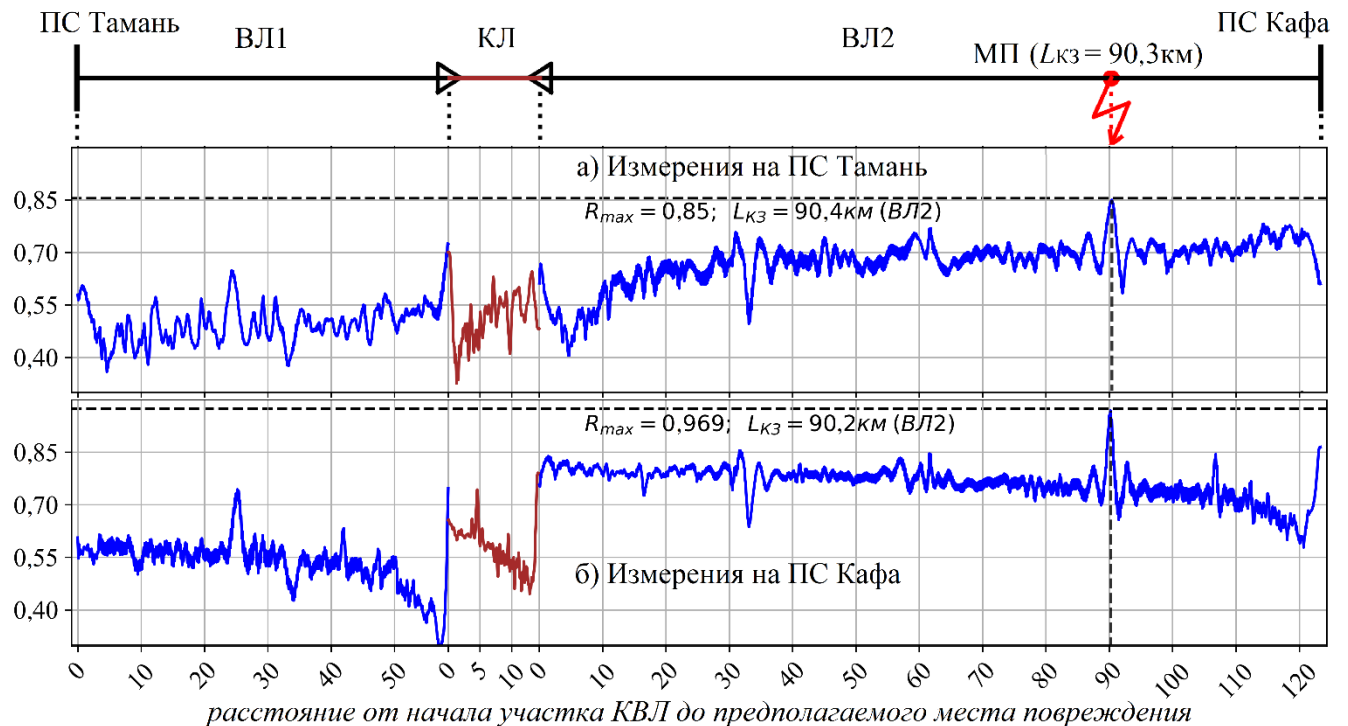


Рисунок 10 – Зависимость значений коэффициента корреляции от возможного места повреждения при измерениях на ПС Тамань (а) и ПС Кафа (б)

Исследования двусторонних методов АПВ КВЛ также показали хорошие результаты. Оценка поврежденного участка для АПВ производилась однозначно, а оценка расстояния до места повреждения на воздушном участке КВЛ обеспечивалась с погрешностью не более 200 м (менее длины пролета ЛЭП).

Разработан программно-аппаратный комплекс опытного устройства АПВ и ОМП КВЛ, функциональная схема которого изображена на рисунке 11. Логика принятия решения АПВ КВЛ объединяет одновременно три алгоритма определения повреждённого участка КВЛ, что необходимо для взаимного резервирования различных способов.

