

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 621.316.1 + 621.316.925

**ШЕВАЛДИН**  
**Михаил Андреевич**

**ПРИНЦИПЫ ВЫПОЛНЕНИЯ МИКРОПРОЦЕССОРНОЙ  
ТОКОВОЙ ЗАЩИТЫ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ 6–10 кВ  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНФОРМАЦИИ О ВИДЕ  
И ЗОНЕ ПОВРЕЖДЕНИЯ**

Автореферат диссертации  
на соискание ученой степени кандидата технических наук  
по специальности 05.14.02 – электрические станции  
и электроэнергетические системы

Минск, 2020

Научная работа выполнена в Белорусском национальном техническом университете

Научный руководитель: **РОМАНЮК Федор Алексеевич**, заслуженный работник образования Республики Беларусь, член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Электрические станции» Белорусского национального технического университета

Официальные оппоненты: **АНИЩЕНКО Вадим Андреевич**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Электроснабжение» Белорусского национального технического университета;

**РУМЯНЦЕВ Юрий Владимирович**, кандидат технических наук, заведующий группой релейной защиты и автоматики № 2 отдела релейной защиты и автоматики НИиПИ РУП «Белэнергосетьпроект»

Оппонирующая организация: Научно-исследовательское и проектное республиканское унитарное предприятие «БЕЛТЭИ»

Защита состоится « 23 » декабря 2020 года в 14<sup>00</sup> часов на заседании совета по защите диссертаций Д 02.05.02 при Белорусском национальном техническом университете по адресу: 220013, г. Минск, пр. Независимости, 65, корп. 2, ауд. 201, тел. ученого секретаря +375(17) 292-71-73, адрес электронной почты: [ronomarenkoeg@bntu.by](mailto:ronomarenkoeg@bntu.by).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского национального технического университета.

Автореферат разослан « 3 » ноября 2020 г.

Ученый секретарь совета по защите диссертаций, кандидат технических наук, доцент



Е.Г. Пономаренко

© Шевалдин М.А., 2020  
© Белорусский национальный технический университет, 2020

## ВВЕДЕНИЕ

Линии электропередачи (ЛЭП) напряжением 6–10 кВ являются одними из основных элементов электроэнергетической сети. Повреждения на ЛЭП могут привести к выходу их из строя и необходимости дальнейшего ремонта или замены, что связано с финансовыми затратами. Ложные или излишние отключения линий электропередачи в результате неправильной работы устройств релейной защиты (РЗ) приводят к недополучению средств электроснабжающими организациями из-за недоотпуска электроэнергии, а также штрафным санкциям к ним в рамках заключенных договорных отношений. Необходимо учитывать и социальную значимость электроснабжения. Поэтому обеспечение нормального эффективного функционирования релейной защиты ЛЭП напряжением 6–10 кВ является одной из важных технических задач.

В качестве устройств РЗ указанных линий электропередачи традиционно используются ступенчатые токовые защиты (ТЗ). Данные защиты характеризуются многоступенчатостью, недостаточной чувствительностью, особенно последних ступеней, ограниченностью зоны работы быстродействующих ступеней и ее непостоянством вследствие зависимости от вида повреждения, величины активного переходного сопротивления в месте короткого замыкания (КЗ) и от других факторов. Для данных защит в некоторых режимах работы энергосистемы отмечается наличие относительно больших выдержек времени для резервных ступеней ТЗ вследствие их выбора по ступенчатому принципу. Особенно это актуально для организации резервирования защит участков сети, расположенных вблизи источников питания, выдержки срабатывания для которых достигают нескольких секунд.

Для устранения данных недостатков можно использовать более совершенные защиты, которые сложнее традиционных ТЗ. В тоже время, устранить или снизить влияние указанных недостатков можно за счет повышения технического совершенства токовых защит ЛЭП напряжением 6–10 кВ, в том числе за счет учета расположения зоны КЗ на линии электропередачи, учета вида повреждения, использования линейно зависимых характеристик выдержек времени их срабатывания, а также за счет применения токовой защиты обратной последовательности (ТЗОП) для повышения чувствительности к несимметричным междуфазным повреждениям на ЛЭП. При этом сокращение количества ступеней позволяет упростить реализацию защиты. В качестве основы при формировании исходных положений и предпосылок использовались результаты исследований, как отечественных, так и зарубежных ученых и специалистов в рассматриваемой области.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Связь работы с крупными научными программами и темами**

Работа выполнялась в рамках задания 1.1.27 «Развитие методов совершенствования микропроцессорной токовой защиты линий, обеспечивающих повышение ее быстродействия и чувствительности» подпрограммы «Энергобезопасность и надежность энергоснабжения» Государственной программы научных исследований «Энергобезопасность, энергоэффективность и энергосбережение, атомная энергетика» (2013–2015 годы), утвержденной Постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 09.06.2010 № 886 «Об утверждении перечня государственных программ научных исследований на 2011–2015 годы», а также в рамках задания 1.2.05 «Повышение надежности электроснабжения потребителей на основе увеличения чувствительности токовой защиты к несимметричным коротким замыканиям» подпрограммы «Энергетическая безопасность и надежность энергетических систем» государственной программы научных исследований «Энергетические системы, процессы и технологии» на 2016–2020 годы, утвержденной Постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 10.06.2015 № 483 «Об утверждении перечня государственных программ научных исследований на 2016–2020 годы».

### **Цель и задачи исследования**

Цель исследования заключается в разработке технических и алгоритмических принципов выполнения микропроцессорной токовой защиты линий электропередачи напряжением 6–10 кВ с улучшенными показателями технического совершенства.

Для достижения указанной цели потребовалось решить следующие задачи:

- анализ основных подходов и направлений повышения технического совершенства ТЗ от междуфазных КЗ для ЛЭП напряжением 6–10 кВ;
- разработка новых и усовершенствование существующих принципов выполнения и технической реализации релейной защиты от междуфазных КЗ на линиях электропередачи напряжением 6–10 кВ;
- разработка и исследование алгоритмов функционирования измерительной и логической частей РЗ, в том числе определения зоны КЗ, а также установления вида повреждения на защищаемом и смежном участках ЛЭП;
- разработка методики выбора параметров срабатывания для различных ступеней защиты;
- исследование показателей технического совершенства защиты с реализацией предложенных методов и подходов, выдача рекомендаций по возможности использования полученных результатов.

Объект исследования: микропроцессорная токовая защита линий электропередачи напряжением 6–10 кВ.

Предмет исследования: принципы выполнения, структура и алгоритмы функционирования микропроцессорной токовой защиты линий электропередачи напряжением 6–10 кВ с использованием информации о виде и зоне повреждения.

Решение названных задач выполнялось методами теоретического анализа, вычислительного эксперимента, компьютерного и математического моделирования.

**Научная новизна** работы заключается:

– в новом методе определения вида междуфазного повреждения на ЛЭП напряжением 6–10 кВ, отличающимся использованием двух критериев относительной несимметрии токов, позволяющим достоверно устанавливать двух- и трехфазные КЗ на защищаемом и смежном участках ЛЭП во всех режимах повреждений;

– в предложенном методе определения зоны повреждения при междуфазных КЗ на ЛЭП напряжением 6–10 кВ, позволяющим с приемлемой достоверностью установить зону КЗ независимо от их вида и отличающимся контролем только уровней аварийных токов, а также способом их коррекции для повышения достоверности метода при наличии переходных сопротивлений в месте повреждения;

– в новом методе определения зоны несимметричного повреждения на линиях электропередачи напряжением 6–10 кВ, отличающимся использованием только тока обратной последовательности и способом его коррекции, обеспечивающим повышение достоверности определения зоны повреждения при несимметричных повреждениях на нагруженных ЛЭП за счет более точного установления расстояния до места повреждения, в том числе при наличии переходных сопротивлений.

