

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 621.316.1 + 621.316.925

**БУЛОЙЧИК
Елена Васильевна**

**ПОВЫШЕНИЕ ЗАЩИТОСПОСОБНОСТИ
И ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ МИКРОПРОЦЕССОРНОЙ ТОКОВОЙ
ЗАЩИТЫ ЛИНИЙ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ**

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 05.14.02 – Электрические станции
и электроэнергетические системы

Минск 2016

Работа выполнена в Белорусском национальном техническом университете

Научный руководитель: **Романюк Федор Алексеевич**, член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор, проректор по научной и инновационной работе Белорусского национального технического университета

Официальные оппоненты: **Забелло Евгений Петрович**, доктор технических наук, профессор кафедры «Электрооборудование сельскохозяйственных предприятий» Белорусского государственного аграрного технического университета;

Калентиюнок Евгений Васильевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрические системы» Белорусского национального технического университета

Оппонирующая организация: Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого»

Защита состоится « 23 » июня 2016 года в 12⁰⁰ 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 (+37517) 266-26-61, адрес электронной почты: lobaty@tut.by.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского национального технического университета.

Автореферат разослан « 19 » мая 2016 г.

Ученый секретарь совета по защите диссертаций Д 02.05.02 доктор технических наук, профессор

А. А. Лобатый

©Булойчик Е. В., 2016

©Белорусский национальный технический университет, 2016

ВВЕДЕНИЕ

Линии распределительных сетей 6–35 кВ являются наиболее массовыми объектами энергосистемы, чем обусловлено возникновение на них наибольшего количества повреждений по сравнению с линиями электропередачи более высоких классов напряжения. Для защиты линий от междуфазных коротких замыканий в радиальных сетях с односторонним питанием преимущественно используются ступенчатые токовые защиты, выполненные на трех элементных базах: электромеханической, микроэлектронной и микропроцессорной. Подавляющее большинство в Белорусской энергосистеме составляют отработавшие уже десятки лет электромеханические устройства (порядка 83 % для сетей 35 кВ и 68,2 % в сетях 6–10 кВ), многие из которых физически устарели и требуют замены. Поэтому на проектируемых и модернизируемых энергетических объектах в Республике Беларусь предусматривается установка устройств защиты, выполненных средствами микропроцессорной техники. Несмотря на то, что указанная элементная база позволяет реализовать алгоритмические и технические решения различной сложности, существующие микропроцессорные токовые защиты линий распределительных сетей имеют те же принципы выполнения и алгоритмы работы, что и устройства на предшествующих элементных базах, чем обусловлено наличие у них ряда недостатков. Так, быстродействующая ступень часто имеет сравнительно короткую зону мгновенного отключения, которая к тому же изменяется в зависимости от вида повреждения, режима работы распределительной сети и наличия переходного сопротивления в месте КЗ. При этом повреждения в начале линии могут отключаться медленнодействующими ступенями. Для сильно нагруженных линий во многих случаях удаленных несимметричных коротких замыканий последняя ступень может иметь недостаточную чувствительность, что может привести к отказу срабатывания защиты. Устранение отмеченных недостатков является актуальной технической задачей, так как с учетом темпов развития электросетевого комплекса, роста объемов потребления электроэнергии и электрических нагрузок, одним из ключевых является требование надежного, бесперебойного и качественного энергообеспечения потребителей. При этом уменьшение времени отключения повреждений и снижение количества отказов устройств релейной защиты в значительной мере способствует обеспечению надежности функционирования распределительной сети, снижению ущерба промышленных предприятий от провалов напряжения при КЗ, сокращению объема и степени разрушения поврежденного оборудования.

Проведенные исследования и анализ научных публикаций показали, что перспективным направлением для устранения вышеуказанных недос-

тактов и достижения высокого технического совершенства микропроцессорной токовой защиты линий является использование достоверной информации о виде и месте повреждения. Если установлено, что местом повреждения является защищаемая линия, ее можно отключать без выдержки времени при КЗ в любой ее точке. Повышение чувствительности к удаленным несимметричным КЗ может быть достигнуто оперативным выявлением указанных режимов и соответствующим изменением токов срабатывания ступеней защиты. Полученные в результате выполнения диссертационных исследований новые теоретические и технические решения могут быть положены в основу создания более совершенных и конкурентоспособных отечественных микропроцессорных токовых защит линий распределительных сетей, что будет способствовать увеличению доли их использования на внутреннем рынке по отношению к более дорогостоящей импортной продукции и их экспортного потенциала.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами и темами

Работа выполнялась в соответствии с приоритетными направлениями фундаментальных и прикладных научных исследований Республики Беларусь в рамках задания 2.3 «Повышение технического совершенства токовых защит линий электропередачи» государственной программы научных исследований «Энергобезопасность и надежность энергоснабжения», подпрограммы «Надежность энергоснабжения» на 2011–2015 годы, утвержденной Постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 19.04.2010 № 585, а так же в рамках научно-исследовательской работы кафедры «Электрические станции» Белорусского национального технического университета «Совершенствование методов анализа и синтеза электромагнитных и электродинамических процессов в электроустановках и устройствах их релейных защит».

Цель и задачи исследования

Цель исследований заключается в повышении защитоспособности и чувствительности микропроцессорных токовых защит линий распределительных сетей.

Достижение указанной цели потребовало решения следующих задач:

- анализ основных направлений повышения технического совершенства токовых защит линий распределительных сетей и разработка принципа выполнения токовой защиты линии с улучшенными показателями технического совершенства;
- выбор способа реализации принципа выполнения токовой защиты с улучшенными качественными и количественными показателями техниче-

ского совершенства и разработка методики выбора параметров срабатывания ступеней токовой защиты;

- разработка и исследование методов определения вида удаленных КЗ и места КЗ на линиях электропередачи с односторонним питанием с учетом влияния на их работоспособность наличия в месте повреждения переходных сопротивлений различного уровня;

- разработка основных положений алгоритма функционирования измерительной и логической частей токовой защиты линии с функциями определения вида и места короткого замыкания;

- исследование разработанного принципа выполнения микропроцессорной токовой защиты линии и определение основных показателей ее технического совершенства, выработка рекомендаций по применению полученных результатов.

Объект исследования – микропроцессорная токовая защита линий распределительных сетей. Предмет исследования – принципы выполнения микропроцессорных токовых защит линий распределительных сетей и уровень их технического совершенства.

Решение поставленных задач производилось методами математического и компьютерного моделирования, теоретического анализа и вычислительного эксперимента.

