

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе  
Федерального государственного  
бюджетного образовательного

и высшего образования  
ий государственный  
ский университет имени В.И.  
кандидат технических наук,

Илья Николаевич Сулыненков

10/07/25 2025 г.

### ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» на диссертационную работу **Новобрицкого Владислава Александровича** на тему «Разработка способов выполнения релейной защиты воздушных линий электропередачи на основе измерений магнитного поля и оптических сигналов» представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.4.3 – Электроэнергетика.

**1. Актуальность темы диссертации:** Воздушная линия (ВЛ) электропередачи (ЛЭП) представляет собой один из самых распространённых типов электроустановок, служащую для передачи электрической энергии от места производства к потребителям. Преимущества ВЛ включают их относительно низкую стоимость, простоту установки и обслуживания, а также возможность передачи энергии на большие расстояния. Однако они намного чаще подвержены воздействию погодных условий, что приводит к повышенной вероятности их повреждения. Устранение таких повреждений, чаще всего коротких замыканий (КЗ), производится посредством комплекса устройств релейной защиты (РЗ). В традиционном исполнении к устройствам РЗ подключаются токовые цепи и цепи напряжения от измерительных трансформаторов тока (ТТ) и трансформаторов напряжения (ТН) соответственно. ТТ и ТН до настоящего времени остаются основными первичными преобразователями для цепей РЗ, однако данные измерители имеют ряд недостатков, заложенных в принципе их функционирования. Одним из существенных недостатков ТТ является насыщение магнитопровода при КЗ с высоким содержанием в токе апериодической составляющей или при наличии остаточной магнитной индукции, изначально приближающей ТТ к режиму насыщения. В дополнение к этому на работу защит дистанционного принципа действия оказывают влияние неисправности в цепях

напряжения ТН и большие переходные сопротивления в случаях возникновения дуговых КЗ. Как альтернатива традиционным измерителям, из уровня техники известны оптические и цифровые трансформаторы, катушки Роговского. Однако одним из недостатков указанных измерителей является необходимость затрат на создание изоляции между первичной и вторичной сетью, так как датчики, используемые в них, находятся в непосредственной близости к токоведущим частям. Это всё создаёт риск для обслуживающего персонала при непосредственном приближении к таким измерителям, а также определяет необходимость вывода ЛЭП из работы и появление перерывов в электроснабжении в случае неисправности измерителей. В работе предложена разработка способов и алгоритмов выполнения устройств РЗ, получающих информацию о параметрах аварийного режима через бесконтактные сенсоры, находящиеся на безопасном расстоянии от токоведущих частей. К таким бесконтактным измерителям относятся датчики магнитного поля (ДМП) на гальваномангнитных эффектах (датчики Холла, магнитотранзисторы и т.д.), а также оптические сенсоры, способные выявлять дуговые КЗ. Помимо бесконтактных способов выявления информации о самих повреждениях, в работе также рассматривается обоснование применения бесконтактного способа обмена информацией между полуккомплектами устройств РЗ на основе создания канала через атмосферную оптическую линию связи (АОЛС) для линий малой протяжённости до трёх километров. Современное развитие уровня техники позволяет перекрывать имеющиеся ранее недостатки ДМП, например, от температурных воздействий, через использование концентраторов магнитного поля, имеющих обратозависимую термомагнитную характеристику по сравнению с ДМП. Всё это в совокупности позволяет реализовывать алгоритмы функционирования устройств РЗ с применением бесконтактных измерителей, что позволяет убрать существенную долю затрат на создание изоляции и обеспечить полную безопасность обслуживания, что, безусловно, является актуальным решением.

## **2. Структура работы и основные результаты разделов:**

Общий объём диссертационной работы представлен на 232 страницах машинописного текста. Содержит введение, четыре главы основного текста, заключение, список используемых источников в количестве 154 позиции, 4 приложения.

**В первой главе** указаны основные причины возникновения КЗ на ВЛ в первичной сети. Показаны последствия для всех типов устройств РЗ из-за влияния насыщения ТТ. Рассмотрена проблема влияния электрической дуги на искажение замеров сопротивления для устройств ДЗ. Рассмотрены проблемы, связанные с цепями напряжения ТН. Рассмотрены преимущества и недостатки использования существующих каналов связи ВЧ и ВОЛС для устройств РЗ.