На устройства для токовой защиты от междуфазных коротких замыканий линий электропередачи с односторонним питанием, разработанным по предложенным в диссертации принципам, получено два патента на изобретения Республики Беларусь и один патент на изобретение Евразийской патентной организации.

**Положения, выносимые на защиту**

1. Принцип выполнения микропроцессорной двухступенчатой токовой защиты ЛЭП напряжением 6–10 кВ с более высокими показателями быстродействия, чувствительности к двухфазным повреждениям на защищаемом и резервируемом участках линии электропередачи и расширенной зоной мгновенного отключения, основанный на определении вида и зоны КЗ.

2. Метод определения вида повреждения на основе контроля двух критериев относительной несимметрии токов, при использовании которого достоверно устанавливаются двух- и трехфазные КЗ на защищаемых и

смежных участках ЛЭП с односторонним питанием во всех режимах работы линий электропередачи.

3. Методы определения зоны короткого замыкания с использованием разностей полных токов фаз ЛЭП и по току обратной последовательности, которые позволяют с приемлемой степенью достоверности установить зону повреждения при различных видах повреждений, в том числе через переходное сопротивление.

4. Принципы и алгоритмы функционирования двухступенчатой токовой защиты, которые обеспечивают правильность ее работы и улучшение отдельных показателей технического совершенства при меньшем количестве ступеней по сравнению с традиционными ступенчатыми токовыми защитами с независимыми выдержками времени.

5. Принципы и алгоритмы функционирования токовой защиты обратной последовательности, используемой в качестве дополнительной ступени, с повышенными показателями технического совершенства к несимметричным КЗ, которые обеспечивают правильность ее работы и в 1,33 раза большую чувствительность к удаленным несимметричным повреждениям по сравнению с традиционной ТЗ, реагирующей на полные токи фаз.

#### **Личный вклад соискателя ученой степени**

Изложенные в диссертации основные результаты и положения были получены при выполнении заданий 1.1.27 «Развитие методов совершенствования микропроцессорной токовой защиты линий, обеспечивающих повышение ее быстродействия и чувствительности» (2014–2015 годы) и 1.2.05 «Повышение надежности электроснабжения потребителей на основе увеличения чувствительности токовой защиты к несимметричным коротким замыканиям» (2016–2018 годы) в рамках государственных программ научных исследований при участии соискателя, при этом личный вклад заключается в следующем: разработка принципов функционирования микропроцессорной двухступенчатой токовой защиты с дополнительной ступенью токовой защиты обратной последовательности от несимметричных повреждений на основе учета зоны и вида повреждения; исследование и выбор оптимального для решаемой задачи метода определения места КЗ; установление ограничений и пределов работоспособности методов определения вида и зоны КЗ; разработка функциональной схемы и алгоритма функционирования микропроцессорной токовой защиты с улучшенными показателями технического совершенства; исследование принципа выполнения токовой защиты линии электропередачи и основных показателей ее технического совершенства методом вычислительного эксперимента.

Анализ полученных результатов проводился совместно с научным руководителем членом-корреспондентом Национальной академии наук

Беларуси, доктором технических наук, профессором Романюком Ф. А. на всех этапах выполнения диссертационной работы, а также на отдельных этапах исследования – кандидатом технических наук, доцентом Булойчик Е. В., которые оказывали практическую помощь и консультации.

#### **Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов**

Результаты исследований докладывались на следующих международных научно-технических конференциях и симпозиумах: девятой и десятой международных конференциях «New Electrical and Electronic Technologies and their Industrial Implementations» (Zakopane, Poland, 2015 г., 2017 г.); двенадцатой, тринадцатой, четырнадцатой и пятнадцатой международных научно-технических конференциях «Наука – образованию, производству, экономике» (Минск, БНТУ, 2014 г., 2015 г., 2016 г., 2017 г.); международной научно-технической конференции «Энергосбережение – важнейшее условие инновационного развития АПК» (Минск, БГАТУ, 2015 г); международном семинаре им. Ю. Н. Руденко «Актуальные проблемы надежности систем энергетики» (Минск, БНТУ, 2015 г.) и другие.

Полученные при выполнении диссертационных исследований результаты переданы предприятию ОАО «Белэлектромонтажналадка» для использования с целью повышения технического совершенства выпускаемых микропроцессорных терминалов защиты линий электропередачи.

#### **Опубликование результатов диссертации**

По материалам диссертационной работы опубликовано 25 печатных работ. Из них 11 статей в журналах из перечня научных изданий ВАК Республики Беларусь, общим объемом 6,15 авторского листа, 9 текстов и тезисов докладов в сборниках материалов семинаров, конференций и симпозиумов, в том числе международных научно-технических конференций, среди которых есть и доклады на английском языке. В процессе выполнения исследования получено два патента на изобретение Республики Беларусь и один патент на изобретение Евразийской патентной организации. Общее количество опубликованного материала составляет 8,7 авторского листа.

#### **Структура и объем диссертации**

Диссертация включает в себя перечень сокращений и условных обозначений, введение, общую характеристику работы, основную часть, состоящую из четырех глав, заключение, список литературы и три приложения. Список литературы занимает 13 страниц, включает 116 пунктов и разбит на список использованных источников (88 наименований) и список публикаций соискателя ученой степени (28 наименований). Общий объем диссертационной работы составляет 166 страниц. Текст диссертации содержит 57 рисунков общим объемом 39 страниц. Приложения занимают 3 страницы.

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

**Первая глава** посвящена анализу и сравнительной оценке принципов построения, основных свойств и недостатков различных вариантов реализации существующих микропроцессорных ТЗ ЛЭП напряжением 6–10 кВ и направлений совершенствования указанных защит.

Отмечено, что не смотря на большое разнообразие применяемых цифровых устройств токовых защит ЛЭП напряжением 6–10 кВ, актуальным является вопрос их совершенствования и доработки в связи с наличием у таких защит ряда недостатков, среди которых неполный и нефиксированный охват защищаемого участка ступенью мгновенного отключения многоступенчатой ТЗ вследствие зависимости от вида повреждения, величины активного переходного сопротивления в месте повреждения и от других факторов, многоступенчатость, относительно большие времена срабатывания третьих ступеней вследствие их выбора по ступенчатому принципу, недостаточная чувствительность к некоторым несимметричным коротким замыканиям. Устранить или снизить влияние отдельных недостатков токовых защит позволяет совершенствование алгоритмов их работы благодаря широким возможностям и функционалу микропроцессорной элементной базы, в том числе за счет применения дополнительных функций.

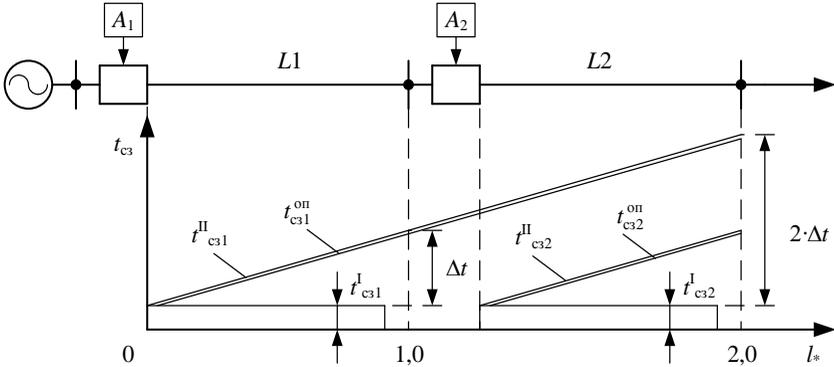
Использование информации о виде и зоне повреждения для всех ступеней ТЗ является перспективным направлением для улучшения характеристик работы токовых защит ЛЭП напряжением 6–10 кВ, в том числе с целью увеличения протяженности и стабильности зоны для ступени мгновенного отключения, повышения чувствительности устройств РЗ, предоставления возможности по выбору оптимальных параметров срабатывания для различных элементов многоступенчатой ТЗ. Использование линейно зависимых характеристик выдержек времени срабатывания различных ступеней ТЗ позволяет сократить величины указанных выдержек и соответственно повысить быстродействие исследуемых устройств РЗ. Сокращение количества ступеней для многоступенчатой ТЗ позволяет упростить ее реализацию.