Научная новизна

Разработан принцип выполнения микропроцессорной токовой защиты линий распределительных сетей 6–35 кВ с повышенной чувствительностью к удаленным несимметричным коротким замыканиям и расширенной зоной мгновенного отключения, а также алгоритм ее функционирования, отличающийся наличием функций определения вида и места КЗ, благодаря чему обеспечивается улучшение показателей технического совершенства защиты.

Разработан новый метод выявления двухфазных коротких замыканий на линиях распределительных сетей на основе относительной несимметрии токов фаз, применение которого позволяет расширить зоны действия первой и второй ступеней токовой защиты при двухфазных КЗ до 22 % и до 19 % соответственно по сравнению с защитой традиционного исполнения, при этом чувствительность второй ступени к несимметричным КЗ возрастает примерно в 1,15 раз, а чувствительность третьей в зависимости от вида повреждения до 3 раз.

Предложен метод определения места КЗ для линий радиальных сетей 6–35 кВ с односторонним питанием, применение которого обеспечивает расширение зоны мгновенного отключения быстродействующей ступени до 95 % от длины линии при металлических КЗ независимо от их вида и режима работы сети, а также охват не менее 70 % от длины линии при КЗ через переходное сопротивление; при этом зона действия первой ступени

увеличивается не менее чем в 1,21 раз при трехфазных и в 1,47 раза при двухфазных КЗ по сравнению с защитой традиционного исполнения.

Положения, выносимые на защиту

1. Принцип выполнения микропроцессорной токовой защиты линии с повышенной чувствительностью к удаленным несимметричным КЗ и расширенной зоной мгновенного отключения, основанный на определении вида и места короткого замыкания.

2. Метод выявления двухфазных коротких замыканий на линиях распределительных сетей, применение которого позволяет увеличить зоны действия первой и второй ступеней защиты при двухфазных КЗ по сравнению с микропроцессорной защитой традиционного исполнения до 22 % и 19 % соответственно, расширяя их до значений при трехфазных КЗ, при этом чувствительность второй ступени к несимметричным КЗ возрастает примерно в 1,15 раз, а чувствительность третьей в зависимости от вида повреждения до 3 раз.

3. Способ определения места повреждения, применение которого в алгоритме функционирования защиты обеспечивает расширение зоны мгновенного отключения быстродействующей ступени до 95 % от длины линии в случае металлического КЗ независимо от его вида и режима работы сети, а также охват не менее 70 % длины линии при наличии переходного сопротивления в месте повреждения; при этом зона действия первой ступени увеличивается не менее чем на 21 % при трехфазных и на 47 % при двухфазных КЗ по сравнению с защитой традиционного исполнения.

4. Алгоритм функционирования микропроцессорной токовой защиты линий распределительных сетей, отличающийся наличием функций определения вида и места короткого замыкания, благодаря чему обеспечивает существенное улучшение показателей технического совершенства защит данного класса.

5. Результаты исследования защитоспособности, чувствительности и быстродействия предлагаемой токовой защиты линии методом вычислительного эксперимента, подтверждающие ее работоспособность, правильность функционирования и высокие показатели технического совершенства в нормальных и аварийных режимах работы линии.

Личный вклад соискателя ученой степени

Изложенные в диссертации основные результаты и положения были получены при выполнении задания 2.3 «Повышение технического совершенства токовых защит линий электропередачи» ГПНИ «Энергобезопасность и надежность энергоснабжения» при участии соискателя, при этом личный вклад заключается в следующем: разработка принципа выполнения микропроцессорной токовой защиты линии на основе учета места и вида повреждения; разработка метода выявления двухфазных КЗ на линиях распределительных сетей; исследование и выбор оптимального для решаемой задачи

метода определения места КЗ; установление ограничений и пределов работоспособности методов определения вида и места КЗ; разработка функциональной схемы и алгоритма функционирования микропроцессорной токовой защиты с улучшенными показателями технического совершенства; исследование принципа выполнения токовой защиты линии и основных показателей ее технического совершенства методом вычислительного эксперимента.

Анализ и обобщение полученных результатов проводилось совместно с научным руководителем д.т.н., профессором Романюком Ф. А., который оказывал практическую помощь и консультации на всех этапах выполнения диссертационной работы. Консультативную помощь на отдельных этапах проведения исследований оказывал к.т.н., доцент Тишечкин А. А.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Результаты исследований докладывались на следующих международных научно-технических конференциях и симпозиумах: международный научный симпозиум «Перспективные материалы и технологии» (Витебск, 2011); седьмая международная конференция «New Electrical and Electronic Technologies and their Industrial Implementations» (Zakopane, Poland, 2011 г); девятая, десятая, одиннадцатая и двенадцатая международные научно-технические конференции «Наука – образованию, производству, экономике» (Минск, БНТУ, 2011 г, 2012 г, 2013 г, 2014 г); международная научно-техническая конференция «Энергосбережение – важнейшее условие инновационного развития АПК» (Минск, БГАТУ, 2011 г); девятая международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2014» (Иваново, Россия, «ИГЭУ имени В.И. Ленина», 2014 г).

Полученные при выполнении диссертационных исследований результаты используются в учебном процессе на кафедре «электрические станции» БНТУ при выполнении курсовых и дипломных проектов (подтверждается соответствующим актом), а также переданы предприятию ОАО «Белэлектромонтажно-ладка», где разработанные технические и алгоритмические решения могут быть использованы для повышения технического совершенства выпускаемых микропроцессорных терминалов защиты линий (получена справка о возможном практическом использовании результатов исследования).

Опубликование результатов диссертации

По материалам диссертационной работы опубликовано 14 печатных работ. Из них 4 статьи в журналах из перечня научных изданий ВАК Республики Беларусь, общим объемом 1,79 авторского листа, одна статья в зарубежном рецензируемом журнале, одна статья в сборнике статей международного научного симпозиума, 7 текстов и тезисов докладов в сборниках материалов международных научно-технических конференций, один патент Республики Беларусь на изобретение. Общее количество опубликованного материала составляет 3,06 авторского листа.

Структура и объем диссертации

Диссертация включает в себя перечень условных сокращений, введение, общую характеристику работы, основную часть, состоящую из четырех глав, заключение, список использованных источников и пять приложений. Список использованных источников включает 100 наименований и занимает 10 страниц. Общий объем диссертационной работы составляет 156 страниц. Текст диссертации содержит 1 таблицу и 31 рисунок общим объемом 28 страниц. Приложения занимают 34 страницы.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Первая глава посвящена анализу и оценке принципов построения, основных свойств и недостатков существующих микропроцессорных токовых защит линий распределительных сетей 6–35 кВ с односторонним питанием и направлений их совершенствования.