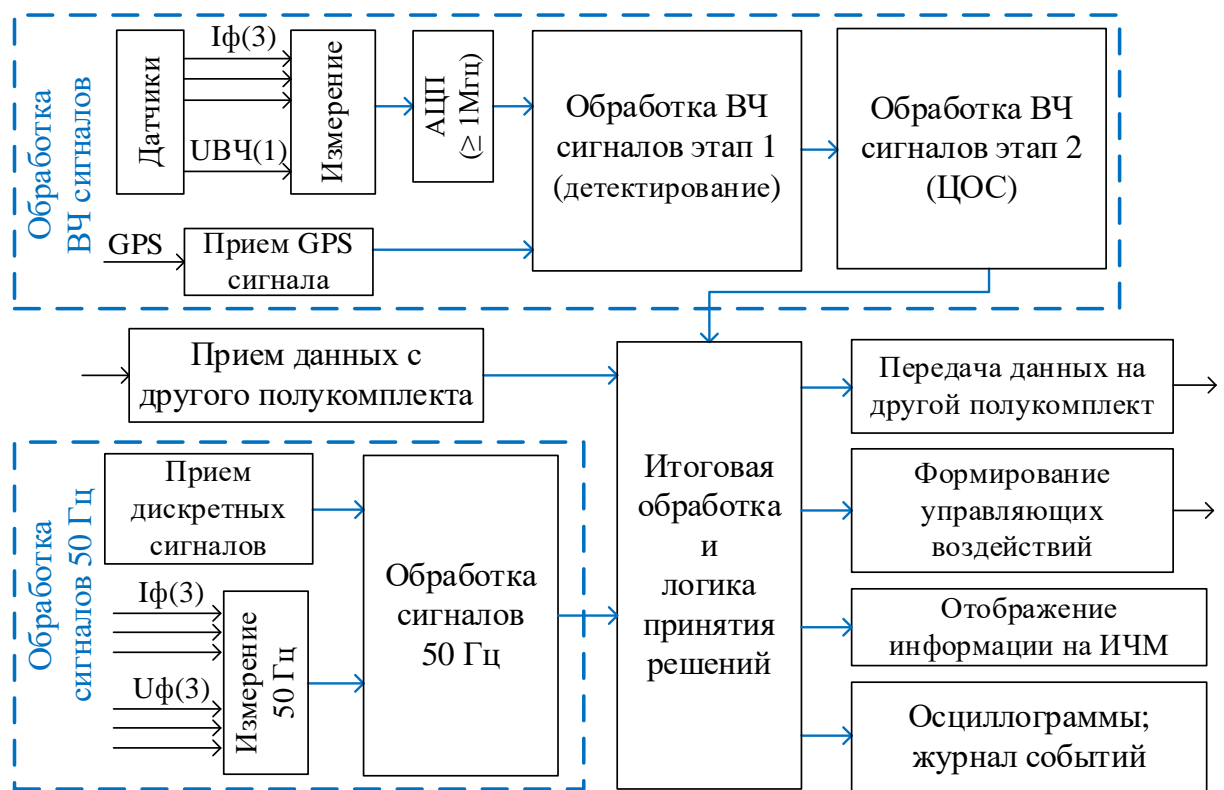


Рисунок 11 – Функциональная схема опытного устройства АПВ КВЛ

Отмечено, что выбор типа используемых в устройстве трансформаторов тока (ТТ) является важной задачей, поскольку от выбора зависит качество измеряемых сигналов. Предложен метод испытания ТТ на предмет их пригодности для использования в устройствах, реализующих волновые методы, посредством измерения и оценки частотных и переходных характеристик. Лабораторные испытания показали возможность использования обычных ТТ в задачах волнового АПВ и ОМП КВЛ. При этом показана необходимость проведения отбора ТТ на

производстве, поскольку разные образцы ТТ одного типа могут иметь существенно отличающиеся частотные характеристики.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные и практические результаты диссертационной работы состоят в следующем:

1. Предложена классификация способов селективного АПВ КВЛ по принципу действия, выполнен сопоставительный анализ технических решений. Обоснована актуальность разработки и реализации новых методов АПВ КВЛ на основе цифровой обработки волновых сигналов токов и напряжений.

2. Исследованы волновые переходные процессы на имитационных моделях КВЛ различной конфигурации. Произведена оценка влияния различных факторов на волновой процесс. Показано, что повреждения на разных участках КВЛ существенно отличаются волновыми параметрами токов и напряжений. Разработаны имитационные модели реальных ЛЭП с высокой достоверностью (коэффициент корреляции модельных и реальных сигналов составил 0,977).