Показано, что для повышения чувствительности токовых защит сильно нагруженных ЛЭП напряжением 6–10 кВ, когда токи повреждения соизмеримы с токами нагрузки, к несимметричным КЗ в зоне дальнего резервирования целесообразно рассмотреть возможность выполнения защиты с контролем токов обратной последовательности.

Во **второй главе** предложены различные варианты реализации микропроцессорной ТЗ для организации РЗ от междуфазных КЗ ЛЭП напряжением 6–10 кВ. Показано, что эффективным вариантом является двухсту-

пенчатая ТЗ с дополнительной ступенью от несимметричных повреждений, представляющей собой ТЗОП.

Предложенное устройство защиты  $A_1$  (рисунок 1) включает в себя в качестве первой ступени ТЗ – мгновенную токовую отсечку (ТО) с независимой характеристикой срабатывания. Она реагирует на полные токи фаз и предназначена для отключения междуфазных КЗ на защищаемом участке ЛЭП  $L1$  с наименьшим временем срабатывания  $t_{c31}^I$ .



**Рисунок 1. – Характеристики срабатывания для двухступенчатой ТЗ от междуфазных повреждений с дополнительной ступенью**

Вторая ступень рассматриваемой защиты  $A_1$  представляет собой максимальную токовую защиту (МТЗ) с линейно зависимой характеристикой срабатывания. Она предназначена для организации РЗ защищаемого участка ЛЭП  $L1$  от всех видов повреждений и обеспечения ближнего резервирования первой ступени ТЗ устройства  $A_1$ , а также дальнего резервирования защиты  $A_2$  смежного участка линии электропередачи  $L2$ . Вторая ступень функционирует с выдержкой времени  $t_{c31}^{II}$ , линейно зависящей от значения расстояния (в о. е.) до места КЗ:  $t_{c31}^{II} = f(l^*)$ . КЗ в конце защищаемого участка ЛЭП  $L1$  отключается со временем срабатывания защиты  $t_{c31}^{II} = t_{c31}^I + \Delta t$ , где  $\Delta t$  – ступень селективности. При повреждениях в конце смежного участка ЛЭП  $L2$  выдержка времени действия защиты составляет  $t_{c31}^{II} = t_{c32}^I + 2 \cdot \Delta t$ , где  $t_{c32}^I$  – выдержка времени независимой части характеристики устройства защиты  $A_2$  смежного участка ЛЭП  $L2$ .

Также в состав устройства РЗ  $A_1$  входит дополнительная ступень, реагирующая на составляющие обратной последовательности в токах и представляющая собой ТЗОП. Данная ступень реализуется с выдержкой времени  $t_{c31}^{op}$ , которая линейно зависит и пропорциональна значению расстояния (в о. е.) до несимметричного повреждения:  $t_{c31}^{op} = f(l^*)$ .

Реализованные с независимой и линейно зависимыми выдержками времени срабатывания функции двухступенчатой ТЗ и ТЗОП позволяют выявлять и устранять междуфазные КЗ на защищаемом и смежном участках ЛЭП с обеспечением как ближнего, так и дальнего резервирования.

Описаны алгоритмы установления контролируемых информационных параметров входных токов для РЗ ЛЭП напряжением 6–10 кВ. Выполнено исследование и показана возможность их использования для двухступенчатой ТЗ и ТЗОП. Установлено, что предлагаемые алгоритмы надежно устраняют колебания контролируемых параметров при отклонении частоты сети от номинальной величины.

Предложен метод определения вида междуфазного повреждения на ЛЭП напряжением 6–10 кВ с оценкой значений двух критериев относительной несимметрии  $\Delta I_1$  и  $\Delta I_2$ , рассчитываемых по следующим формулам:

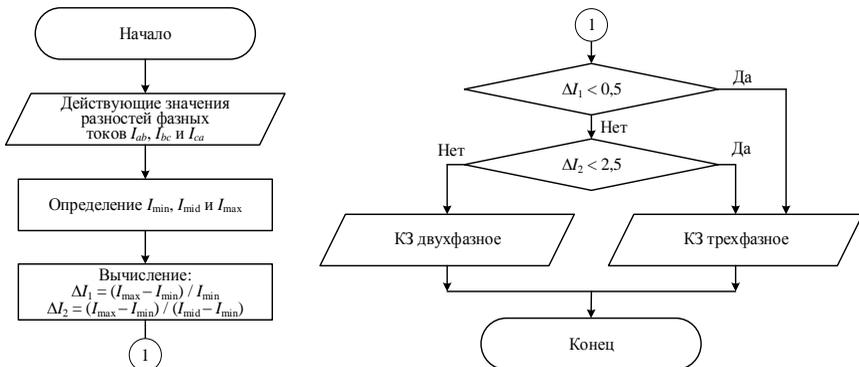
$$\Delta I_1 = (I_{\max} - I_{\min}) / I_{\min}, \quad (1)$$

$$\Delta I_2 = (I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\text{mid}} - I_{\min}). \quad (2)$$

где  $I_{\max}$ ,  $I_{\text{mid}}$ ,  $I_{\min}$  – это соответственно наибольшее, среднее и минимальное из трех действующих значений разностей фазных токов ЛЭП  $I_{ab}$ ,  $I_{bc}$  и  $I_{ca}$ .

При использовании указанного метода корректно фиксируются двух- и трехфазные КЗ на защищаемом и смежном участках ЛЭП во всех режимах повреждений. Информация о виде междуфазного КЗ позволяет увеличить чувствительность ступеней ТЗ к несимметричным повреждениям, а также используется в алгоритме определения зоны КЗ.

Блок-схема алгоритма определения вида КЗ представлена на рисунке 2.



**Рисунок 2. – Блок-схема алгоритма определения вида КЗ для двухступенчатой токовой защиты**

Предложен метод определения зоны повреждения на ЛЭП напряжением 6–10 кВ на основе контроля разностей токов фаз, который позволяет с приемлемой достоверностью установить зону КЗ при междуфазных повреждениях независимо от их вида. Использование указанной информации обеспечивает увеличение области мгновенного отключения быстродействующей первой ступени ТЗ ЛЭП напряжением 6–10 кВ.

При реализации метода определяется расчетное расстояние до места повреждения  $l_{k*}$  по значениям токов КЗ. При  $l_{k*} \leq 1$  о. е. зона повреждения находится на защищаемом участке ЛЭП, в противном случае – она располагается за его границами. Установлено, что величины  $1/I_k$  и относительной длины ЛЭП  $l_*$  линейно связаны между собой посредством зависимости  $(1/I_k) = f(l_*)$ , приведенной на рисунке 3.