Отмечено, что основными недостатками существующих токовых защит являются сравнительно короткая либо отсутствующая зона мгновенного отключения токовой отсечки (ТО) и недостаточная чувствительность максимальной токовой защиты (МТЗ) во многих случаях несимметричных коротких замыканий (КЗ). В настоящее время в Белорусской энергосистеме доля устройств защиты, реализованных средствами микропроцессорной техники, составляет порядка 16,7 % в сетях 35 кВ и 31,2 % в сетях до 10 кВ включительно. Анализ микропроцессорных терминалов защиты зарубежного и отечественного исполнения показал, что они снабжаются трех- или четырехступенчатыми токовыми защитами с зависимой или независимой характеристиками выдержки времени на выбор пользователя. Последняя ступень также может дополняться комбинированным пуском по напряжению. Применение обратнoзависимой характеристики выдержки времени обеспечивает уменьшение времени отключения повреждения при увеличении тока КЗ. Однако быстрдействие защиты будет зависеть от режима работы сети, вида повреждения, наличия переходного сопротивления в месте КЗ и других факторов, при этом в зоне дальнего резервирования выдержка времени может оказаться недопустимо большой. Применение пусковых органов напряжения является одним из известных способов повышения чувствительности МТЗ, однако при удаленных повреждениях на длинных линиях, когда на шинах в месте установки защиты остаточное напряжение будет велико, а составляющие обратной последовательности малы, их чувствительность может быть недостаточной для четкой работы защиты. Таким образом, большие возможности микропроцессорной элементной базы используются не в полной мере в токовых защитах линий традиционного исполнения для устранения отдельных их недостатков.

Анализ научно-технических публикаций показал, что перспективными направлениями совершенствования токовых защит линий являются: разработка зависимых характеристик выдержки времени нового вида, позволяющих ограничить или исключить влияние отмеченных ранее факторов; введение в алгоритм функционирования защиты дополнительных функций, заключающихся в определении вида и (или) места повреждения; разработка защит, не требующих использования измерительных трансформаторов тока (ТТ).

Во второй главе разработан принцип выполнения токовой защиты линии с улучшенными показателями защитоспособности и чувствительности, предложен способ его реализации, разработана методика выбора уставок ступеней защиты.

Принцип выполнения микропроцессорной токовой защиты линий распределительных сетей основан на учете вида и места короткого замыкания. Токовую защиту предлагается выполнять трехступенчатой, с возможностью вывода из действия отдельных ступеней. Первая ступень имеет перестраиваемую структуру в зависимости от наличия цепей напряжения или их исправности и выполняет функции мгновенной токовой отсечки. Вторая и третья ступени обеспечивают функции токовой отсечки с выдержкой времени (ТОВ) и максимальной токовой защиты соответственно. Защита выполняется односистемной и реагирует на основную гармонику тока и напряжения. МТЗ имеет независимую выдержку времени. Исполнение защиты подразумевает две конфигурации. Первая доступна при наличии в месте установки защиты измерительных трансформаторов напряжения. При этом для ТО реализуется функция определения места КЗ (ОМКЗ) с учетом вида повреждения, что обеспечивает расширение ее зоны действия и независимость от вида повреждения и режима работы сети, а пересчет уставок в соответствии с видом КЗ производится только для МТЗ. Если цепи напряжения неисправны или отсутствуют, защита автоматически изменяет конфигурацию на вторую, при которой в соответствии с видом КЗ производится пересчет токов срабатывания всех трех ступеней, для чего в защиту вводятся две группы уставок. Первая задается по умолчанию и соответствует симметричным повреждениям, токи срабатывания ступеней выбираются как для токовой защиты, включенной на полные токи фаз. Вторая группа задается для несимметричного режима, ТО и ТОВ отстраиваются от токов двухфазных КЗ, а МТЗ – от максимального нагрузочного тока несимметричного режима работы линии без учета самозапуска электродвигательной нагрузки. При этом обеспечивается повышение чувствительности ТОВ и МТЗ к несимметричным КЗ и расширение зон действия ТО и ТОВ при двухфазных КЗ до значений при трехфазных.

Принцип выполнения микропроцессорной токовой защиты линии может быть реализован на основе следующей функциональной схемы (рисунок 1).

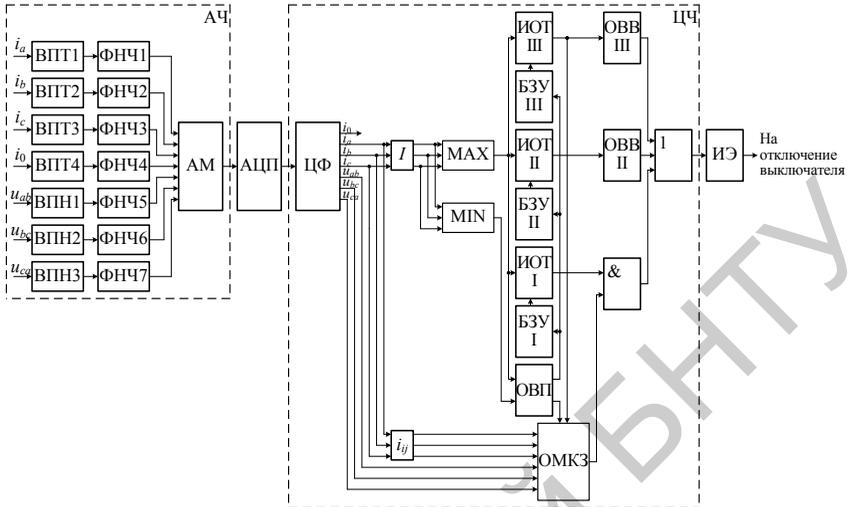


Рисунок 1. – Функциональная схема микропроцессорной токовой защиты

Аналоговая часть (АЧ) включает входные преобразователи напряжения ВПН1–ВПН3 и тока ВПТ1–ВПТ4, активные аналоговые фильтры нижних частот ФНЧ1–ФНЧ7, аналоговый мультиплексор АМ. Аналого-цифровой преобразователь АЦП связывает аналоговую и цифровую (ЦЧ) части защиты и преобразует выходные сигналы ФНЧ в цифровые выборки мгновенных значений, которые подвергаются дальнейшей обработке цифровым фильтром ЦФ. В блоке I определяются действующие значения входных токов, в блоке i_{ij} разности их синусных и косинусных ортогональных составляющих (ОС). С помощью макси- (MAX) и мини-селектора (MIN) выделяются наибольшее и наименьшее действующие значения токов фаз. Выходной сигнал максиселектора является входным для измерительных органов тока ИОТ I, ИОТ II и ИОТ III. В блоках БЗУ I, БЗУ II и БЗУ III осуществляется задание уставок, а в органах ОВВ II и ОВВ III – выдержек времени. В блоках ОВП и ОМКЗ определяются вид и место КЗ. Все блоки и элементы функциональной схемы могут быть выполнены по известным схемам на базе средств аналоговой или цифровой техники.

