

На правах рукописи



КИРЖАЦКИХ ЕЛЕНА РИНАТОВНА

**ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЙ МЕТОД И УСТРОЙСТВО КОНТРОЛЯ
ВОЗНИКНОВЕНИЯ ОДНОФАЗНОГО ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ И
ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЕГО МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ В ВОЗДУШНЫХ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ 6-10 КВ С ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ**

2.2.8. Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и
природной среды

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Казань – 2022

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» на кафедре «Электроэнергетические системы и сети»

Научный руководитель: **Козлов Владимир Константинович**
доктор физико-математических наук, профессор,
профессор кафедры «Электроэнергетические системы
и сети» ФГБОУ ВО «Казанский государственный
энергетический университет»

Официальные оппоненты: **Куликов Александр Леонидович**
доктор технических наук, профессор,
заместитель генерального директора ООО «Научно-
производственное предприятие «Автоматические
локационные искатели мест повреждений»

Шадрикова Татьяна Юрьевна
кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры «Автоматическое управление
электроэнергетическими системами» ФГБОУ ВО
«Ивановский государственный энергетический
университет имени В.И. Ленина»

Ведущая организация: Чебоксарский институт (филиал) ФГАОУ ВО
«Московский политехнический университет»,
г. Чебоксары

Защита состоится 23 декабря 2022 г. в 10 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.310.01, созданного на базе ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» (КГЭУ), по адресу: 420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51, ауд. Д 224, тел.: (843)5194202, 5194237

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, с указанием контактных данных и заверенных печатью учреждения, просим направлять по адресу: 420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51, КГЭУ, Ученому секретарю диссертационного совета 24.2.310.01

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке КГЭУ по адресу: 420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51 и на официальном сайте КГЭУ <https://kgeu.ru/Diss/Dissertant/198?idDiss=135>

Автореферат разослан «_____» _____ 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета, д.ф.-м.н.



Калимуллин Рустем Ирекович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности

Наиболее распространенными повреждениями в воздушных электрических сетях 6-10 кВ являются однофазные замыкания на землю (ОЗЗ), которые составляют около 60-80% от общего числа повреждений.

Соотношения линейных напряжений при ОЗЗ не изменяются, что позволяет эксплуатировать сеть, не отключая повреждения. Однако продолжительная работа сети в режиме ОЗЗ может привести к замыканию на землю других фаз и возникновению двойного замыкания на землю, что в свою очередь требует немедленного отключения поврежденного участка сети. Кроме того, ток однофазного замыкания, растекаясь по земле вблизи места замыкания на землю, представляет опасность для жизни людей и животных (шаговое напряжение и напряжение прикосновения).

Согласно Правилам технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации, сети с изолированной нейтралью при ОЗЗ могут работать до устранения повреждения. При этом к отысканию места повреждения следует приступать немедленно и ликвидировать повреждение в кратчайший срок.

На сегодняшний день действие релейной защиты установлено только на сигнал по Правилам устройства электроустановок. Дистанционные апробированные устройства позволяют определить лишь поврежденное присоединение. Топографические методы удовлетворяют требованиям точности, но занимают около 2-6 часов. Метод последовательного деления сети позволяет выделить лишь поврежденный участок линии при наличии геоинформационной системы. В практическом применении эти устройства имеют низкую чувствительность к измерительным параметрам из-за малого тока замыкания на землю, поэтому расстояние определяемого участка с ОЗЗ может составлять от 1 до 10 км.

Процедура определения места повреждения (ОМП) является сложной задачей, которая затруднена наличием ответвлений на линиях и низкой чувствительностью регистрирующих элементов релейной защиты к замыканиям на землю.

Задачам обнаружения места повреждения, в частности, места ОЗЗ посвящены работы: А.Л. Куликова, Ф.А. Лихачева, Г.В. Вагапова, Р.Г. Хузяшева, Ф.А. Латипова, М.Ш. Мисриханова, А.И. Федотова, М.А. Шабада, А.И. Шалина, Г.М. Шалыта, А.С. Малый, В.А. Шуина, Р.Э. Абдуллазянова и др. Проведенный анализ литературы по данной тематике не позволяет получить однозначное техническое решение задачи определения мест ОЗЗ в распределительных сетях 6-10 кВ с изолированной нейтралью. Таким образом, разработка дистанционного метода определения места повреждения при ОЗЗ является актуальной задачей, которая позволит без отключения линии определить поврежденную отпайку и расстояние до места повреждения.

Методология и методы исследования

Объект исследования – воздушные ЛЭП напряжением 6–10 кВ с изолированной нейтралью.

Предмет исследования – дифференциальный метод определения местоположения ОЗЗ в воздушных ЛЭП 6-10 кВ с изолированной нейтралью по фазным значениям напряжения поврежденной фазы, измеренным в начале и в конце ЛЭП.

Цель исследования – разработка и исследование дифференциального метода определения расстояния до ОЗЗ в воздушных ЛЭП 6-10 кВ с изолированной нейтралью по значениям напряжения поврежденной фазы и разработка устройства для его реализации.

В соответствии с целью исследования были поставлены следующие **задачи**.

1. Проанализировать существующие методы определения местоположения ОЗЗ в сетях 6-10 кВ, их достоинства и недостатки.

2. Разработать дифференциальный метод определения расстояния до ОЗЗ по фазным значениям напряжения на поврежденной фазе.

3. Исследовать влияние источника питания, нагрузки потребителя, переходного сопротивления в месте замыкания и сопротивления земли на разрабатываемый метод.

4. Разработать методику и программное обеспечение по дифференциальному методу определения местоположения ОЗЗ в сетях 6-10 кВ с изолированной нейтралью.

5. Разработать и создать устройство для измерения значения напряжения на воздушной ЛЭП с беспроводной передачей информации и подтвердить его эффективность в лабораторных и полевых испытаниях.

6. Разработать модернизированный дифференциальный метод определения расстояния до ОЗЗ по разности потенциалов между обкладками конденсатора, образованного токопроводом и дополнительным металлическим стержнем разрабатываемого устройства.

Методы исследования

При выполнении диссертационной работы использовались следующие методы: теоретический анализ состояния вопроса, теоретические основы электротехники, теории установившихся процессов в электрических сетях, метод симметричных составляющих, метод фазных координат. Исследования проводились с применением численных методов, компьютерного моделирования, проведены экспериментальные исследования метода и устройства для измерения значения напряжения 6-10 кВ в лабораторных и полевых испытаниях.