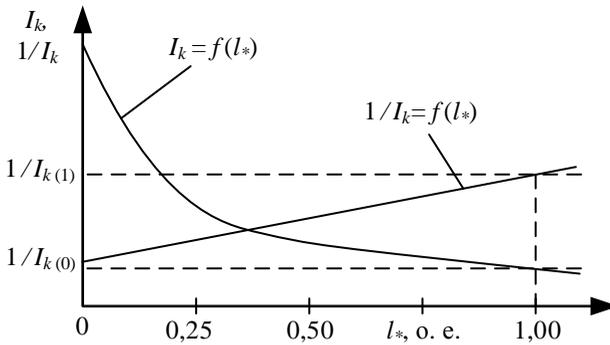


Рисунок 3. – Зависимости значений  $I_k$  и  $1/I_k$  от относительной длины ЛЭП  $l_*$  в режиме повреждения на ней

Используя для представления зависимости  $(1/I_k) = f(l_*)$  уравнение прямой, проходящей через две точки на определенной плоскости с координатами  $[0; (1/I_{k(0)})]$  и  $[1; (1/I_{k(1)})]$ , и после его решения относительно переменной  $I_{k*}$  получено выражение (3):

$$I_k = \frac{I_{k(0)} \cdot I_{k(1)}}{l_* \cdot (I_{k(0)} - I_{k(1)}) + I_{k(1)}}, \quad (3)$$

где  $I_{k(1)}$  и  $I_{k(0)}$  – действующие величины токов КЗ при повреждениях на ЛЭП соответственно в точках при  $l_* = 1$  о. е. и  $l_* = 0$  о. е.

Из выражения (3) с учетом дополнительных преобразований получена формула (4) для вычисления расстояния  $l_{k*}$  при известном значении тока  $I_k$  с использованием специального поправочного коэффициента  $K_{п}$ .

$$I_{k*} = \frac{(I_{k(0)} - I_k K_n) \cdot I_{k(1)}}{(I_{k(0)} - I_{k(1)}) \cdot I_k K_n}. \quad (4)$$

За счет применения поправочного коэффициента  $K_n$ , выражения для которого получены в результате вычислительных экспериментов, повышается достоверность определения зоны КЗ по уровню аварийных токов при наличии переходных сопротивлений.

Предложен метод определения зоны повреждения по току обратной последовательности для ТЗОП. Коррекция тока обратной последовательности обеспечивает повышение достоверности определения зоны КЗ при несимметричных повреждениях на нагруженных ЛЭП напряжением 6–10 кВ за счет более точного установления расстояния до места КЗ.

Блок-схема алгоритма определения зоны КЗ представлена на рисунке 4.

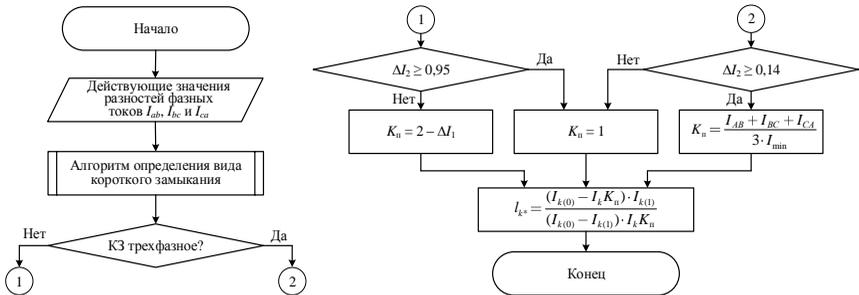
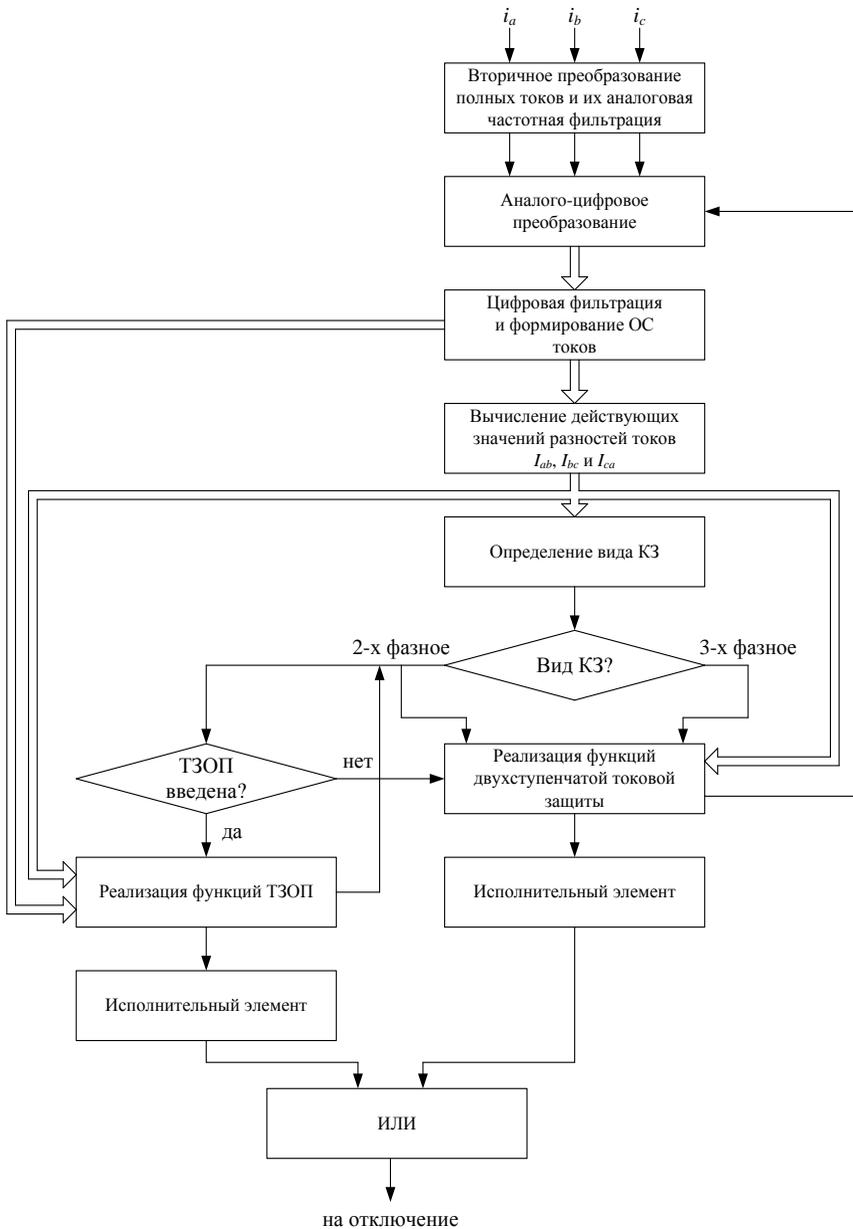


Рисунок 4. – Блок-схема алгоритма определения зоны КЗ

В **третьей главе** описана организация функционирования ТЗ, реализованной на базе типовой структуры, включающей в себя входные преобразователи тока, аналоговые частотные фильтры, аналоговый мультиплексор, аналого-частотный преобразователь, а также цифровую часть. Структурная схема указанной организации представлена на рисунке 5.

Предложено выполнять ТЗ ЛЭП напряжением 6–10 кВ с использованием следующих функциональных единиц: первой ступени ТЗ от междуфазных КЗ для их отключения на защищаемом участке ЛЭП без специальной выдержки времени, второй ступени с линейно зависимыми выдержками времени для защиты от междуфазных КЗ, реализующей ближнее резервирование первой ступени и дальнейшее резервирование защиты смежного участка ЛЭП, а также дополнительной ТЗОП для реализации функций ближнего и дальнего резервирования первых двух ступеней и защит защищаемого и смежного участков ЛЭП при несимметричных повреждениях.



**Рисунок 5. – Структурная схема организации функционирования ТЗ**

Разработаны принципы реализации измерительной и логической частей двухступенчатой ТЗ и ТЗОП, выполненные программными средствами с применением современной микропроцессорной техники. Основные подходы по организации алгоритмов работы и принципов построения рассматриваемой ТЗ представлены в виде функциональных схем, где изображены программные и аппаратные блоки, различные элементы, в том числе логические, и связи между ними.