В третьей главе разработаны методы определения вида и места короткого замыкания, произведена оценка их работоспособности в различных режимах работы линии методом вычислительного эксперимента. Разработаны основные положения алгоритма функционирования измерительной и логической частей микропроцессорной токовой защиты линии.

Амплитудные и действующие значения входных сигналов в алгоритме функционирования защиты определяются по эквивалентным ортогональ-

ным составляющим, получаемым на выходе цифрового фильтра с числом отсчетов $n = 10$. Показано, что применяемый ЦФ обеспечивает достаточное качество фильтрации и приемлемый характер переходного процесса. Для определения амплитуды сигнала с заданной точностью достаточно одного периода промышленной частоты.

Выявление режимов двухфазных КЗ осуществляется на основе контроля относительной несимметрии токов фаз ΔI . При двухфазных КЗ на защищаемой линии в неповрежденной фазе протекает только ток нагрузки I_n , а в поврежденных фазах токи нагрузки, в два раза меньшие по величине и противоположные по знаку, накладываются на ток КЗ $I_{кз}$. При этом разность наибольшего I_{\max} и наименьшего I_{\min} действующих значений фазных токов имеет достаточную величину, свидетельствующую о несимметричном КЗ на контролируемой линии. При таких же КЗ на параллельной линии, в фазах контролируемой линии протекают только токи нагрузки, зависящие от режима несимметрии и различающиеся между собой в общем случае и по величине, и по фазе. При этом

$$I_{\max} - I_{\min} \leq 0,5 I_n. \quad (1)$$

Следовательно, учитывая, что при двухфазном КЗ $I_n = I_{\min}$, несимметричный режим на контролируемой линии будет иметь место при

$$\Delta I = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\min}} > 0,5. \quad (2)$$

Анализ (2) показывает, что выявление двухфазных КЗ обеспечивается при $I_{\max}/I_n > 1,5$. В качестве оценочных параметров эффективности (2) были приняты численные значения ΔI и время определения вида КЗ. Установлено, что с помощью (2) возможно четкое выявление режимов двухфазных металлических КЗ как на защищаемой, так и на смежных линиях (рисунок 2), а в установившихся режимах трехфазных металлических КЗ $\Delta I \approx 0$ (рисунок 3).

В переходных режимах трехфазные КЗ на головном участке защищаемой линии ($I_* \leq 0,35$) кратковременно будут восприниматься как двухфазные, что не будет приводить к ложным или излишним срабатываниям защиты. Установлено, что двухфазные КЗ в любых точках сети, выявляются достоверно при любых значениях сопротивления дуги R_d , пока ток КЗ в 1,5 раза превышает ток нагрузки (рисунок 4, а). Близкие к месту установки защиты трехфазные КЗ ($I_* \leq 0,1$) при $0,5 < R_d / Z_L < 2,5$ могут восприниматься как двухфазные, что не будет приводить к негативным последствиям в действиях защиты. В остальных случаях трехфазные КЗ фиксируются достоверно (рисунок 4, б).

Установлено, что при изменении характера нагрузки в широких пределах, предложенный метод остается работоспособным, а диапазон изменения ΔI не превышает 9 %. Время определения вида КЗ зависит от места его возникновения и при металлических и дуговых КЗ на контролируемой линии составляет не более 0,013 с, а при таких же КЗ на смежной линии не превышает 0,025 с.

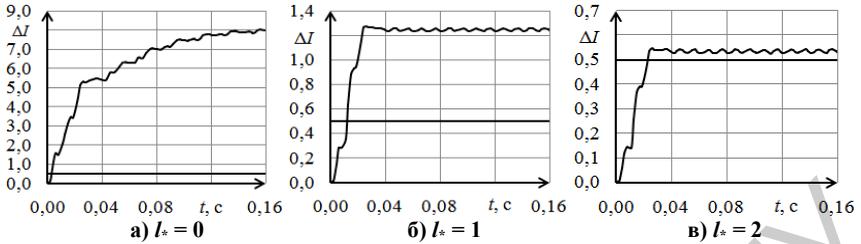


Рисунок 2. – Относительная несимметрия токов фаз при двухфазных КЗ в начале (а) и конце (б) контролируемой линии и в конце смежной линии (в)

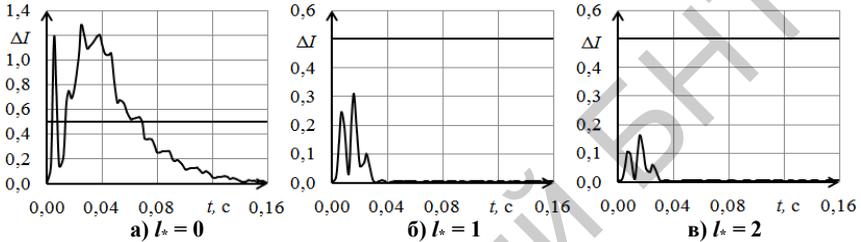


Рисунок 3. – Относительная несимметрия токов фаз при трехфазных КЗ в начале (а) и конце (б) контролируемой линии и в конце смежной линии (в)

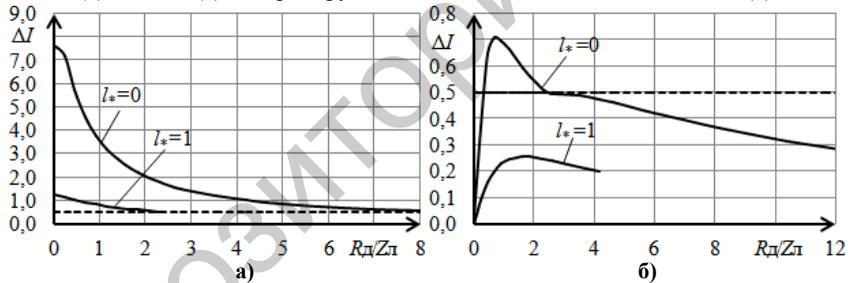


Рисунок 4. – Зависимость относительной несимметрии токов фаз от сопротивления дуги, отнесенного к сопротивлению линии, при двухфазных (а) и трехфазных (б) КЗ