3. Предложены новые способы селективного АПВ КВЛ, использующие как односторонние, так и двусторонние измерения высокочастотных составляющих сигналов тока и напряжения в переходном процессе, вызванным повреждением КВЛ. Реализация способов позволяет упростить электротехнический комплекс АПВ КВЛ, снизить затраты и повысить надежность. Снижение количества необходимого оборудования комплекса АПВ КВЛ достигает 50%.

4. Проведены полунатурные испытания разработанных способов АПВ и ОМП КВЛ с использованием сигналов реальных осциллограмм пяти случаев КЗ на комплексе КВЛ 220кВ Тамань-Кафа. Результаты испытаний показали однозначную классификацию поврежденного участка КВЛ, а ОМП на воздушном участке реализовалось с погрешностью не более 200 м (менее длины пролета ЛЭП).

5. Разработана логика принятия решения о блокировании или разрешении АПВ КВЛ, при которой возможно использование различных алгоритмов определения поврежденного участка и места повреждения КВЛ.

6. Предложен программно-аппаратный комплекс опытного устройства АПВ и ОМП КВЛ, реализующий одновременно три алгоритма определения повреждённого участка КВЛ, а также автоматику управления выключателем. Одновременное применение трёх различных алгоритмов АПВ КВЛ позволяет осуществить взаимное резервирование.

7. Обоснована необходимость проведения отбора трансформаторов тока при производстве устройств АВП КВЛ и разработана методика проведения испытаний. Введение контроля необходимо из-за неодинаковых частотных характеристик образцов трансформаторов тока одного типа.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях перечня ВАК:

1. Куликов, А.Л. Алгоритм идентификации поврежденного участка на кабельно-воздушных линиях электропередачи на основе распознавания волновых портретов / А.Л. Куликов, А.А. Лоскутов, **П.С. Пелевин** // Электричество. – 2018. – №3. – с. 11-17.

2. Куликов, А.Л. Применение дискриминаторных методов для оценки параметров режима энергорайонов с объектами распределенной генерации / А.Л. Куликов, П.В. Илюшин, **П.С. Пелевин** // Электричество. –2019.–№7. –с. 22-35.

3. Куликов, А.Л. Распознавание бросков тока намагничивания трансформаторов для предотвращения излишнего действия релейной защиты в тяговых сетях переменного тока / А.Л. Куликов, **П.С. Пелевин**, А.А. Лоскутов // Электроника и электрооборудование транспорта. –2019. –№6. –с. 2-7.

4. Куликов, А.Л. Метод автоматического повторного включения на кабельно-воздушных ЛЭП с использованием двусторонних измерений / А.Л. Куликов, **П.С. Пелевин**, А.А. Лоскутов // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. –2019. –№4(127). –с. 81-90.

5. Куликов, А.Л. Повышение надежности кабельно-воздушных линий электропередачи путем организации интеллектуального автоматического повторного включения / А.Л. Куликов, **П.С. Пелевин**, А.А. Лоскутов // Электроэнергия. Передача и распределение. –2020. –№3. –с. 88-94.

6. Лоскутов, А.А. Разработка логической части интеллектуальной многопараметрической релейной защиты / А.А. Лоскутов, **П.С. Пелевин**, М. Митрович // Электричество. –2020. –№5. –с. 12-18.

В изданиях Scopus:

7. Kulikov, A. Recognizing of Traveling Wave Patterns on Digital Substations for Automatic Reclosing of High-Voltage Overhead-Cable Power Lines Transmissions / A. Kulikov, A. Loskutov, A. Loskutov, **P. Pelevin** // International Journal of Applied Engineering Research. – 2017. – vol. 12. – num. 21. – pp. 11118-11123.
8. Loskutov, A. Pattern recognition methods application to power systems protection and control / A. Loskutov, **P. Pelevin** // 2018 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). – 2018. – pp. 1-5.
9. Kulikov, A.L. Combining of travelling wave methods and methods based on emergency mode parameters estimation for improvement of relay protection / A.L. Kulikov, A.A. Loskutov, **P.S. Pelevin** // 14th International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE). –2018. –pp. 193-198.
10. Kulikov, A. Methods for implementing of the single-ended traveling wave fault locating on the transmission lines based on traveling wave pattern recognition / A. Kulikov, A. Loskutov, **P. Pelevin** // 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). – 2018. – pp. 1-6.
11. Loskutov, A. Development of the logical part of the intellectual multi-parameter relay protection / A. Loskutov, **P. Pelevin**, M.Mitrovic // Rudenko International Conference “Methodological problems in reliability study of large energy systems” (RSES 2019). E3S Web of Conferences. –Vol. 139. – 2019. – p. 5.
12. **Pelevin, P.** Improving the reliability of combined overhead and cable power lines by organizing smart autoreclosing / P. Pelevin, A. Loskutov, T. Sharafeev // Rudenko International Conference “Methodological problems in reliability study of large energy systems” (RSES 2019). –Vol. 139. – 2019. – p. 5.
13. Kulikov, A. Application of Correlation Methods for Traveling Wave Fault Locating and Automation of Intelligent Electrical Networks / A. Kulikov, A. Loskutov, A. Loskutov, **P. Pelevin** // 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). – 2019. – pp. 1-6.
14. Kulikov, A. The Method of Faulted Section Estimation for Combined Overhead and Cable Power Lines Using Double-Ended Measurements / A. Kulikov, A. Loskutov, **P. Pelevin** // 2020 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), Chelyabinsk. – 2020. – pp. 70-75.
15. Kulikov, A. Validation of a simulation model of an overhead transmission line

for traveling wave transients investigation by calculating the correlation between simulated and real waveforms / A. Kulikov, **P. Pelevin** and A. Loskutov // International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS). -2021. -pp. 523-528.

16. Kulikov, A.L. Methods for the implementation of automatic reclosing on combined overhead and underground cable power lines 110-500 kV / A.L. Kulikov, **P. Pelevin**, A. Loskutov [et al.] // Przegląd Elektrotechniczny. –2022. –№. 7. – P. 52-57.

Патенты:

17. Патент на изобретение № 2658673 РФ, МПК H02H 3/06 (2006.01). Способ автоматического повторного включения кабельно-воздушной линии электропередачи : № 2017133565 : заявл. 26.09.2017 : опубл. 22.06.2018 / А.Л. Куликов, А.А. Лоскутов, **П.С. Пелевин** – 13 с. : ил.

18. Патент на изобретение № 2719763 РФ, МПК H02H 3/06 (2006.01). Способ автоматического повторного включения кабельно-воздушной линии электропередачи : № 2019143621 : заявл. 25.12.2019 : опубл. 23.04.2020 / А.Л. Куликов, **П.С. Пелевин**, А.А. Лоскутов – 16 с. : ил.

19. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020612951 РФ. Программа формирования набора сигналов волнового переходного процесса на линиях электропередачи: № 2020612017 : заявл. 29.02.2020 : опубл. 06.03.2020 : Бюл. №3. / **Пелевин П.С.**

Публикации в других изданиях:

20. **Пелевин, П.С.** Автоматическое повторное включение кабельно-воздушных линий электропередачи 110 кВ, основанное на контроле волновых переходных процессов / П.С. Пелевин, А.Л. Куликов, А.А. Лоскутов // Будущее технической науки: сборник материалов XVI Международной молодежной научно-технической конференции. – Н. Новгород, 2017. – с. 152-153.

21. Куликов, А.Л. Принципы реализации релейной защиты, основанной на распознавании волновых портретов / А.Л. Куликов, А.А. Лоскутов, **П.С. Пелевин** // Интеллектуальные энергосистемы: труды V Международного молодежного форума: в 3 т. – Томск: Изд-во ТПУ, 2017. – Т. 3. – с. 59-63.

22. **Пелевин, П.С.** Метод волновой РЗА, комбинирование с традиционными защитами / П.С. Пелевин, А.А. Лоскутов, рук. Куликов А.Л // Тринадцатая международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2018»: материалы конференции. ИГЭУ им. В.И. Ленина. –Иваново, 2018. –Т3. –с. 69-70.

23. Лоскутов, А.А. Применение методов распознавания образов в задачах защиты и управления электроэнергетических систем / А.А. Лоскутов, **П.С. Пелевин** // Пром-Инжиниринг: труды IV международной научно-технической конференции. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2018. – с. 309-313.