Предложена методика, позволяющая определять параметры срабатывания (токи и выдержки времени срабатывания) для соответствующих ступеней ТЗ, обеспечивающая надежное и селективное функционирование с требуемыми характеристиками быстродействия и чувствительности для двухступенчатой ТЗ с дополнительной функцией ТЗОП.

Ток срабатывания для первой ступени вычисляется по условию ее надежного функционирования при внутренних повреждениях на защищаемом участке ЛЭП  $L1$  (рисунок 1), когда токи повреждения имеют минимальные значения. Первая ступень токовой защиты имеет небольшую выдержку времени  $t_{c31}^I$ , представляющую лишь ее собственное время срабатывания без специально создаваемой дополнительной выдержки времени.

Ток срабатывания для второй ступени ТЗ имеет два значения: для режима трехфазного КЗ  $I_{c31}^{III(3)}$ , который определяется по известной методике, и при двухфазном повреждении  $I_{c31}^{II(2)}$ , определяемый из условия надежной отстройки второй ступени защиты от максимального тока нагрузки для несимметричного режима работы ЛЭП без учета самозапуска. Расчет времени срабатывания для второй ступени ТЗ при возникновении междуфазных КЗ на защищаемом участке ЛЭП  $L1$  выполняется по выражению (5) с использованием информации об относительном расстоянии до точки повреждения:

$$t_{c31}^{II} = t_{c31}^I + l_{1k*} \cdot \Delta t, \quad (5)$$

где  $l_{1k*}$  – значение относительного расстояния от места установки РЗ до точки возникновения КЗ;

$\Delta t$  – величина ступени селективности, с.

При появлении повреждения на смежном участке ЛЭП  $L2$  значение выдержки времени  $t_{c31}^{II}$  вычисляется по следующему выражению (6):

$$t_{c31}^{II} = t_{c31}^I + (1 + l_{2k*}) \cdot \Delta t, \quad (6)$$

где  $l_{2k*}$  – значение относительного расстояния от начала смежного участка ЛЭП до точки возникновения КЗ.

Указанная выдержка времени  $t_{c31}^n$  линейно зависит от относительного расстояния  $l_*$  от места установки РЗ до точки возникновения КЗ.

ТЗОП непосредственно реагирует на ток обратной последовательности  $I_2$  и имеет линейно зависимую характеристику срабатывания. В качестве параметров срабатывания токовой защиты обратной последовательности используются ток  $I_{c3}^{on}$  и время  $t_{c3}^{on}$ . Значение  $I_{c3}^{on}$  является жестко заданной постоянной величиной и определяется из условий его отстройки от значения тока обратной последовательности допустимого несимметричного режима и от небаланса цифровых фильтров токов обратной последовательности в нагрузочных режимах. Величина  $t_{c3}^{on}$  вычисляется в процессе выполнения алгоритма работы защиты в зависимости от расстояния от места установки РЗ до точки КЗ аналогичным образом, как и для двухступенчатой токовой защиты: по выражению (7) если место КЗ находится на защищаемом участке ЛЭП  $L1$ , и по выражению (8) при нахождении места повреждения на смежном участке ЛЭП  $L2$ .

$$t_{c3}^{on} = t_{c3}^1 + \Delta t \cdot l_{*p}, \quad (7)$$

$$t_{c3}^{on} = t_{c3}^1 + (1 + l_{*p}) \cdot \Delta t. \quad (8)$$

Разработана методика согласования характеристик срабатывания для функций ТЗ, в том числе и для функции ТЗОП, с защитами смежных участков ЛЭП различной протяженности, которая обеспечивает требуемое быстродействие и гарантированное селективное отключение только поврежденного участка ЛЭП.

Новизна предложенных принципов выполнения двухступенчатой ТЗ и ТЗОП подтверждены патентами на изобретения, выданными Национальным центром интеллектуальной собственности Республики Беларусь и Евразийской патентной организацией.

В **четвертой главе** описаны основные показатели, по которым оценивается техническое совершенство токовой защиты: устойчивость функционирования и селективность. Первый критерий количественно оценивается коэффициентом чувствительности, второй характеризуется показателями быстродействия и защитоспособностью, которую в том числе можно оценить по зоне действия защиты.

Кратко изложены информационное и математическое обеспечение вычислительного эксперимента, в качестве основы которого использовался программный комплекс из различных компьютерных программ, в которых были реализованы математические модели участка распределительной сети и исследуемой защиты. С помощью указанного инструментария ме-

тодом вычислительного эксперимента исследовано техническое совершенство защиты в различных режимах работы защищаемого и смежного участков ЛЭП.

Зона мгновенного отключения междуфазных повреждений двухступенчатой ТЗ на рассматриваемых линиях электропередачи составляет до 90 % от всей длины защищаемого участка ЛЭП (рисунок 6) при 40–80 % для традиционной ступенчатой токовой защиты, а также в отличие от нее не зависит от вида повреждения и режима работы сети. Время срабатывания первой ступени двухступенчатой ТЗ не менее чем в 1,2 раза меньше чем у аналогичной ступени традиционной защиты и не превышает 0,0323 с. Для второй ступени ТЗ, работающей с линейно зависимой характеристикой, время работы защиты вне зависимости от топологии сети на защищаемом участке ЛЭП не превышает величину ступени селективности по времени  $\Delta t$ , а на смежном участке линии электропередачи в зоне дальнего резервирования – двух ступеней селективности  $\Delta t$ . Также обеспечивается повышение чувствительности второй ступени предложенной защиты к несимметричным КЗ не менее чем в 2,5 раза для зон ближнего и дальнего резервирования по сравнению с традиционно используемыми в распределительных сетях ступенчатыми ТЗ.

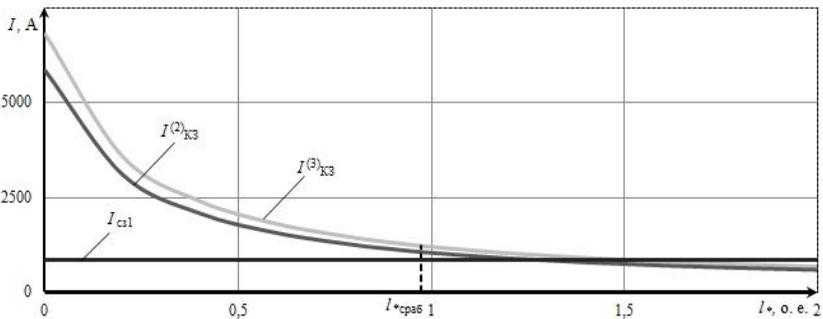


Рисунок 6. – Зона действия  $l_{ср.аб}$  для первой ступени двухступенчатой ТЗ  $I_{сз}^{(2,3)}$  при двухфазных  $I_{кз}^{(2)}$  и трехфазных КЗ  $I_{кз}^{(3)}$

Результаты исследований показывают, что взятые за основу принципы и алгоритмы функционирования ТЗОП, используемой в качестве дополнительной ступени, с повышенными показателями технического совершенства к несимметричным КЗ, обеспечивают ее корректную работу и в 1,33 раза большую чувствительность к удаленным несимметричным повреждениям в зоне дальнего резервирования и в 1,71 раза – в зоне ближнего резервирования по сравнению с традиционными ТЗ, реагирующими на полные токи фаз.