Определение места КЗ выполняется на основе сравнения вычисленной с учетом вида КЗ удаленности точки повреждения от места установки защиты $l_{кз}$ со скорректированной длиной защищаемой линии $K_k \cdot l_{л}$. Корректирующий коэффициент K_k вводится для достоверного установления места КЗ с учетом имеющихся погрешностей. При двухфазных КЗ $l_{кз}$ рассчитывается путем проведения операций с токами и напряжениями поврежденных фаз. При трехфазных КЗ вычисления производятся для всех петель повреждения l_{AB} , l_{BC} , l_{CA} , а $l_{кз}$ определяется по двум наименьшим из них – l_{1min} и l_{2min} :

$$l_{кз} = \frac{1}{2} \cdot (l_{1min} + l_{2min}). \quad (3)$$

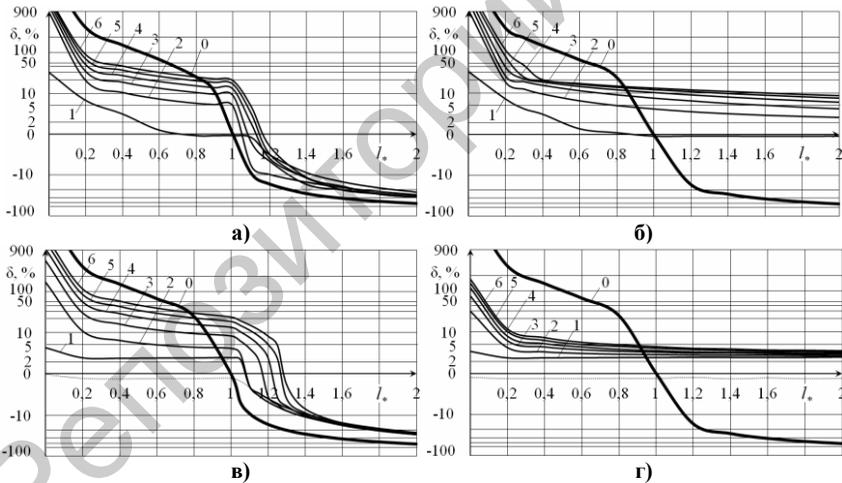
Для определения l_{AB} , l_{BC} , l_{CA} используется дистанционный принцип измерения составляющих комплексного сопротивления поврежденной петли. С целью снижения влияния переходного сопротивления на расчетную удаленность, искомое расстояние вычисляется по значению реактивной составляющей X_{ij} входного сопротивления, определяемой на основе синусных и косинусных ОС токов i_{sij} , i_{cij} и напряжений u_{sij} , u_{cij} в поврежденной петле

$$X_{ij} = \frac{u_{sij}i_{cij} - u_{cij}i_{sij}}{i_{sij}^2 + i_{cij}^2}, \quad (4)$$

$$l_{ij} = \frac{X_{ij}}{x_{уд}}, \quad (5)$$

где $x_{уд}$ – удельное реактивное сопротивление линии.

Функция ОМКЗ реализуется на временном интервале существования КЗ и запускается сработавшими ИОТ третьей ступени. Для оценки работоспособности метода были выбраны время определения $l_{кз}$ и относительная погрешность δ (рисунок 5).



0 – кривая предельных погрешностей; 1 – металлические КЗ;

2, 3, 4, 5, 6 – КЗ через переходное сопротивление с $R_d = 2, 4, 6, 8, 10$ Ом соответственно

Рисунок 5. – Относительные погрешности определения $l_{кз}$ при трехфазных (а, б) и двухфазных (в, г) КЗ в режимах максимальных нагрузок (а, в) и холостого хода (б, г)

Наличие переходного сопротивления R_d в месте КЗ обуславливает увеличение δ . Кривая предельных погрешностей ограничивает область допустимых значений δ , при которых обеспечивается достоверное ОМКЗ. Реально существующие погрешности $|\delta| > |\delta_{пр}|$ при КЗ на участке $l_* > 1$ определяют

зону неселективной работы защиты. Ее устранение обеспечивается выбором корректирующего коэффициента $K_k < 1$. Установлено, что предложенный алгоритм ОМЗ обеспечивает фиксацию места повреждения за (0,02–0,03) с как при металлических, так и при дуговых КЗ (рисунок 6). Исходя из полученных уровней δ для различных режимов работы линии и видов КЗ и с учетом влияющих факторов можно принять $K_k = 0,95$.

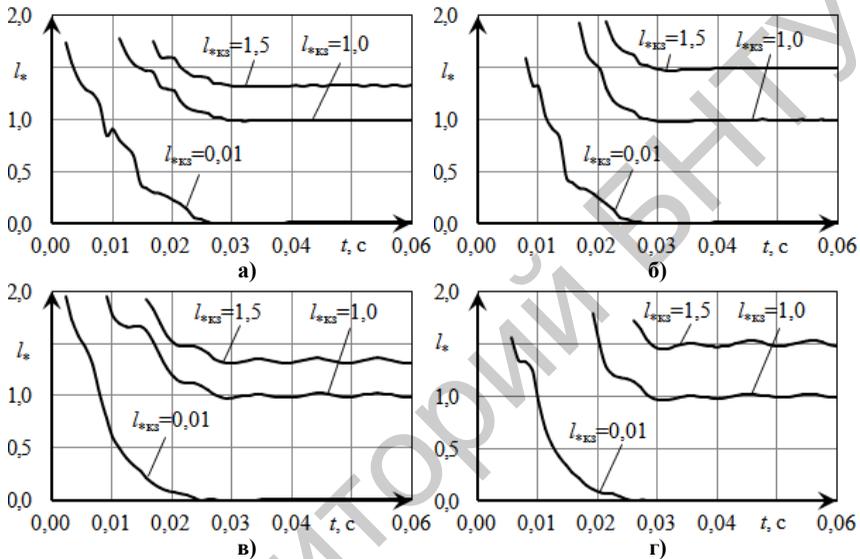


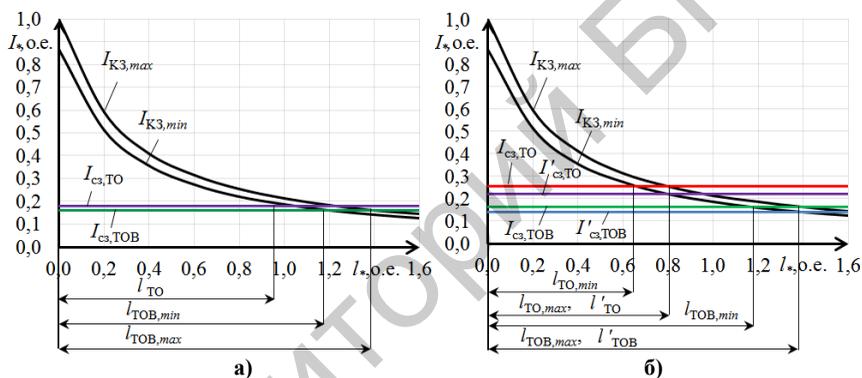
Рисунок 6. – Динамические характеристики алгоритма ОМЗ при трехфазных (а, б) и двухфазных (в, г) КЗ в режимах максимальных нагрузок (а, в) и холостого хода (б, г)