Научная новизна

1. Впервые разработан дифференциальный метод определения расстояния до ОЗЗ в воздушных сетях 6-10 кВ с изолированной нейтралью, основанный на исследовании установившегося значения напряжения поврежденной фазы, измеренного в начале и в конце ВЛ.

2. Предложена методика и программное обеспечение по дистанционному определению местоположения ОЗЗ для линии с двумя отпайками.

3. Разработано малогабаритное автономное устройство для измерения значения напряжения 6-10 кВ на основе емкостного делителя напряжения с передачей информации по беспроводному каналу связи.

4. Доказана в лабораторных условиях и при опытной эксплуатации на ВЛ 10 кВ эффективность разработанного устройства для измерения значения напряжения и возможность его применения для дифференциального метода определения местоположения ОЗЗ.

5. Разработан модернизированный дифференциальный метод определения расстояния до ОЗЗ в распределительных сетях 6-10 кВ с изолированной нейтралью, основанный на исследовании значения разности потенциалов между обкладками конденсатора, образованного токопроводом и дополнительным металлическим стержнем устройства контроля в начале и в конце ВЛ.

Теоретическая значимость

1. Установленная зависимость между значениями фазного напряжения поврежденной фазы в установившемся режиме позволяет определить расстояние до ОЗЗ без рассмотрения источника питания, параметров трансформатора, нагрузки потребителя и переходного сопротивления в месте замыкания.

2. Применение емкостного делителя напряжения в устройстве для измерения значения напряжения позволяет определить фазное значение напряжения на токопроводе ВЛЭП 6-10 кВ.

3. Установлена зависимость между разностью потенциалов на обкладках конденсатора, образованного токопроводом и дополнительным металлическим стержнем устройства контроля, в начале и в конце ВЛ, и расстоянием до ОЗЗ, независимо от соотношений емкостей емкостного делителя напряжений.

Практическая значимость заключается в сокращении времени на локацию места повреждения при ОЗЗ; в сокращении материальных затрат на обход (объезд) и верховой осмотр ВЛ для определения локации ОЗЗ в сетях 6-10 кВ; способом дистанционного автоматического мониторинга возникновения ОЗЗ и определения расстояния до него.

На защиту выносятся

1. Дифференциальный метод определения местоположения ОЗЗ в воздушных ЛЭП 6-10 кВ с изолированной нейтралью путем измерения значения напряжения на поврежденной фазе в установившемся режиме в начале и в конце линии.

2. Методика и программное обеспечение по автоматическому дистанционному определению местоположения ОЗЗ в воздушных ЛЭП 6-10 кВ с изолированной нейтралью.

3. Автономное устройство для измерения фазного значения напряжения на основе емкостного делителя напряжения с передачей сигнала по беспроводному каналу связи и положительные результаты экспериментального исследования на действующей линии 10 кВ.

4. Модернизированный дифференциальный метод определения местоположения ОЗЗ в воздушных ЛЭП 6-10 кВ с изолированной нейтралью путем измерения разности потенциалов между обкладками конденсатора, образованного токопроводом и металлическим стержнем устройства контроля возникновения ОЗЗ, в начале и в конце линии в установившемся режиме на поврежденной фазе.

Публикации и патенты

По теме диссертации опубликованы 23 печатные работы, включая 4 статьи в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в международной базе данных SCOPUS, 4 статьи в журналах, входящих в перечень ВАК по научной специальности диссертации, 2 патента на изобретение, 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ, 2 статьи в журналах, входящих в перечень ВАК по другим научным специальностям, 10 публикаций в материалах докладов всероссийских и международных научных конференций.

Реализация результатов исследования

Разработанные устройства контроля возникновения ОЗЗ внедрены в опытную эксплуатацию на каждой фазе ВЛЭП (ВЛ 10 кВ РП-89 Ф-13) на территории Восточного РЭС филиала АО «Сетевая компания» Казанские электрические сети. Также результаты исследований нашли применение в ООО «НПК «Силеста».

Личный вклад автора

Результаты, представленные в диссертации и отраженные в публикациях, получены при непосредственном участии соискателя. Автор участвовал в лабораторных и натурных испытаниях, им проведены исследования зависимости расстояния до ОЗЗ от значений напряжений поврежденной фазы. Автор проводил исследования влияния различных параметров ЛЭП на разрабатываемый метод. Автор проводил технические расчеты, лабораторные и полевые испытания устройства, участвовал в обсуждении и подготовке основных публикаций по выполненной работе. Соискатель являлся основным автором идей патентов на изобретения.

Соответствие диссертации научной специальности

Диссертация соответствует специальности 2.2.8 – Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды. Представленные в ней результаты, отвечают следующим пунктам паспорта специальности: п. 1 «Научное обоснование новых и совершенствование существующих методов, аппаратных средств и технологий контроля, диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды, способствующее повышению надёжности изделий и экологической безопасности окружающей среды»; п. 3 «Разработка, внедрение, испытания методов и приборов контроля, диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды, способствующих повышению надёжности изделий и экологической безопасности окружающей среды»; п. 6 «Разработка математических моделей, алгоритмического и программно-технического обеспечения обработки результатов регистрации сигналов в приборах и

средствах контроля и диагностики с целью автоматизации контроля и диагностики, подготовки их для внедрения в цифровые информационные технологии».

Достоверность и обоснованность полученных результатов

Доказана эффективность применения среды MatLab Simulink для моделирования ЛЭП. Подтверждена сходимость результатов расчета линии методом фазных координат и вычислительной программы Matlab Simulink. Полученные результаты подтверждены необходимым объемом экспериментальных исследований. Достоверность результатов предложенного дифференциального метода определения местоположения ОЗЗ подтверждена в лабораторных, а также полевых условиях при испытаниях на действующей ВЛ 10 кВ. Полученные результаты и их интерпретация не противоречат основным положениям науки и опубликованным результатам других авторов.