Оценка уровня быстродействия показывает, что двухфазные металлические КЗ вне зависимости от топологии сети в конце защищаемого участка ЛЭП отключаются ТЗОП с выдержкой времени не превышающей значение ступени селективности по времени  $\Delta t$ , а при повреждениях в конце смежного участка – не превышающим величину двух ступеней селективности  $\Delta t$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе исследован комплекс научно-технических положений, направленных на разработку двухступенчатой токовой защиты с дополнительной ступенью от несимметричных повреждений для линий электропередачи напряжением 6–10 кВ. Их реализация обеспечит повышение эффективности работы релейной защиты элементов электроэнергетической сети, что, в свою очередь, будет способствовать повышению надежности и экономичности электроснабжения различных групп потребителей как за счет уменьшения перерывов нарушения их питания, так и достоверного определения и устранения различных повреждений на защищаемых и резервируемых участках ЛЭП. Предложенные решения могут быть реализованы на программном уровне на основе уже используемых средств современной цифровой техники.

### **Основные научные результаты диссертации**

Среди наиболее существенных научно-технических результатов, полученных в ходе проведенного исследования, необходимо отметить следующие:

1. Предложено для организации релейной защиты от междуфазных коротких замыканий линий электропередачи напряжением 6–10 кВ использовать двухступенчатую токовую защиту с дополнительной ступенью от несимметричных повреждений. Первая ступень указанной защиты – быстродействующая токовая отсечка без специальной выдержки времени. В качестве второй ступени, реализующей функций ближнего и дальнего резервирования, предложено использовать максимальную токовую защиту с линейно зависимой характеристикой выдержек времени. Дополнительная ступень, реализующая функции ближнего и дальнего резервирования, с повышенной чувствительностью к несимметричным повреждениям – токовая защита обратной последовательности с линейно зависимой характеристикой выдержек времени [3–5, 10, 12–14, 19, 21–25].

2. Разработан метод определения вида междуфазного повреждения на линиях электропередачи напряжением 6–10 кВ с оценкой значений двух критериев относительной несимметрии  $\Delta I_1$  и  $\Delta I_2$ , при использовании которого достоверно устанавливаются двух- и трехфазные КЗ на защищаемом и смежном участках ЛЭП во всех режимах повреждений [1, 7, 8].

3. Предложены методы определения зоны повреждения при междуфазных КЗ на ЛЭП напряжением 6–10 кВ на основе контроля разностей токов фаз и по току обратной последовательности, которые позволяют с приемлемой достоверностью установить зону повреждения при металлических КЗ. Повышение достоверности определения зоны КЗ при наличии переходных сопротивлений обеспечивается за счет применения поправочных коэффициентов, выражения для которых получены в результате большого числа вычислительных экспериментов [1, 2, 6, 9, 11, 17].

4. Полученные методом вычислительного эксперимента результаты исследований позволяют сделать вывод о том, что взятые за основу принципы и алгоритмы функционирования двухступенчатой ТЗ обеспечивают правильность ее работы и улучшение отдельных показателей технического совершенства при меньшем количестве ступеней по сравнению с традиционными ступенчатыми токовыми защитами с независимыми выдержками времени [1, 5].

Зона мгновенного отключения междуфазных повреждений двухступенчатой ТЗ на линиях электропередачи составляет до 90 % от всей длины защищаемого участка ЛЭП при 40–80 % для традиционной ступенчатой токовой защиты, а также в отличие от нее не зависит от вида повреждения и режима работы сети. Время срабатывания первой ступени двухступенчатой ТЗ не менее чем в 1,2 раза меньше чем у аналогичной ступени традиционной защиты и не превышает 0,0323 с [5]. Для второй ступени ТЗ, работающей с линейно зависимой характеристикой, время работы защиты вне зависимости от топологии сети на защищаемом участке ЛЭП не превышает величину ступени селективности по времени, а на смежном участке линии электропередачи в зоне дальнего резервирования – двух ступеней селективности [5, 21]. Обеспечивается повышение чувствительности второй ступени предложенной защиты к несимметричным повреждениям не менее чем в 2,5 раза для зон ближнего и дальнего резервирования по сравнению с традиционно используемыми в распределительных сетях ступенчатыми токовыми защитами [5].

5. Дополнительная ступень (ТЗОП) обладает повышенной чувствительностью к несимметричным повреждениям и синхронно работает с основными ступенями двухступенчатой ТЗ, что позволяет использовать для их выполнения некоторые общие аналоговые и цифровые элементы, что значительно упрощает их цифровую реализацию [10, 14]. Для данной ступени характерна более высокая чувствительность к двухфазным КЗ в сравнении с защитами, которые в своей работе определяют вид повреждения и контролируют значения полных токов. Так, в зоне дальнего резервирования величина коэффициента чувствительности ТЗОП к двухфазным КЗ может быть выше до 1,33 раза, а в зоне ближнего резервирования – до 1,71 раза [10].

Оценка уровня быстродействия показывает, что двухфазные металлические повреждения вне зависимости от топологии сети в конце защищаемого участка линии электропередачи отключаются ТЗОП с выдержкой времени не превышающей значение ступени селективности по времени, а при повреждениях в конце смежного участка ЛЭП – не превышающей величину двух указанных ступеней [10].

Новизна предложенных принципов выполнения двухступенчатой токовой защиты и ТЗОП подтверждается патентами на изобретения, выданными Национальным центром интеллектуальной собственности Республики Беларусь и Евразийской патентной организацией [26, 27, 28].

### **Рекомендации по практическому использованию результатов**

Результаты, алгоритмические и технические решения, полученные при проведении исследования:

– использованы при выполнении работы по заданию 1.1.27 «Развитие методов совершенствования микропроцессорной токовой защиты линий, обеспечивающих повышение ее быстродействия и чувствительности» подпрограммы «Энергобезопасность и надежность энергоснабжения» Государственной программы научных исследований «Энергобезопасность, энергоэффективность и энергосбережение, атомная энергетика» (2013–2015 годы), утвержденной Постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 09.06.2010 № 886 «Об утверждении перечня государственных программ научных исследований на 2011–2015 годы», а также при выполнении работы по заданию 1.2.05 «Повышение надежности электроснабжения потребителей на основе увеличения чувствительности токовой защиты к несимметричным коротким замыканиям» подпрограммы «Энергетическая безопасность и надежность энергетических систем» государственной программы научных исследований «Энергетические системы, процессы и технологии» на 2016–2020 годы, утвержденной Постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 10.06.2015 № 483 «Об утверждении перечня государственных программ научных исследований на 2016–2020 годы»;

– переданы белорусской компании ОАО «Белэлектромонтажналадка» для повышения технического совершенства без существенного изменения их аппаратной части при разработке новых и модернизации существующих микропроцессорных устройств для организации релейной защиты линий электропередачи напряжением 6–10 кВ.

Полученные результаты также могут быть использованы в научно-исследовательских, проектных, опытно-конструкторских и других организациях, которые осуществляют проектирование, модернизацию, разработку и исследования устройств релейной защиты с улучшенными показателями технического совершенства.



## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

**Статьи в изданиях, включенных в перечень научных изданий Республики Беларусь для опубликования результатов диссертационных исследований**

1. Романюк, Ф. А. Совершенствование алгоритма формирования ортогональных составляющих входных величин в микропроцессорных защитах линий распределительных сетей / Ф. А. Романюк, М. А. Шевалдин // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ.) – 2014. – № 1. – С. 5–11.

2. Романюк, Ф. А. Определение места повреждения на линиях напряжением 6–35 кВ с односторонним питанием / Ф. А. Романюк, М. А. Шевалдин // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ.) – 2014. – № 5. – С. 5–14.

3. Романюк, Ф. А. Принципы выполнения токовой защиты линий с односторонним питанием от междуфазных коротких замыканий / Ф. А. Романюк, М. А. Шевалдин // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ.) – 2015. – № 1. – С. 5–11.

4. Романюк, Ф. А. Направление совершенствования токовых защит линий распределительных сетей / Ф. А. Романюк, М. А. Шевалдин // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ.) – 2015. – № 2. – С. 5–10.