**Во второй главе** рассмотрены вопросы, связанные с моделированием магнитного поля и его ортогональных составляющих возле одноцепных и двухцепных опор ВЛ при различных видах КЗ. Рассмотрены существующие

ДМП, использующиеся в эксплуатации для получения замеров фазных токов в проводниках через замеры магнитного поля, также рассмотрены способы обработки данных выходных сигналов с ДМП для возможности проведения таких замеров. Показаны иные способы бесконтактного измерения параметров первичной сети в качестве альтернативы традиционным ТТ с указанием их преимуществ и недостатков: индукционные катушки, бесконтактные измерительные системы по радиоканалу, катушки Роговского, герконы и гальваномангнитные преобразователи. Решена задача оптимизации при выборе места размещения ДМП рядом с опорой. Для решения задачи данного типа применен эвристический метод генетического алгоритма, реализованный в модуле оптимизации «Optimization Toolbox» программно-вычислительного комплекса MATLAB.

**В третьей главе** определяется, что для линий малой протяженности до двух километров нет возможности выбрать уставки ступенчатых защит с нулевой выдержкой времени. Для устранения недостатка ДЗ из-за переходного сопротивления при дуговых КЗ и для обеспечения защиты начального участка ВЛ предложен и описан вариант реализации устройства спектрально-дуговой защиты (УСДЗ), обеспечивающей мониторинг начального участка ЛЭП от первого портала ЛЭП на ПС до первых опор начала ЛЭП, охватывающего своим углом обзора защищаемые токоведущие части и реагирующего на появление электрической дуги в определенном спектральном диапазоне, обоснованном наличием в дуге ионов алюминия при неметаллическом КЗ на сталеалюминиевых проводах ЛЭП.

**В четвертой главе** проведена оценка эффективности предложенных способов обеспечения правильной работы устройств РЗ. Выполнена верификация на уменьшенной физической модели ВЛ замеров защиты с абсолютной селективностью на ДМП для двухцепной ЛЭП, являющейся в концептуальном исполнении аналогом ДЗЛ. Приведено описание физической модели пролёта двухцепной ЛЭП, описаны используемые приборы, а также приведены сами замеры и погрешности сравнения замеров с физической и цифровой моделью.

В вопросе реализации канала связи для устройств РЗ приведено обоснование пригодности использования АОЛС в качестве альтернативы традиционным ВЧ каналам связи и ВОЛС для ЛЭП малой протяжённости до трёх километров. Для таких линий АОЛС может применяться в качестве резервного канала связи для обеспечения большей надежности.

**В заключении** указаны главные выводы и рекомендации по использованию выполненных разработок, область их применения и возможные ограничения.

**В приложениях представлены:** описание существующих ДМП и факторов, влияющих на точность их измерений, результаты расчёта координат оптимального размещения датчиков для различных типов двухцепных опор

линий 35 кВ, патент и свидетельства о регистрации программ для ЭВМ, акты внедрения результатов исследования.

### **3. Новизна научных положений, выводов и рекомендаций:**

1. Разработана имитационная модель ТТ с возможностью задания остаточной магнитной индукции, позволяющая учитывать размагничивающее действие от тока КЗ со скоростью постоянной времени вторичной цепи;
2. Впервые предложен способ определения оптимального размещения ДМП для реализации защиты с абсолютной селективностью для двухцепной ВЛ, использующий в расчёте целевой функции только координаты размещения ДМП возле опоры без необходимости учёта величин самих фазных токов.
3. С использованием динамической модели электрической дуги при междуфазных КЗ на основе уравнения Касси определены возможные большие искажение замеров сопротивления при дуговых КЗ на ВЛ малой протяжённости, которые не могли быть выявлены при расчёте дуги по классическому методу через статическую величину активного сопротивления.

**4. Степень обоснованности научных положений, результатов, выводов, и рекомендаций:** подтверждается тем, что основой для выполнения моделирования и описания происходящих процессов являются известные фундаментальные законы электротехники, указаны необходимые допущения, граничные условия и области применения разрабатываемых алгоритмов, произведено сравнение результатов, полученных на математических моделях, с их предметными аналогами для ТТ и стенда двухцепной ВЛ. Описаны используемые приборы, а также приведены сами замеры и погрешности сравнения замеров с физической и цифровой моделью. Все это подтверждается воспроизводимостью результатов, а также обсуждением результатов исследований на различных международных и всероссийских конференциях.