Апробация работы

Основные положения и практические результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на: VIII, IX, XIII, XIV Открытых молодежных научно-практических конференциях «Диспетчеризация и управление в электроэнергетике» (Казань, 2013, 2014, 2018, 2019); IX и X Международных молодежных научных конференциях «Тинчуринские чтения (Казань, 2014, 2015); V областной научно-практической конференции «Молодежь и наука – шаг в будущее» (Оренбург, 2014); V Ярославском энергетическом форуме (Ярославль, 2014); X Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2015» (Иваново, 2015); VI и VII Международных научно-технических конференциях «Электроэнергетика глазами молодежи» (Иваново, 2015, 2016); VIII Слете молодых энергетиков-электросетевиков Башкортостана (Мелеуз, 2018); Всероссийской научно-практической конференции «Режимы нейтрали. Ограничение перенапряжений. Релейная защита. 2019» (Екатеринбург, 2019); Международной научно-технической конференции «Smart Energy System 2019» (Казань, 2019); X Юбилейной международной научно-технической конференции «Электроэнергетика глазами молодежи» (Иркутск, 2019); II Международной молодежной научно-технической конференции IEEE «Релейная защита и автоматика» (Москва, 2019); Международной научно-практической конференции «Развивая энергетическую повестку будущего» для представителей сообщества молодых инженеров ТЭК (Санкт-Петербург, 2021); Международной научно-технической конференции «Электротехнические комплексы и системы» (Магнитогорск, 2022).

Диссертационные исследования и разработки выполнены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках госзадания на выполнение НИР по теме «Распределенные автоматизированные системы мониторинга и диагностики технического состояния воздушных линий электропередачи и подстанций на основе технологии широкополосной передачи данных через линии электропередач и промышленного интернета вещей» (соглашение №075-03-2022-151 от 14.01.2022).

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из 4 глав, содержащих выводы, заключения, списка публикаций автора, списка цитируемой литературы и 5 приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи работы, приведены основные положения, выносимые на защиту, указана научная новизна и практическая значимость выполненной работы.

В первой главе выполнен литературный и патентный обзор по теме диссертации в области определения места повреждения при ОЗЗ в электрических сетях 6-10 кВ с изолированной нейтралью.

Во второй главе проведено исследование дифференциального метода по дистанционному определению местоположения ОЗЗ, проведены исследования по влиянию параметров источника, нагрузки, переходного сопротивления в месте замыкания, сопротивления земли на разрабатываемый метод. Разработаны методика и программное обеспечение (ПО) по определению расстояния до ОЗЗ в воздушных электрических сетях с изолированной нейтралью.

В программном пакете Matlab Simulink промоделирована ЛЭП 10 кВ, выполненная проводами марки АС 35/6,2 длиной 10 км (рис. 1), и получена зависимость значений напряжений поврежденной фазы в установившемся режиме, измеренных в начале, в середине и в конце ЛЭП, от расстояния до ОЗЗ.

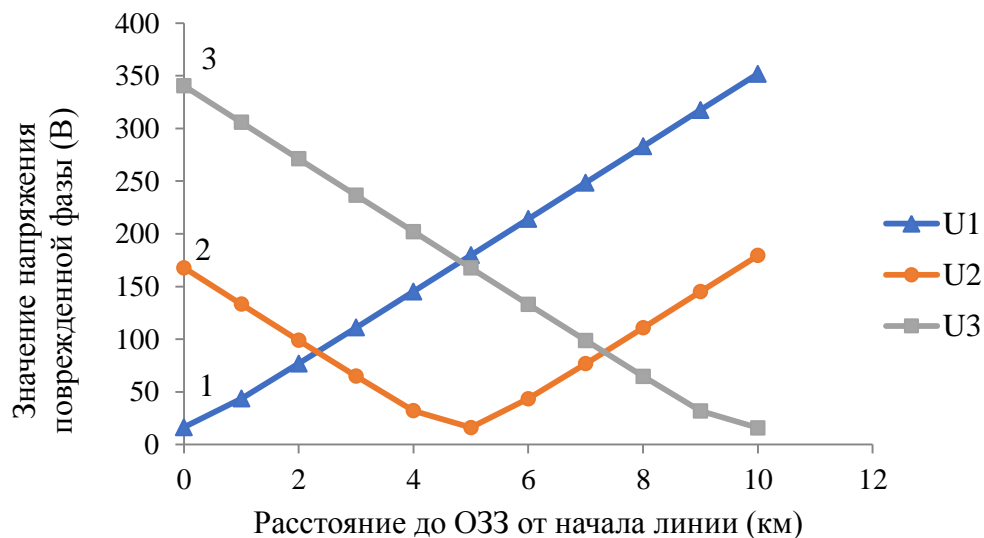


Рисунок 1 – Зависимость значения напряжения поврежденной фазы от расстояния до ОЗЗ: 1 - измерение в начале линии, 2 - в середине, 3 - в конце линии

Из рисунка 1 видно, что измерение в середине линии не вносит дополнительной информации, поэтому достаточно применения устройств для регистрации значения напряжения в начале и в конце ЛЭП.

Было доказано, что параметры питающих трансформаторов, параметры линии, переходного сопротивления в месте замыкания (металлическое) и

нагрузки потребителя не влияют на разрабатываемый метод при применении разностного метода между значениями напряжения поврежденной фазы, измеренных в начале и в конце ВЛ (рис. 2).