24. Куликов, А.Л. Комбинирование волновых и методов по параметрам аварийного режима для совершенствования релейной защиты / А.Л. Куликов, А.А. Лоскутов, **П.С. Пелевин** // Труды четырнадцатой международной научно-технической конференции Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП-2018). НГТУ, Новосибирск. –Т.7. –с.245-250.

25. Куликов, А.Л. Реализация функций АПВ кабельно-воздушных ЛЭП на основе обработки волновых портретов / А.Л. Куликов, А.А. Лоскутов, **П.С. Пелевин** // КИБЕРНЕТИКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ: Сборник материалов XL сессии научного семинара по тематике "Диагностика энергооборудования". 2018. – с. 350-354.

26. Куликов, А.Л. Особенности реализации автоматического повторного включения кабельно-воздушных ЛЭП с использованием волновых методов / А.Л. Куликов, А.А. Лоскутов, **П.С. Пелевин** // Проблемы и перспективы развития энергетики, электротехники и энергоэффективности: материалы II Междунар. Науч.-техн. Конф. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. Ун-та, 2018. – с. 74-80.

27. Куликов, А.Л. Варианты объединения волновых и ступенчатых защит электрических сетей / А.Л. Куликов, А.А. Лоскутов, **П.С. Пелевин** // Актуальные проблемы электроэнергетики: сб. ст./ Нижегород. гос. техн.ун-т им. Р.Е. Алексеева.–Нижний Новгород, 2018. – с 202-206.

28. **Пелевин, П.С.** Особенности цифровой обработки волновых составляющих переходного процесса при повреждениях ЛЭП / П.С. Пелевин, А.А. Лоскутов, В.Ю. Вуколов, рук. А.Л. Куликов // Четырнадцатая международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2019»: Материалы конференции. Т. 4. – Иваново: ИГЭУ, 2019. – с. 48-49.

29. **Пелевин, П.С.** Особенности цифровой обработки волновых составляющих переходного процесса при повреждениях ЛЭП / П.С. Пелевин, А.А. Лоскутов, В.Ю. Вуколов, рук. А.Л. Куликов // Четырнадцатая всероссийская (международная) научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2019»: материалы конференции. Т. 3. – 2019. – с. 45-45.

30. Куликов, А.Л. Методы цифровой фильтрации высокочастотных

составляющих переходного процесса при ОМП ЛЭП / А.Л. Куликов, А.А. Лоскутов, **П.С. Пелевин** // V Международная научно-практическая конференция (РЕЛАВЭКСПО-2019). Сборник докладов научно-технической конференции молодых специалистов. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2019. – с. 17-23.

31. Куликов, А.Л. Особенности применения одностороннего определения места повреждения на ЛЭП с использованием волновых портретов / А.Л. Куликов, А.А. Лоскутов, **П.С. Пелевин** // 21-й Международный научно-промышленный форум «Великие реки'2019»: труды научного конгресса. Т. 3. – 2019. – с. 66-69.

32. **Пелевин, П.С.** Повышение надежности кабельно-воздушных линий электропередачи путем организации интеллектуального автоматического повторного включения / П.С. Пелевин, А.А. Лоскутов, Т.Р. Шарафеев // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики: Вып. 70. Методические и практические проблемы надежности систем энергетики. Книга 2 / Отв. ред. Н.И. Воропай. Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2019. – с. 252-261.

33. **Пелевин, П.С.** Упрощенные методы определения поврежденного участка смешанных ЛЭП для блокирования АПВ / П.С. Пелевин, А.А. Лоскутов // Электроэнергетика. Пятнадцатая всероссийская (седьмая международная) научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых: материалы конференции. В 6 т. Т. 3. – Иваново: ИГЭУ, 2020. – с. 60-60.

34. **Пелевин, П.С.** Разработка модели ЛЭП для анализа алгоритмов волнового ОМП с использованием реальных сигналов / П.С. Пелевин, А.А. Лоскутов // Семнадцатая всероссийская (девятая международная) научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых: материалы конференции. В 6 т. – Иваново: ИГЭУ. – 2022. – с. 64-64.

35. **Пелевин, П.С.** Разработка имитационных моделей ЛЭП для исследований алгоритмов волнового ОМП / П.С. Пелевин, А.А. Лоскутов // Электроэнергетика глазами молодежи: Материалы XII Международной научно-технической конференции, Н. Новгород. Том Часть I. –2022. – С. 249-252.