### **5. Теоретическая и практическая значимость результатов диссертационного исследования**

#### **Теоретическая значимость**

Состоит в разработке цифровых, математических и динамических моделей в программно-вычислительном комплексе MATLAB Simulink. Для ТТ рассматриваются влияние режимов насыщения на работу традиционных типов устройств РЗ, для дистанционной защиты моделируются возможные случаи отказа из-за искажения замеров сопротивления под влиянием переходного сопротивления электрической дуги. Также выполняется моделирование НМП одноцепных и двухцепных ЛЭП не только для нормальных симметричных нагрузочных режимов, но и при различных видах КЗ. Предложена концепция реализации защиты с абсолютной селективностью через бесконтактные измерители для одноцепной и двухцепной ВЛ.

## **Практическая значимость**

Моделирование переходных процессов в ТТ с учётом размагничивания ТТ от тока КЗ позволяет снизить завышенные требования к ТТ в части расчёта времени до насыщения и принять к установке более дешёвые ТТ с меньшими затратами на количество электротехнической стали или сохранить в эксплуатации существующие ТТ. Применение бесконтактных методов получения замеров о параметрах аварийного режима в первичной сети позволит отказаться от затрат на дорогостоящую изоляцию и обеспечить безопасность для обслуживающего персонала. Применение УСДЗ на оптическом принципе выявления дуговых КЗ позволит реализовать частичную или полную защиты ВЛ малой протяжённости до двух километров, что в первом приближении можно назвать аналогом первых ступеней резервной защиты, так как на коротких ВЛ, как правило, нет возможности выбора уставок ступенчатых защит с нулевой выдержкой времени, удовлетворяющих условиям отстройки и чувствительности. Подтверждение заинтересованности в результатах работы со стороны сетевой компании АО «ИЭСК» (г. Иркутск), от производителей электросетевого оборудования АО «Холдинг ЭРСО» (г. Москва) и для обучения студентов ФГБОУ ВО «ИРНИТУ» показывают представленные акты внедрения результатов исследования.

## **6. Соответствие автореферату и его содержанию**

Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации и требованиям ГОСТ Р 7.0.11-2011 «Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Диссертация и автореферат диссертации. Структура и порядок оформления». В автореферате и диссертации отсутствуют расхождения между толкованием, терминологией и выводами.

## **7. Рекомендации по использованию результатов и выводов**

Результаты диссертационной работы Новобрицкого В.А. могут быть успешно применены на объектах электросетевых компаний, а также иных собственников подстанций, которые являются тупиковыми и с приёмной стороны которых отсутствуют ТТ для реализации основной защиты ВЛ, а также для реализации защит ВЛ малой протяжённости. Применение устройства передачи данных на основе АОЛС может стать хорошей альтернативой бесконтактным радиорелейным системам передачи информации о параметрах первичной сети. Разработанные программно-вычислительные комплексы позволят проводить визуализацию уровней НМП возле одноцепных и двухцепных ЛЭП, что актуально для составления карт НМП, а также может использоваться в учебных целях для облегчения и визуализации восприятия процессов при работе со студентами по дисциплине «Электромагнитная совместимость».

## **9. По итогам рассмотрения работы имеются следующие замечания**

1. Производился ли учёт влияния внешних помех на функционирования ДМП в виде гальваноманнитных преобразователей?

2. Рассматривались ли вопросы чувствительности для ДМП в случае малых токов в первичной сети и большой удалённости ДМП от токоведущих частей?

3. Судя по картам напряженности магнитного поля в диссертационной работе (Рисунки 2.6-2.10) рассматривалось воздействие НМП только от фазных проводников. Как поведут себя защиты от влияния НМП создаваемого дополнительно из-за экранирования поля от самой опоры ВЛ?

4. Будет ли функционировать защита на ДМП для двухцепной ВЛ в случае вывода из работы одной из линии? Как защита будет функционировать при влиянии наведенных токов в отключенной ВЛ?

5. Каким образом ДМП будут фиксироваться рядом с опорой/на опоре? Рассмотрено ли влияние отклонения датчиков при ветровой нагрузке?

6. В части ТТ производилось сравнение только вольтамперных характеристик модели и физического ТТ. Сравнивались ли сами погрешности измерений? Почему в диссертации приведена упрощённая характеристика намагничивания сердечника ТТ (рисунок 1.4), а не полная и более точная с учётом влияния гистерезиса?