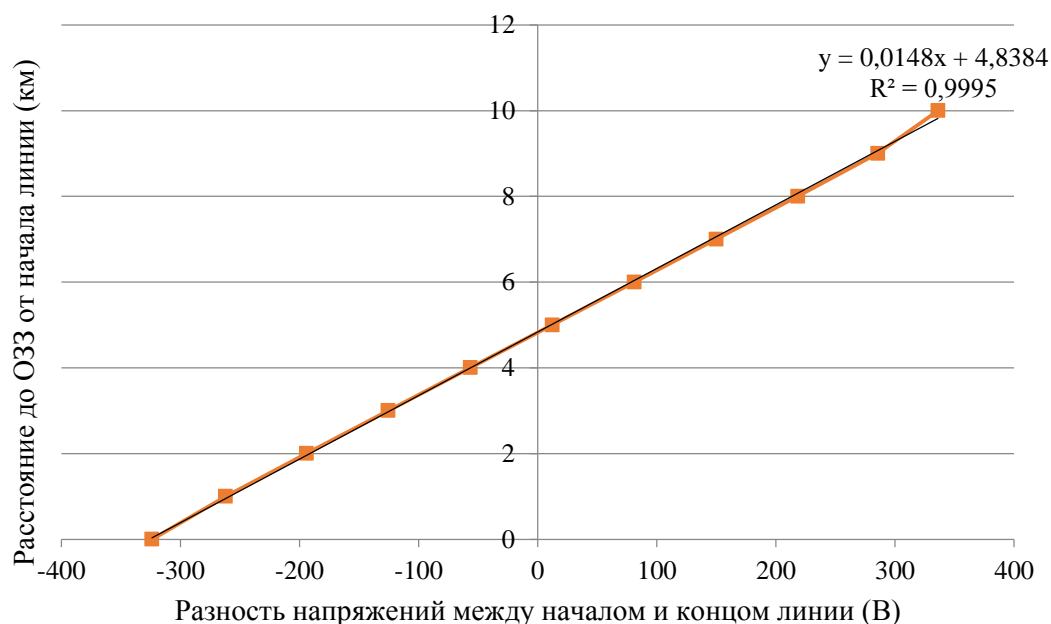


Рисунок 2 – Дифференциальный метод определения местоположения ОЗЗ

При ОЗЗ в непосредственной близости от установки устройств для измерения напряжения, влияние удельного сопротивления земли может давать небольшую погрешность, поэтому необходимо это учитывать и моделировать этот параметр заранее для каждой линии.

Методика определения расстояния до ОЗЗ для линии без отпаек:

1. Моделирование ВЛ 10 кВ в программном пакете Matlab Simulink.
2. Построение зависимости $L = f(U_1 - U_2)$, где L – расстояние до ОЗЗ (км), U_1 и U_2 – значение напряжения поврежденной фазы, измеренное в начале и в конце ЛЭП.
3. Отправка сигналов об измеренных значениях напряжений в диспетчерский центр (U_1 , U_2).
4. Расчет разности между полученными значениями ($U_1 - U_2$) программным обеспечением.
5. Определение расстояния до места повреждения по заранее смоделированным зависимостям $L = f(U_1 - U_2)$, (согласно п.2).

В данном случае $L = 0,0148x + 4,8384$, где $x = U_1 - U_2$.

На данный способ определения местоположения ОЗЗ в воздушных сетях 6-10 кВ получен патент на изобретение РФ [10].

Точность определения местоположения ОЗЗ в сетях с изолированной нейтралью однозначно связана с точностью определения значения напряжения на поврежденной фазе. В случае, если точность измерения устройства 1%, то точность дифференциального метода составит тоже 1% от длины ВЛЭП, при длине 10 км – точность метода составит ± 100 м. Если точность устройства 0,5%, то точность метода при длине 10 км будет ± 50 м.

Распределительные сети среднего напряжения характеризуются древовидной формой, поэтому была смоделирована линия с двумя отпайками (рис. 3).

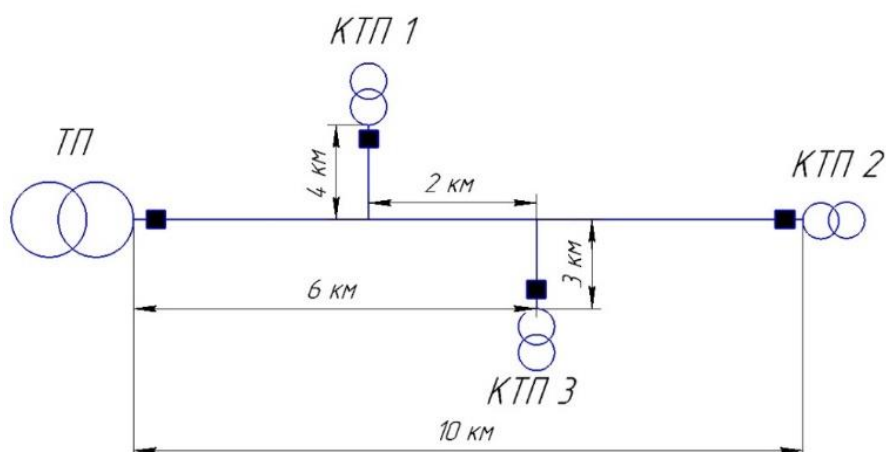


Рисунок 3 – Структурная схема линии с двумя отпайками

Для структурной схемы, представленной на рисунке 3, была получена зависимость между разностями напряжений поврежденной фазы в начале (U_1) и по концам ЛЭП (U_2, U_3, U_4) и расстоянием до ОЗЗ.

Методика определения места ОЗЗ для линий с несколькими отпайками описана в работах автора [1–3]. Согласно этой методике, разработано программное обеспечение, которое автоматически высчитывает, на какой отпайке и на каком расстоянии произошло повреждение. На ПО получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ [11].

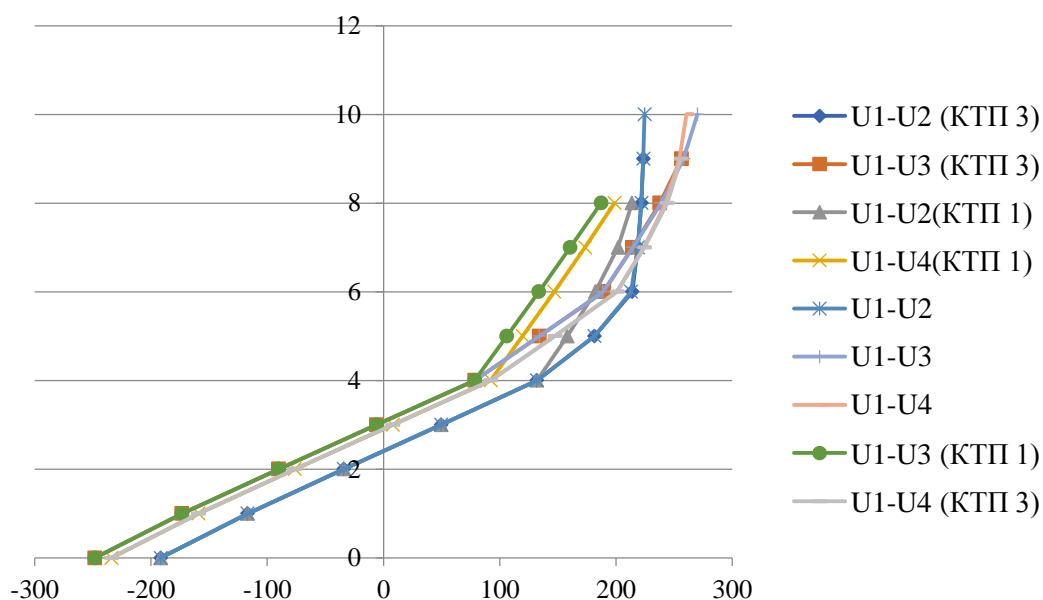


Рисунок 4 – Зависимость разности напряжений поврежденной фазы в начале (U_1) и по концам ЛЭП (U_2, U_3, U_4) от расстояния до ОЗЗ

В третьей главе представлена структурная схема устройства для измерения фазного значения напряжения в воздушных сетях 6-10 кВ с изолированной нейтралью, проведены натурные испытания по подбору

входного сопротивления блока для измерения напряжения на основе емкостного делителя напряжения, проведен обзор существующих источников питания и беспроводных каналов связи для устройства.