5. Шевалдин, М. А. Исследование двухступенчатой токовой защиты линий электропередачи распределительных сетей / М. А. Шевалдин // Энергетика и ТЭК: Ежемесячный научно-производственный журнал. – 2015. – № 11. – С. 20–24.

6. Романюк, Ф. А. Исследование алгоритмов формирования токов обратной последовательности / Ф. А. Романюк, В. Ю. Румянцев, М. А. Шевалдин // Энергетическая стратегия: научно-практический журнал – 2016. – № 4 (52). – С. 48–51.

7. Романюк, Ф. А. Определение вида междуфазного короткого замыкания в токовых защитах линий 6–35 кВ / Ф. А. Романюк, О. А. Гурьянчик, М. А. Шевалдин, В. С. Каченя // Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. Энергетика. – 2017. – № 1. – С. 5–15.

8. Романюк, Ф. А. Определение вида повреждения в токовых защитах линий электропередачи 6–35 кВ / Ф. А. Романюк, Е. В. Булойчик, О. А. Гурьянчик, М. А. Шевалдин // Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. Энергетика. – 2017. – № 6. – С. 497–504.

9. Романюк, Ф. А. Определение зоны повреждения по уровню токов короткого замыкания / Ф. А. Романюк, Е. В. Булойчик, М. А. Шевалдин // Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. Энергетика. – 2018. – № 5. – С. 396–407.

10. Романюк, Ф. А. Исследование принципа выполнения токовой защиты обратной последовательности ВЛ 6–10 кВ / Ф. А. Романюк, Е. В. Булойчик,

М. А. Шевалдин // Энергетическая стратегия: научно-практический журнал – 2018. – № 6 (66). – С. 38–43.

11. Романюк, Ф. А. Определение зоны короткого замыкания на ЛЭП 6–35 кВ с односторонним питанием по току обратной последовательности / Ф. А. Романюк, Е. В. Булойчик, М. А. Шевалдин // Энергетическая стратегия: научно-практический журнал – 2019. – № 2 (68). – С. 48–51.

#### **Статьи в других изданиях**

12. Шевалдин, М. А. Пути совершенствования токовых защит линий с односторонним питанием в распределительных сетях / М. А. Шевалдин // Энергетическая стратегия: научно-практический журнал – 2015. – № 3 (45). – С. 31–33.

13. Шевалдин, М. А. Совершенствование токовых защит линий электропередачи как один из способов повышения надежности электроснабжения потребителей АПК / М. А. Шевалдин // Энергосбережение – важнейшее условие инновационного развития АПК: сборник научных статей Международной научно-технической конференции. Минск, 26-27 ноября 2015 г. – Минск: БГАТУ, 2015. – С. 66–69.

14. Романюк, Ф. А. Повышение чувствительности токовой защиты к несимметричным повреждениям на линиях электропередачи напряжением 6–35 кВ / Ф. А. Романюк, М. А. Шевалдин // Энергетика и ТЭК: Ежемесячный научно-производственный журнал. – 2016. – № 4. – С. 23–25.

15. Романюк, Ф. А. Использование цифрового моделирования для разработки и испытаний устройств релейной защиты / Ф. А. Романюк, И. В. Новаш, В. Ю. Румянцев, М. А. Шевалдин // Энергетическая стратегия: научно-практический журнал – 2017. – № 1 (55). – С. 46–49.

16. Шевалдин, М. А. Совершенствование систем РЗА на объектах Белорусской энергосистемы / М. А. Шевалдин // Энергетическая стратегия: научно-практический журнал – 2018. – № 2 (62). – С. 10–13.

#### **Материалы конференций и тезисы докладов**

17. Романюк, Ф. А. Определение места повреждения на линиях распределительных сетей / Ф. А. Романюк, В. Ю. Румянцев, М. А. Шевалдин // Наука – образованию, производству, экономике: материалы 12-й Международной научно-технической конференции. (В 4 томах). Т. 1. – Минск: БНТУ, 2014. – С. 10.

18. Романюк, Ф. А. Состояние и перспективы развития релейной защиты и автоматики белорусской энергосистемы / Ф. А. Романюк, М. С. Ломан, М. А. Шевалдин // Энергетическая безопасность Союзного государства: сборник материалов секции, 6–11 октября 2014 года / Белорусский национальный технический университет, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ». – Минск: БНТУ, 2014. – С. 15–19.

19. Romaniuk Fyodor, Shevaldin Mikhail, Loman Mikhail, Wegierek Pawel Current Protection with Combined Time Delay Characteristic // 9th International Conference NEET-2015 / Zakopane, Poland, June 23–26, 2015. – P. 154–155.

20. Шевалдин, М. А. Современное состояние и направление развития в области РЗА на объектах Белорусской энергосистемы / М. А. Шевалдин // Сборник материалов научно-практического семинара в сфере электроэнергетики (19-20 марта, Гомель): тезисы докладов – Минск, 2015. – С. 143–146.

21. Романюк, Ф. А. Повышение надежности электроснабжения за счет совершенствования токовых защит линий / Ф. А. Романюк, М. А. Шевалдин // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики – Актуальные проблемы надежности систем энергетики: сборник научных статей, выпуск 66 (материалы Международного семинара имени Ю. Н. Руденко) – Минск : БНТУ, 2015. – С. 27–30.

22. Романюк, Ф. А. Алгоритм функционирования микропроцессорной токовой защиты линий / Ф. А. Романюк, В. Ю. Румянцев, М. А. Шевалдин // Наука – образованию, производству, экономике: материалы 13-й Международной научно-технической конференции. Т. 1. – Минск : БНТУ, 2015. – С. 4.

23. Романюк, Ф. А. Новые алгоритмы работы токовых защит линий электропередачи распределительных сетей / Ф. А. Романюк, М. А. Шевалдин // Наука – образованию, производству, экономике: материалы 14-й Международной научно-технической конференции. (В 4 томах). Т. 1. – Минск : БНТУ, 2016. – С. 10.

24. Romanyuk Fyodor, Rumiantsev Vladimir, Shevaldin Mihail, Increase of Sensitivity of Microprocessor Overcurrent Protection of the Power Lines to the Asymmetrical Faults // 10th International Conference NEET-2017 / Zakopane, Poland, June 27–30, 2017. – P. 35.

25. Романюк, Ф. А. Принципы выполнения токовой защиты линий электропередачи от междуфазных коротких замыканий / Ф. А. Романюк, В. Ю. Румянцев, М. А. Шевалдин // Наука – образованию, производству, экономике: материалы 15-й Международной научно-технической конференции. – Минск: БНТУ, 2017. – Т. 1. – С. 26.

### **Патенты**

26. Устройство для токовой защиты от междуфазных коротких замыканий линии с односторонним питанием: пат. 19783 Респ. Беларусь : МПК (2006.01) Н 02Н 3/08, Н 02Н 3/20. / Ф. А. Романюк, М. А. Шевалдин; заявитель и патентообладатель: Белорус. нац. тех. ун-т. – Номер заявки: № а 20140481; заявл. 2014.09.11; опубл. 2016.02.28 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2016. – № 1 (108). – С. 131–132.

27. Токовая защита линии электропередачи от междуфазных коротких замыканий: пат. 20999 Респ. Беларусь : МПК (2006.01) Н 02Н 3/08, Н 02Н 3/20. / Ф. А. Романюк, М. А. Шевалдин; заявитель и патентообладатель:

Белорус. нац. тех. ун-т. – Номер заявки: № а 20150557; заявл. 2015.11.13; опубл. 2017.04.30 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2017. – № 2 (115). – С. 119–120.