7. В части модели дуги, почему производилось сравнение только с классической моделью через активное сопротивление? Были ли выполнены натурные эксперименты по непосредственному замеру сопротивления дуги?

8. Указано, что объектом исследования являются системы и комплексы РЗ ВЛ высокого напряжения, работающие при аварийных режимах КЗ. Почему именно системы и комплексы? Почему объектом исследования не указаны воздушные линии?

## **10. Заключение о соответствии диссертации и автореферата требованиям «Положения о присуждении ученых степеней»**

Диссертационная работа обладает внутренним единством, содержит новые научные положения и результаты, выдвигаемые для публичной защиты, и свидетельствует о личном вкладе автора диссертации в науку в части разработки цифровых динамических моделей, описывающих процессы в измерительных ТТ, электрической дуге и магнитных полях возле двухцепных и одноцепных ВЛ.

На основании вышеизложенного считаем, что диссертационная работа Новобрицкого Владислава Александровича «Разработка способов выполнения релейной защиты воздушных линий электропередачи на основе измерений магнитного поля и оптических сигналов» является законченной научно-квалификационной работой, в которой изложены научно обоснованные технические решения и разработки, направленные на реализацию способов и алгоритмов функционирования устройств РЗ, базирующихся на замерах, применяемых в бесконтактных измерителях, что позволяет снизить затраты на создание изоляции между первичной и вторичной сетью, а также обеспечить

безопасную работу для обслуживающего персонала, что имеет существенное значение для развития и безопасности отечественной энергетики.

Тема диссертационного исследования и полученные результаты соответствуют паспорту научной специальности 2.4.3 – Электроэнергетика, а именно пунктам:

- п. 3. Разработка методов расчета электрических и магнитных полей, исследование закономерностей воздействия сильных токов, электрических и магнитных полей на диспергированные и другие материалы, среды и изделия – в части исследования и моделирования магнитных полей при режимах КЗ возле одноцепных и двухцепных ЛЭП и преобразования в виде обработки сигналов, получаемых через ДМП.
- п. 8. Разработка и обоснование алгоритмов и принципов действия устройств релейной защиты и противоаварийной автоматики для распознавания повреждений, определения мест и параметров, повреждающих (возмущающих) воздействий в электрических сетях – в части реализации способов и алгоритмов функционирования устройств РЗ, получающих информацию от бесконтактных измерителей НПМ и фиксации оптических сигналов оптическими устройствами;
- п. 16. Разработка методов анализа и синтеза систем автоматического регулирования, противоаварийной автоматики и релейной защиты в электроэнергетике – в части обоснования интеграции АОЛС в существующую инфраструктуру в качестве канала связи для устройств релейной защиты;

Основные теоретические положения, выводы и рекомендации, сформулированные в работе, докладывались автором на 8 научно-технических конференциях различного уровня. По теме диссертации опубликовано 12 научных статей, из них 3 статьи – в изданиях, рекомендованных ВАК, 1 работа в издании, включенном в международную базу цитирования Scopus. Выполнен 1 патент на полезную модель, правообладателем которого является автор, а также получено 2 свидетельства о регистрации программ для ЭВМ. Опубликованные по результатам исследований материалы достаточно полно отражают основное содержание диссертации, имеются все требуемые ссылки на авторов и источники заимствования материалов.

Работа соответствует критериям п.п. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г., с учётом требований, предъявляемых к кандидатским диссертациям, а автор работы, Новобрицкий Владислав Александрович, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.3 – Электроэнергетика.

Диссертационная работа и автореферат обсуждены, отзыв утвержден на заседании кафедры автоматического управления электроэнергетическими

системами Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», протокол № 4 от 12.11.2025 г.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» (ФГБОУ ВО «ИГЭУ»). Адрес 153003, Россия, г. Иваново, ул., Рабфаковская, д. 34. Тел (4932) 269-999. E-mail: [office@ispu.ru](mailto:office@ispu.ru).

Заведующий кафедрой автоматического управления  
электроэнергетическими системами  
ФГБОУ ВО «ИГЭУ»,  
кандидат технических наук,  
доцент

Гусенков Алексей Васильевич

Взвешивание 05.12.2025г. В.И. /Алексей А.А./  
С отзывом ознакомились 05.12.2025г. /Новобрицкий В.А.