Для применения дифференциального метода было разработано устройство для измерения значения напряжения. Блок измерения напряжения выполнен в виде емкостного делителя напряжения (ЕДН), первой обкладкой которого является токопровод, второй – металлический изолированный стержень, параллельный токопроводу, подвешенный на расстоянии толщины изоляции стержня от первой обкладки (рис. 5).

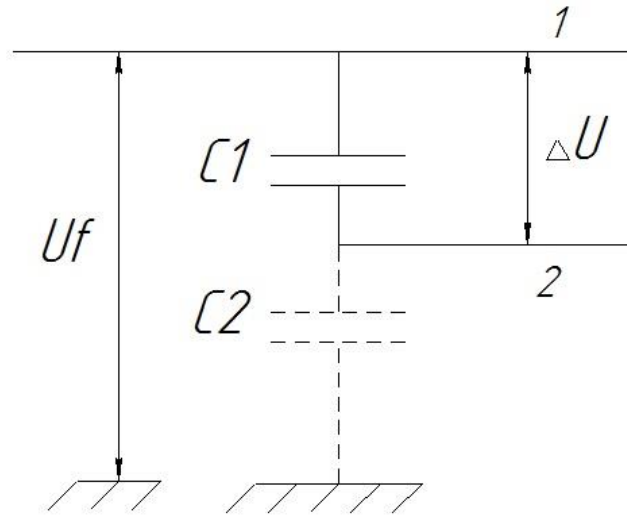


Рисунок 5 – Структурная схема емкостного делителя напряжения:

C_1 – емкость между токопроводом и металлическим стержнем;

C_2 – емкость между металлическим стержнем и землей

Согласно рисунку 5, зная разность потенциалов между токопроводом и дополнительным стержнем, можно определить значение фазного напряжения по формуле (1) с применением соотношений емкостей.

$$U_f = \frac{U C_1}{K} = \frac{\Delta U}{K}; \quad K = \frac{C_2}{C_1 + C_2}, \quad (1)$$

где ΔU – измеренная разность потенциалов между токоведущей частью и металлическим изолированным стержнем; C_1 – емкость между токоведущей частью и металлическим изолированным стержнем; C_2 – емкость между металлическим изолированным стержнем и землей [9].

Для проверки работоспособности ЕДН и выбора входного сопротивления блока для измерения напряжения собрана испытательная модель (рис. 6).

Были проведены испытания модели на кафедре ЭСиС КГЭУ, где была измерена емкость ЕДН и рассчитано необходимое емкостное сопротивление для согласования входа блока, равное 63 МОм. При применении сопротивления измерительного входа ЕДН (не менее 100 МОм), испытательная модель показала свою работоспособность в лаборатории высокого напряжения и на действующей ВЛ 10 кВ на территории Северного РЭС филиала АО «Сетевая компания» Казанские электрические сети.

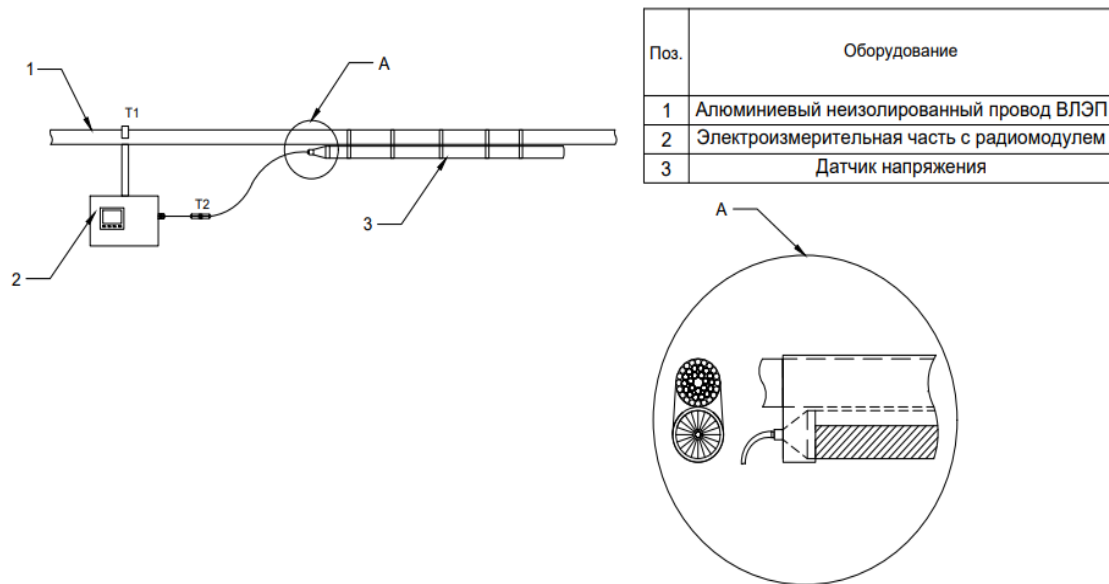


Рисунок 6 – Внешний вид испытательной модели

В четвертой главе представлены практическая реализация устройства контроля возникновения ОЗЗ, результаты проведенных лабораторных и натурных испытаний, а также описан модернизированный дифференциальный метод определения местоположения ОЗЗ.

За основу для разрабатываемого устройства принята ранее разработанная система контроля СМГ-16, разработанная в ФГБОУ ВО «КГЭУ» и переработанная путем внедрения нового блока измерения напряжения, согласно проведенным исследованиям, представленным в главе 3.

Устройство имеет распределенную архитектуру (рис. 7).