В четвертой главе изложено краткое описание информационного и математического обеспечения вычислительного эксперимента, выполнено исследование работоспособности, правильности функционирования, защитоспособности и чувствительности микропроцессорной токовой защиты линии в нормальных и аварийных режимах методом вычислительного эксперимента.

Основой вычислительного эксперимента послужил программный комплекс, включающий в себя компьютерные программы, реализующие математическую модель сети (разработана на кафедре «Электрические станции» БНТУ под руководством д.т.н., профессора В. И. Новаша) и алгоритм функционирования и математическую модель защиты (разработана соискателем).

Для оценки технического совершенства токовой защиты линии определялись: селективность действия (ТО, ТОВ и МТЗ); зона действия (ТО, ТОВ); быстродействие (ТО); чувствительность (ТОВ, МТЗ). Установлено, что для первой конфигурации при металлических КЗ зона мгновенного отключения

первой ступени составляет 95 % от длины линии независимо от вида КЗ и режима работы сети (рисунок 7, а). При этом по сравнению с защитой традиционного исполнения обеспечивается расширение зоны действия ТО не менее чем на 21 % при трехфазных и 47 % при двухфазных КЗ. При дуговых КЗ, в пределах работоспособности метода определения вида КЗ, обеспечивается охват ТО не менее 75 % от длины линии при трехфазных и 70 % при двухфазных КЗ в режиме максимальных нагрузок, а так же не менее 86 % при трехфазных и 91 % при двухфазных КЗ в режиме холостого хода. Для второй конфигурации при двухфазных КЗ обеспечивается расширение зоны действия ТО до 22 % и ТОВ до 19 % (рисунок 7, б). Чувствительность ТОВ возрастает примерно в 1,15 раз. В зависимости от вида КЗ обеспечивается повышение чувствительности МТЗ до 3 раз.



а) первая конфигурация; б) вторая конфигурация
Рисунок 7. – К определению зоны мгновенного отключения

На основе анализа временных зависимостей моментов срабатывания и возврата ИОТ установлено, что все ступени защиты работают селективно, а их измерительные органы надежно возвращаются в исходное состояние после отключения КЗ (рисунки 8–11, $SR1'$ и $SR2'$ – признаки срабатывания ИО первой и второй ступеней защиты для первой конфигурации; $SR1''$, $SR2''$ – же для второй конфигурации; $SR3$ – признак срабатывания ИОТ третьей ступени, время начала КЗ $t_{K3} = 0,05$ с). Максимальное время срабатывания ИОТ первой ступени, фактически определяющее быстродействие ТО, составляет порядка 0,03 с при КЗ в конце защищаемой линии для первой конфигурации ($l_{TO} = 95\%$) и не более 0,026 с при КЗ в конце зоны действия ТО для второй ($l_{TO} \approx 80\%$). На основе полученных результатов установлено, что вид и место КЗ в алгоритме функционирования защиты определяется достоверно, что обеспечивает ее правильное функционирование во всех режимах работы защищаемой линии.

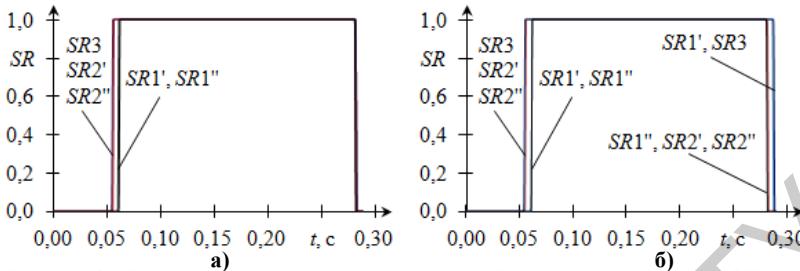


Рисунок 8. – Временные диаграммы моментов срабатывания и возврата ИОТ при трехфазном (а) и двухфазном (б) КЗ в начале защищаемой линии и после его отключения

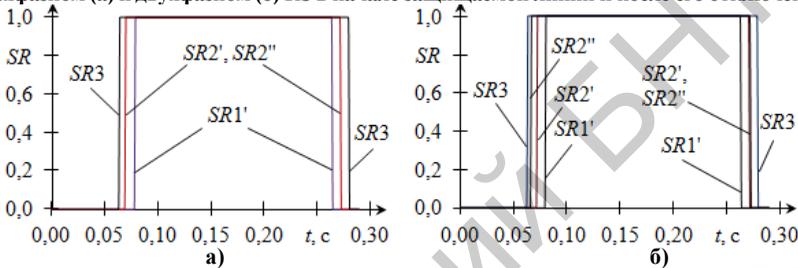


Рисунок 9. – Временные диаграммы моментов срабатывания и возврата ИОТ при трехфазном (а) и двухфазном (б) КЗ в конце защищаемой линии и после его отключения ($I_* = 0,95$)

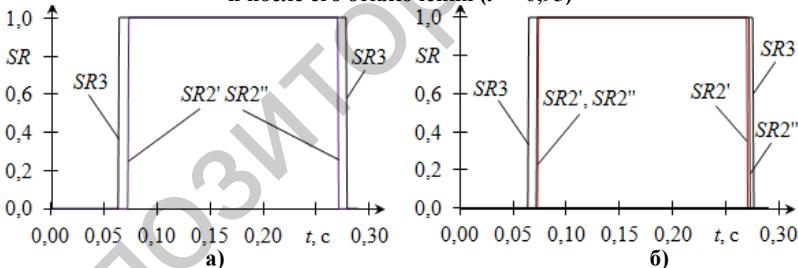


Рисунок 10. – Временные диаграммы моментов срабатывания и возврата ИОТ при трехфазном (а) и двухфазном (б) КЗ в начале смежной линии и после его отключения ($I_* = 1,05$)