28. Токовая защита линии электропередачи от междуфазных коротких замыканий: пат. 031787 Евразийская патентная организация (ЕАПО): Н 02Н 3/08 (2006.01) / Ф. А. Романюк, В. Ю. Румянцев, М. А. Шевалдин; заявитель и патентовладелец: Беларус. нац. тех. ун-т. – Номер заявки: № 201700190, заявл. – 2017.03.24, опубл. 2019.02.28 // Бюллетень евразийского патентного ведомства: изобретения (евразийские заявки и патенты). – 2019. – № 2. – С. 533.

**РЭЗІЮМЭ****Шэвалдзін Міхаіл Андрэвіч****ПРЫНЦЫПЫ ВЫКАНАННЯ МІКРАПРАЦЭССАРНЫХ ТОКАВЫХ  
ЗАСЦЯРОГ ЛІНІЙ ЭЛЕКТРАПЕРАДАЧЫ 6–10 кВ  
З ВЫКАРЫСТАННЕМ ІНФАРМАЦЫІ АБ ВІДЗЕ І ЗОНЕ  
КАРОТКАГА ЗАМЫКАННЯ**

**Ключавыя словы:** размеркавальная сетка, рэлейная засцярога, максімальная токавая засцярога, вызначэнне віду кароткага замыкання, вызначэнне месца кароткага замыкання, токавая засцярога зваротнай паслядоўнасці.

**Мэта працы:** распрацоўка тэхнічных і алгарытмічных прынцыпаў выканання мікрапрацэсарнай токавай засцярогі ліній электраперадачы размеркавальных сетак з павышанымі паказчыкамі тэхнічнай дасканаласці.

**Метады даследавання:** матэматычнае і кампутарнае мадэляванне, тэрэтычны аналіз, вылічальны эксперымент.

**Атрыманыя вынікі і іх навізна:** прапанаваны прынцып выканання і алгарытмы функцыянавання мікрапрацэсарнай двухступенчатай токавай засцярогі з дадатковай ступенню ад несіметрычных пашкоджанняў, якія забяспечваюць правільнасць яе працы і паляпшэнне асобных паказчыкаў тэхнічнай дасканаласці пры меншай колькасці ступеняў у параўнанні з традыцыйнымі ступенчатымі токавым засцярогамі. Распрацаваны метады вызначэння віду міжфазнага кароткага замыкання на ЛЭП з ацэнкай значэнняў двух крытэрыяў адноснай несіметрыі і зоны міжфазнага пашкоджання на аснове кантролю рознасцяў токаў фаз і па току зваротнай паслядоўнасці, што забяспечвае павышэнне адчувальнасці засцярогі да несіметрычных КЗ, пашырэнне зоны імгненнага адключэння і павышэнне яе стабільнасці.

Навізна прапанаваных прынцыпаў выканання двухступенчатай токавай засцярогі з дадатковай ступенню пацвярджаецца патэнтамі на вынаходніцтвы, выдадзенымі Нацыянальным цэнтрам інтэлектуальнай уласнасці Рэспублікі Беларусь і Еўразійскай патэнтнай арганізацыяй.

**Рэкамендацыі па практычным выкарыстанні вынікаў, галіна прымянення:** прапанаваныя навукова-тэхнічныя рашэнні могуць быць выкарыстаны на прадпрыемствах, што займаюцца распрацоўкай і вытворчасцю мікрапрацэсарных засцярог электраўстановак для павышэння іх тэхнічнай дасканаласці.

## РЕЗЮМЕ

Шевалдин Михаил Андреевич

**ПРИНЦИПЫ ВЫПОЛНЕНИЯ МИКРОПРОЦЕССОРНОЙ  
ТОКОВОЙ ЗАЩИТЫ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ 6–10 кВ  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНФОРМАЦИИ О ВИДЕ  
И ЗОНЕ ПОВРЕЖДЕНИЯ**

**Ключевые слова:** распределительная сеть, релейная защита, максимальная токовая защита, определение вида короткого замыкания, определение места короткого замыкания, токовая защита обратной последовательности.

**Цель работы:** разработка технических и алгоритмических принципов выполнения микропроцессорной токовой защиты линий электропередачи распределительных сетей с повышенными показателями технического совершенства.

**Методы исследования:** математическое и компьютерное моделирование, теоретический анализ, вычислительный эксперимент.

**Полученные результаты и их новизна:** предложен принцип выполнения и алгоритмы функционирования микропроцессорной двухступенчатой токовой защиты с дополнительной ступенью от несимметричных повреждений, обеспечивающие правильность ее работы и улучшение отдельных показателей технического совершенства при меньшем количестве ступеней по сравнению с традиционными ступенчатыми токовыми защитами. Разработаны методы определения вида междуфазного короткого замыкания на ЛЭП с оценкой значений двух критериев относительной несимметрии и зоны междуфазного повреждения на основе контроля разностей токов фаз и по току обратной последовательности, что обеспечивает повышение чувствительности защиты к несимметричным КЗ, расширение зоны мгновенного отключения и повышение ее стабильности.

Новизна предложенных принципов выполнения двухступенчатой токовой защиты с дополнительной ступенью подтверждается патентами на изобретения, выданными Национальным центром интеллектуальной собственности Республики Беларусь и Евразийской патентной организацией.

**Рекомендации по практическому использованию результатов, область применения:** предложенные научно-технические решения могут быть использованы на предприятиях, занимающихся разработкой и производством микропроцессорных защит электроустановок для повышения их технического совершенства.

**SUMMARY****Shevaldzin Mikhail****PRINCIPLES OF PERFORMANCE OF MICROPROCESSOR-BASED CURRENT PROTECTION OF 6-10 kV ELECTRIC DISTRIBUTION LINES USING INFORMATION ABOUT THE TYPE AND THE LOCATION OF SHORT CIRCUIT**

**Keywords:** distribution network, relay protection, overcurrent protection, determination of the type of short circuit, determination of the location of the short circuit, negative phase sequence current protection.

**The goal of research** is the development of technical and algorithmic principles of performance of microprocessor-based current protection of power lines of distribution networks with high indicators of technical perfection.

**Research methods:** mathematics and computer simulations, theoretical analysis, computing experiment.

**Obtained results and novelty:** the principle of performance and the algorithms of functioning of a microprocessor-based two-stage overcurrent protection with an additional stage against asymmetric damages, ensuring the correctness of its operation and improvement of some indicators of technical perfection with a smaller number of stages in comparison with traditional step current protection. Methods have been developed for determining the type of phase-to-phase short circuit on power lines with an assessment of the values of two criteria of relative asymmetry and phase-to-phase damage zone based on monitoring the phase currents and negative sequence current, which increases the sensitivity of protection to asymmetrical short-circuits, expands the instantaneous shutdown zone and increases its stability.

The novelty of the proposed principles of performance of two-stage overcurrent protection with an additional stage is confirmed by patents for inventions issued by the National Center of Intellectual Property of the Republic of Belarus and the Eurasian Patent Organization.

**Recommendations on practical use of the results, the field of application:** the proposed scientific and technological solutions can be used in enterprises, engaged in development and production of microprocessor-based protections of electric installations, to enhance their technical perfection.

Научное издание

**ШЕВАЛДИН**  
**Михаил Андреевич**

**ПРИНЦИПЫ ВЫПОЛНЕНИЯ МИКРОПРОЦЕССОРНОЙ  
ТОКОВОЙ ЗАЩИТЫ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ 6–10 кВ  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНФОРМАЦИИ О ВИДЕ  
И ЗОНЕ ПОВРЕЖДЕНИЯ**

Автореферат диссертации  
на соискание ученой степени кандидата технических наук  
по специальности 05.14.02 – электрические станции  
и электроэнергетические системы

Подписано в печать 30.10.2020. формат 60×84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная. Ризография.  
Усл. печ. л. 1,57. Уч.-изд. л. 1,23. Тираж 70. Заказ 704.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.  
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя  
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65, 220013, г. Минск.