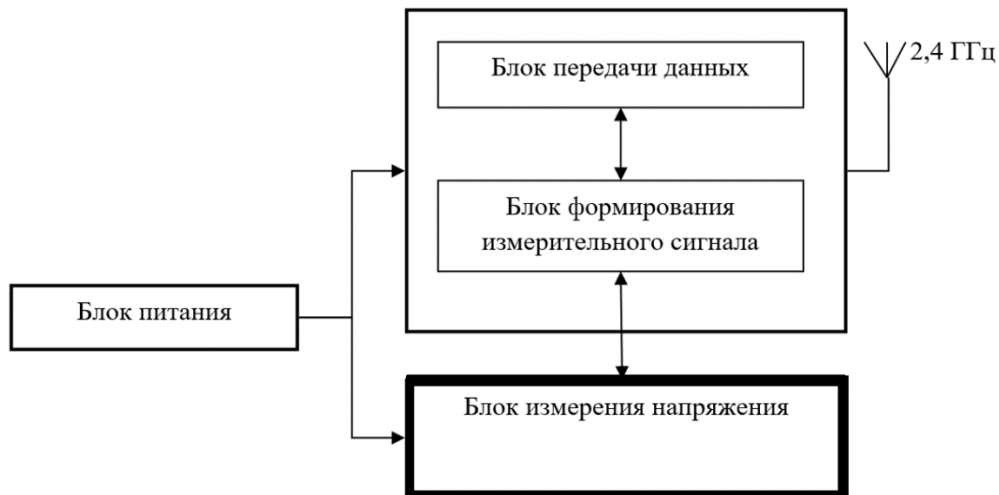


Рисунок 7 – Блок-схема разработанного устройства

Блок питания состоит из двух трансформаторов тока с разделяемыми сердечниками, печатной платы и резервирующих конденсаторов.

Первичным источником питания являются трансформаторы тока (2 шт.) с разделяемыми сердечниками из электротехнической стали. Основой корпуса является разделяемый алюминиевый каркас, на каждой части которого установлены половинки сердечников питающего трансформатора тока (ТТ). В

верхней части каркаса часть сердечника ТТ жестко закреплена. В нижней части каркаса она подвижна для более удобной стыковки сердечника при монтаже разрабатываемого устройства.

Печатная плата блоков передачи данных и формирования измерительного сигнала состоит из модуля беспроводной радиосвязи на основе приемопередатчика ETRX357HR-LRS по протоколу ZigBee на частоте 2,4 ГГц, который имеет низкое энергопотребление кристалла Silabs EM357 и систему АТ-команд, схемы формирования и обработки измерительного сигнала на основе микроконтроллера STM32F051, которая производит сбор и предварительную обработку данных, полученных с блока измерения напряжения по интерфейсу SPI. Используемый микроконтроллер имеет 32-битное ядро ARM Cortex M0, работает на частоте 48 МГц, имеет 64 кб Flash, 8 кб ОЗУ, интерфейсы SPI/I2S, SPI, 2*I2C, 2xUSART, CEC, 9 таймеров, а также 16-канальное АЦП на 12 бит.

С помощью блока передачи данных измеренные сигналы отправляются по беспроводному радиоканалу на основе стандарта IEEE 802.15.4. Применяемый стандарт беспроводной связи позволяет организовывать различные топологии сети. Данные с каждого комплекса по измерению значения напряжения на ВЛЭП 6-10 кВ могут передаваться сразу на ближайший пункт сбора информации (ТП / КТП / ПС), либо путем ретрансляции через соседние комплексы (рис. 8). Такой подход организации передачи данных позволяет осуществить резервирование канала связи.



Рисунок 8 – Порядок передачи сигнала от устройств измерения напряжения

Далее данные отправляются по имеющимся каналам связи в диспетчерский центр, включающий в себя приемопередатчик пункта сбора и обработки данных и персональный компьютер. Данные с устройств собираются на пункте сбора данных, а затем передаются на облачный сервер, откуда они поступают на электронную вычислительную машину, где обрабатываются согласно разработанной методике в специализированном ПО.

Блок измерения напряжения построен на основе однофазного многофункционального измерительного чипа АТТ7053ВU с SPI.

Были проведены испытания прибора при помощи установки контроля диэлектриков АИД-70М. Подавалось переменное значение напряжения от 0 до 15 кВ и принимался полученный сигнал о значении измеренной разности потенциалов на персональный компьютер (рис. 9).

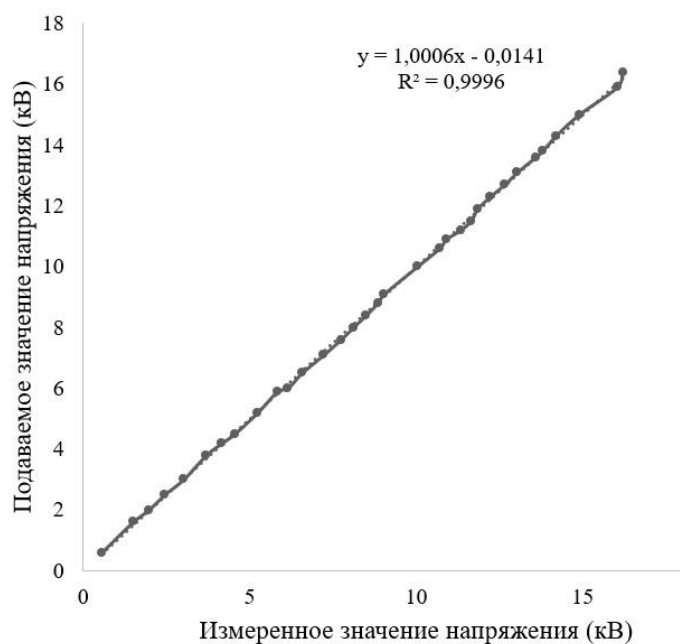


Рисунок 9 – Зависимость между подаваемым и измеренным значениями напряжения

Из рисунка 9 видно, что зависимость измеренного напряжения от подаваемого значения напряжения линейна и величина достоверности аппроксимации составляет 0,9996. Поэтому нам достаточно двух точек для того чтобы откалибровать наш прибор, одна точка $U_{изм1}$ равна нулю, а вторая – напряжение $U_{изм2}$, которое принимается равным рабочему значению напряжения. Устройство измеряет значение напряжения с относительной погрешностью измерения, равной 0,3%, тогда реальная погрешность дифференциального метода при применении этого прибора составит ± 30 м.