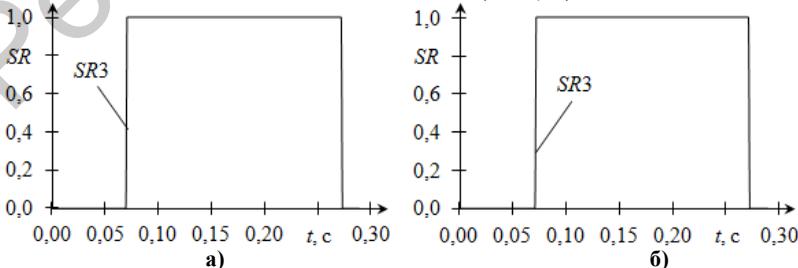


Рисунок 11. – Временные диаграммы моментов срабатывания и возврата ИОТ при трехфазном (а) и двухфазном (б) КЗ в конце смежной линии и после его отключения

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации выполнен комплекс научно-технических исследований, направленных на совершенствование микропроцессорных токовых защит линий распределительных сетей от междуфазных коротких замыканий и повышение эффективности их функционирования за счет реализации в них функций определения вида и места повреждения.

Основные научные результаты диссертации

В соответствии с поставленной целью в процессе выполнения диссертационных исследований были получены следующие основные научные и практические результаты.

1. Разработан принцип выполнения микропроцессорной токовой защиты линий распределительных сетей, основанный на учете вида и места короткого замыкания [4, 11, 12, 14]. Установлено, что его реализация позволяет: увеличить чувствительность медленнодействующих ступеней защиты к удаленным двухфазным повреждениям путем их оперативного выявления и соответствующего изменения уставок ступеней защиты [1, 2, 4–8, 11, 12]; расширить зону действия быстродействующей ступени защиты и обеспечить ее независимость от режима работы сети и вида повреждения благодаря учету информации о месте повреждения [3, 4, 10–13].

2. Разработан алгоритм функционирования микропроцессорной токовой защиты линий распределительных сетей, отличающийся наличием функций определения вида и места повреждения. При этом обеспечивается повышение технического совершенства предлагаемой защиты по сравнению с существующими отечественными и зарубежными защитами аналогичного назначения независимо от наличия или исправности цепей напряжения, для чего реализуется две конфигурации ее работы. Первая конфигурация доступна при наличии в месте установки защиты измерительных трансформаторов напряжения и их исправности. В этом случае функции определения вида и места повреждения введены в действие. Если цепи напряжения отсутствуют или неисправны, защита автоматически изменяет конфигурацию на вторую и функционирует только с выявлением вида повреждения. Установлено, что вид и место КЗ в алгоритме функционирования защиты определяются достоверно, обеспечивая ее селективное действие и правильное функционирование во всех режимах работы защищаемой линии [1, 3, 4, 12].

3. Установлено, что для первой конфигурации защиты обеспечивается расширение зоны мгновенного отключения быстродействующей ступени до 95 % от длины линии независимо от вида короткого замыкания и режима работы сети в случае металлических КЗ и охват не менее 70 % длины линии при наличии переходного сопротивления в месте повреждения [3, 4, 10–12]. Для второй конфигурации защиты зоны действия первой и второй ступеней при двухфазных КЗ увеличиваются до значений при трехфазных.

При этом по сравнению с защитой традиционного исполнения обеспечивается расширение зоны действия первой ступени не менее чем на 21 % при трехфазных и на 47 % при двухфазных КЗ для первой конфигурации защиты и до 22 % при несимметричных повреждениях для второй, а наибольшее время срабатывания указанной ступени не превышает 0,03 с [4, 12]. Зона действия второй ступени при двухфазных КЗ расширяется до 19 %, а ее чувствительность возрастает примерно в 1,15 раз. Независимо от выбранной конфигурации обеспечивается повышение чувствительности третьей ступени защиты до 3 раз [1, 4, 12].

4. Результаты, полученные методом вычислительного эксперимента, который на стадии разработки является альтернативой дорогостоящих и не всегда возможных натурных испытаний, подтверждают работоспособность, правильность функционирования и высокие показатели технического совершенства предлагаемой микропроцессорной токовой защиты линий распределительных сетей в нормальных и аварийных режимах работы. Для проведения вычислительного эксперимента была разработана компьютерная программа, реализующая алгоритм функционирования и математическую модель защиты [1, 2–5, 12].

5. Показано, что предложенная совокупность научно-технических решений может быть реализована в существующих микропроцессорных токовых защитах линий путем корректировки программной части защит без значительного изменения их структуры, функциональных блоков и частей [14].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Полученные при выполнении диссертационных исследований результаты, технические и алгоритмические решения:

– используются в учебном процессе БНТУ на кафедре «Электрические станции» при выполнении курсовых работ по дисциплине «Релейная защита и автоматика» и дипломных проектов по специальности «Релейная защита и автоматика», что подтверждается соответствующим актом (приложение В);

– использованы при выполнении ГПНИ «Энергобезопасность и надежность энергоснабжения» для повышения чувствительности и защитоспособности токовых защит линий 6–35 кВ (акт о внедрении, приложение Г)

– переданы предприятию ОАО «Белэлектромонтажнадка» для повышения технического совершенства выпускаемых микропроцессорных терминалов защиты линий распределительных сетей (получена справка о возможном практическом использовании результатов исследования, приложение Д).

Также полученные результаты могут быть рекомендованы для использования и реализации: в проектных, научно-исследовательских, опытно-конструкторских и других организациях, осуществляющих проектирование, исследование и разработку новых устройств релейной защиты с улучшенными техническими характеристиками.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в изданиях, включенных в перечень научных изданий ВАК Республики Беларусь

1. Романюк, Ф. А. Определение вида повреждения на линиях распределительных сетей в объеме функций микропроцессорных токовых защит / Ф. А. Романюк, А. А. Тишечкин, Е. В. Булойчик // Энергетика – Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ : международный научно-технический и производственный журнал. – 2011. – № 4. – С. 5–10.

2. Романюк, Ф. А. Исследование микропроцессорной токовой защиты линий распределительных сетей / Ф. А. Романюк, Е. В. Булойчик // Энергетика – Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ : международный научно-технический и производственный журнал. – 2011. – № 6. – С. 5–11.

3. Романюк, Ф. А. Определение места короткого замыкания на линиях радиальных сетей с односторонним питанием / Ф. А. Романюк, А. А. Тишечкин, Е. В. Булойчик // Наука и техника : международный научно-технический журнал. – 2012. – № 4. – С. 69–73.