Натурные испытания проводились совместно с Северным РЭС филиала АО «Сетевая компания» Казанские электрические сети на действующей ВЛ-10кВ ПС «Осиново» ф-204 (37 опор), марка токопровода АС 70/11. Прибор №1 был установлен у опоры №6, устройство №2 – у опоры №26, ОЗЗ моделировалось у опоры №16.

При подключении ВЛ к источнику питания оба установленных прибора отправляли измеренные данные с частотой 3 раза в 1 секунду по беспроводному радиоканалу связи на персональные компьютеры (ПК), которые находились в непосредственной близости от установленного прибора на расстоянии 50 м.

На рисунке 10 представлен график измеренных значений напряжений при включении ВЛЭП 10 кВ на холостом ходу, значения напряжений были откалиброваны непосредственно на ПК.

В соответствии с рисунком 10, можно сделать вывод о правильности измерения прибора №1, так как сначала линия была отключена, а потом на нее подали 10 кВ (действующее значение фазы линии 5773 В) и снова отключили линию.

На рисунке 11 представлен результат измеренного значения напряжения при моделировании ОЗЗ.

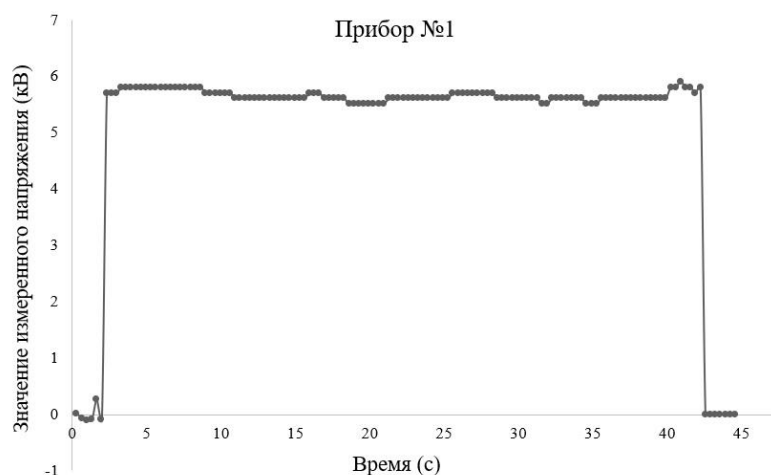


Рисунок 10 – Результаты измерения напряжения прибором №1 при подаче напряжения 10 кВ на ВЛ на холостом ходу

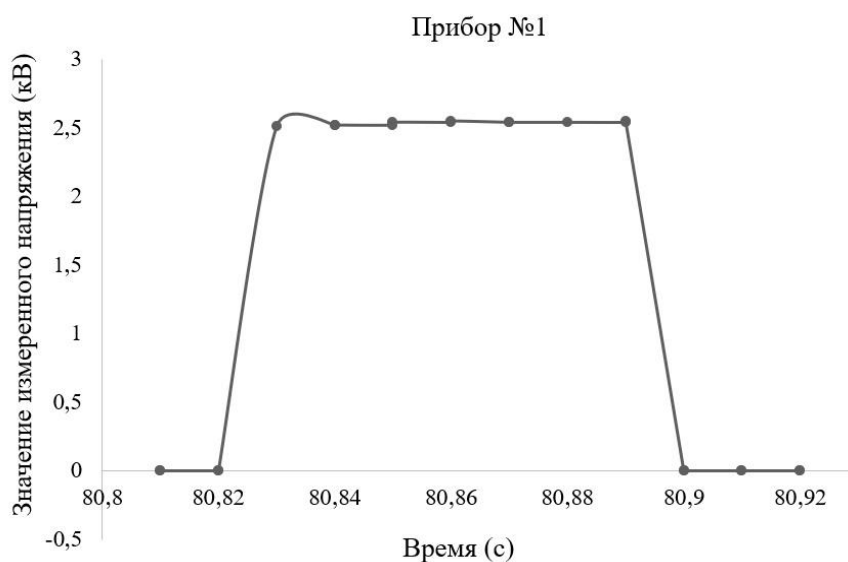


Рисунок 11 – Результаты измерения напряжения прибором №1 при моделировании ОЗЗ

При моделировании ОЗЗ оба прибора зафиксировали на поврежденной фазе значение отличное от нуля и эти значения отличались друг от друга, что подтверждает описанный во второй главе дифференциальный метод.

Учитывая, что характер зависимости между подаваемым и измеренным значением напряжения – линейный (рис. 9), можно перейти от разности абсолютных значений напряжений на поврежденной фазе, описанной в главе 2, к разности потенциалов между токопроводом и металлическим стержнем. Методика от этого не изменится, а расчетов станет значительно меньше, за счет исключения емкостей ЕДН.

Предложен модернизированный дифференциальный метод определения расстояния до ОЗЗ по разности потенциалов между обкладками конденсатора, образованного токопроводом и дополнительным металлическим стержнем разрабатываемого устройства.

В заключении изложены основные результаты и выводы диссертации и намечены перспективы дальнейшей разработки темы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработан дифференциальный метод определения местоположения ОЗЗ в воздушных ЛЭП 6-10 кВ с изолированной нейтралью путем сравнения разности значений напряжений на поврежденной фазе. Применение разности между значениями напряжения позволяет исключить влияние различных параметров линии, таких как: источник питания, трансформатор, переходное сопротивление в месте замыкания (металлическое) и нагрузка потребителя.

2. Разработаны методика и программное обеспечение по дистанционному автоматическому определению местоположения ОЗЗ в воздушных ЛЭП 6-10 кВ с изолированной нейтралью. Методика и ПО могут быть применены для воздушной ЛЭП 6-10 кВ с различным количеством отпаяк.

3. Разработано автономное устройство для измерения фазного значения напряжения с дистанционной передачей сигнала с блоком питания, выполненным из двух трансформаторов тока и резервирующих конденсаторов. Блок измерения напряжения выполнен на основе емкостного делителя напряжения с высоким входным сопротивлением.

4. Получены положительные результаты экспериментального исследования работоспособности автономного устройства на действующей линии 10 кВ.

5. Разработан модернизированный дифференциальный метод определения местоположения ОЗЗ в воздушных ЛЭП 6-10 кВ с изолированной нейтралью путем измерения разности потенциалов между токопроводом и дополнительным металлическим стержнем на поврежденной фазе в установившемся режиме в начале и в конце линии.

Задачи, поставленные в диссертационной работе, решены. Исследуемое направление имеет перспективы дальнейшего научного развития, например, в области дистанционного определения места повреждения для ВЛЭП 6-10 кВ с заземлением нейтрали через сопротивление или катушку индуктивности.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в международной базе данных SCOPUS

1. Kozlov V.K., **Kirzhatskikh E.R.**, Giniatullin R.A. Differential method for damage location determining in 10 kV distribution networks with isolated neutral // International Scientific and Technical Conference Smart Energy Systems. 2019. E3S Web Conf. 124. 01003. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912401003>.

2. Kozlov V.K., **Kirzhatskikh E.R.** Determining the Location of a Single-Phase Circuit in 10 kV Distribution Networks // 2nd International Youth Scientific and Technical Conference on Relay Protection and Automation (RPA), Moscow. Russia. 2019. P. 8958052. DOI: 10.1109/RPA47751.2019.8958052.

3. **Kirzhatskikh E.R.**, Kozlov V.K. Remote determining the location of a single-phase earth fault in 6-10 kV networks based on voltage sensors // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2022. 1045(1). 012110. DOI: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/1045/1/012110>.

4. Kozlov V.K., Ivanov D.A., **Kirzhatskikh E.R.** Voltage Measuring Sensor Based on Capacitive Voltage Divider // 2022 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon). 2022. IEEE. DOI: 10.1109/UralCon54942.2022.9906629.

Статьи в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень ВАК по научной специальности диссертации

5. Козлов В.К., **Киржацких Е.Р.** Исследование емкости трехфазной линии электропередачи и мощности емкостного источника питания // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. 2017. №1 (73). С. 57-63.

6. Козлов В.К., **Киржацких Е.Р.** Автономный емкостной источник питания для устройств измерения параметров воздушной линии электропередачи // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2017. №3-4. С. 61-68.

7. **Киржацких Е.Р.**, Козлов В.К., Гиниатуллин Р.А. Моделирование однофазного замыкания в распределительных сетях 10 кВ с изолированной нейтралью в программе MATLAB // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. 2018. №4 (94). С. 18-23.

8. Козлов В.К., Иванов Д.А., **Киржацких Е.Р.** Автономное устройство для измерения напряжения с дистанционной передачей информации // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2022. №10. С. 1-9.

Охранные документы на объекты интеллектуальной собственности

9. Пат. 2702914 Российская Федерация МПК G01R 19/25, G01R 15/04. Устройство для измерения напряжения в высоковольтной цепи с дистанционной передачей информации / **Е.Р. Киржацких**, В.К. Козлов; заявитель и патентообладатель Казан. гос. энер. ун-т.; заявл. 18.12.2018; опубл. 14.10.2019, Бюл. №29.

10. Пат. 2717697 Российская Федерация МПК G01R 31/08. Способ определения места однофазного замыкания на землю в сетях 6-10 кВ с изолированной нейтралью / В.К. Козлов, **Е.Р. Киржацких**; заявитель и патентообладатель Казан. гос. энер. ун-т.; заявл. 18.07.2019; опубл. 25.03.2020, Бюл. №9.

11. Свид. о гос. рег. прог. для ЭВМ 2020611359 Российская Федерация. Программа по дистанционному определению места повреждения в распределительных сетях / С.А. Соловьев, В.К. Козлов, **Е.Р. Киржацких**; заявитель и патентообладатель Казан. гос. энер. ун-т.; заявл. 23.01.20; опубл. 30.01.2020.

*Статьи в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень ВАК
по другим научным специальностям*

12. Козлов В.К., **Киржацких Е.Р.**, Гиниатуллин Р.А. Исследование влияния переходного сопротивления на определение места однофазного замыкания на землю в распределительных сетях с изолированной нейтралью // Вестник Чувашского университета. 2019. №1. С. 39-46.

13. **Киржацких Е.Р.**, Козлов В.К. Дифференциальный метод определения места однофазного замыкания на землю в распределительных сетях с изолированной нейтралью // Энергобезопасность и энергосбережение. 2019. №6. С. 42-44.

Публикации в материалах докладов международных и всероссийских научных конференциях

14. **Киржацких Е.Р.**, Козлов В.К. Совершенствование метода расчета однофазного замыкания на землю в сети 10 кВ // Сборник докладов участников VIII Слета молодых энергетиков Башкортостана (5-8 сентября 2018, г. Мелеуз). Уфа: Информреклама, 2018. С. 259-265.

15. **Киржацких Е.Р.**, Козлов В.К., Киржацких М.Н. Дифференциальный метод определения места однофазного замыкания на землю в распределительных сетях с изолированной нейтралью // Материалы юбилейной X Международной научно-технической конференции «Электроэнергетика глазами молодежи» (16-20 сентября 2019, г. Иркутск). Иркутск: ИНИТУ, 2019. Т 2. С. 165-166.

16. Козлов В.К., **Киржацких Е.Р.** Исследование влияния параметров линии дифференциальным методом на определение места повреждения при однофазном замыкании на землю // Материалы докладов XIV открытой молодежной научно-практической конференции «Диспетчеризация и управление в электроэнергетике» (6-8 ноября 2019, г. Казань). Казань: КГЭУ, 2019. С. 243-247.

17. **Киржацких Е.Р.**, Козлов В.К., Киржацких М.Н. Дистанционное определение места однофазного замыкания на землю в сетях 6-10 кВ на основе датчиков напряжения // Препринт сборника докладов Международной научно-практической конференции «Развивая энергетическую повестку будущего» для представителей сообщества молодых инженеров ТЭК (10-11 декабря 2021, г. Санкт-Петербург). СПб: Невская Типография. С. 13-18.

Подписано в печать 21.10.2022. Формат 60х84 1/16.
Бумага офсетная. Печать ризографическая.
Усл. печ. л. 1,25. Тираж 100. Заказ №

Отпечатано с готового оригинал-макета
в типографии «Вестфалика» (ИП Колесов В.Н.)
420111, г. Казань, ул. Московская, 22. Тел.: 292-98-92
e-mail: westfalika@inbox.ru