4. Булойчик, Е. В. Исследование микропроцессорной токовой защиты линий с улучшенными показателями технического совершенства / Е. В. Булойчик // Наука и техника : международный научно-технический журнал. – 2014. – № 3. – С. 60–64.

Статьи в других изданиях

5. Romaniuk, F. Ocena porównawcza a metod lokalizacji zwarć niesymetrycznych w sieciach rozdzielczych / F. Romaniuk, E. Buloiychyk, P. Węgierek // Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review). – 2012. – R. 88 NR 7a. – С. 319–320.

6. Романюк, Ф. А. Перспективные направления повышения технического совершенства микропроцессорных токовых защит линий распределительных сетей / Ф. А. Романюк, Е. В. Булойчик // Перспективные материалы и технологии : сб. статей Международного научного симпозиума, Витебск, 24–26 мая 2011 г. / Витебский гос. технолог. ун-т. – Витебск, 2011. – С. 60–62.

Материалы конференций и тезисы докладов

7. Булойчик, Е. В. Оценка методов определения видов повреждения на линиях распределительных сетей / Е. В. Булойчик // Наука – образованию, производству, экономике : материалы Девятой междунар. науч.-техн. конф., Минск, 19–27 апр. 2011 г. : в 4 т. / Белорус. нац. техн. ун-т ; редкол.: Б. М. Хрусталев, Ф. А. Романюк, А. С. Калиниченко. – Минск, 2011. – Т. 1. – С. 59–60.

8. Romaniuk, F. A. Determination of short circuit type on distribution networks lines / F. A. Romaniuk, E. V. Buloiychyk // New Electrical and Electronic

Technologies and their Industrial Implementations : 7th International Conference, Zakopane, Poland, June 28–July 1 / Lublin University of Technology. – Zakopane, 2011. – P. 43.

9. Булойчик, Е. В. Формирование ортогональных составляющих входных сигналов в микропроцессорной токовой защите линий от междуфазных коротких замыканий / Е. В. Булойчик // Энергосбережение – важнейшее условие инновационного развития АПК : материалы международной научно-технической конференции, Минск, 24–25 ноября 2011 г. / Белорус. гос. аграрный техн. ун-т ; под ред. М. А. Прищепова. – Минск, 2011. – С. 93–96.

10. Романюк, Ф. А. Определение места короткого замыкания на линиях распределительных сетей с односторонним питанием / Ф. А. Романюк, Е. В. Булойчик, А. А. Тишечкин, Е. В. Глинский // Наука – образованию, производству, экономике : материалы Десятой междунар. науч.-техн. конф., Минск, 10–26 апр. 2012 г. : в 4 т. / Белорус. нац. техн. ун-т ; редкол.: Б. М. Хрусталеv, Ф. А. Романюк, А. С. Калиниченко. – Минск, 2012. – Т. 1. – С. 26.

11. Булойчик, Е. В. Повышение технического совершенства токовой защиты линий распределительных сетей / Е. В. Булойчик, А. А. Тишечкин, Е. В. Глинский // Наука – образованию, производству, экономике : материалы Одиннадцатой междунар. науч.-техн. конф., Минск, 10–26 апр. 2013 г. : в 4 т. / Белорус. нац. техн. ун-т ; редкол.: Б. М. Хрусталеv, Ф. А. Романюк, А. С. Калиниченко. – Минск, 2013. – Т. 1. – С. 32–33.

12. Булойчик, Е. В. Повышение технического совершенства токовой защиты линий распределительных сетей / Е. В. Булойчик // Электроэнергетика. Энергия-2014 : материалы Девятой междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Иваново, 15–17 апр. 2014 г. : в 7 т. / Ивановский гос. энергетический ун-т имени В. И. Ленина ; сост. А. В. Макаров. – Иваново, 2014. – Т. 3, Ч. 1. – С. 155–158.

13. Булойчик, Е. В. Критерии определения места короткого замыкания на линиях распределительных сетей с односторонним питанием / Е. В. Булойчик, Ю. В. Гавриелок, А. С. Беседа // Наука – образованию, производству, экономике : материалы Двенадцатой междунар. науч.-техн. конф., Минск, 10–23 апр. 2014 г. : в 4 т. / Белорус. нац. техн. ун-т ; редкол.: Б. М. Хрусталеv, Ф. А. Романюк, А. С. Калиниченко. – Минск, 2014. – Т. 2. – С. 190–191.

Патенты

14. Устройство для токовой защиты от междуфазных коротких замыканий элементов электроэнергетических систем с односторонним питанием : пат. 15999 Респ. Беларусь : МПК (2006.01) H 02N 3/08, H 02N 3/20 / Ф. А. Романюк, А. А. Тишечкин, Е. В. Глинский, Н. Н. Бобко, Е. В. Булойчик : заявитель Белорус. нац. тех. ун-т. – № а 20100618; заявл. 23.04.2010 ; опубл. 30.06.2012 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2012. – № 3. – С. 183.

РЭЗІЮМЭ

Булойчык Алена Васільеўна

**ПАВЫШЭННЕ АБАРОНАЗДОЛЬНАСЦІ І АДЧУВАЛЬНАСЦІ
МІКРАПРАЦЭСАРНАЙ ТОКАВАЙ ЗАСЦЯРОГІ ЛІНІЙ
РАЗМЕРКАВАЛЬНЫХ СЕТАК**

Ключавыя словы: рэлейная засцярога, мікрапрацэсарная токавая засцярога, токавая адсечка імгненнага дзеяння, максімальная токавая засцярога, тэхнічная дасканаласць, выяўленне віду кароткага замыкання, выяўленне месца кароткага замыкання, вылічальны эксперымент.

Мэта даследаванняў: павышэнне адчувальнасці і абароназдольнасці мікрапрацэсарных токавых засцярог ліній размеркавальных сетак.

Метады даследаванняў: матэматычнае і кампутарнае мадэляванне, тэарэтычны аналіз, вылічальны эксперымент.

Атрыманыя вынікі і іх назвіна: распрацаваны прынцып выканання і алгарытм функцыянавання мікрапрацэсарнай токавай засцярогі ліній размеркавальных сетак 6–35 кВ на аснове уліку віду і месца КЗ. Распрацаваны новы метады выяўлення двухфазных кароткіх замыканняў на лініях размеркавальных сетак на аснове адноснай несіметрыі токаў фаз, які забяспечвае павышэнне адчувальнасці маруднадзеючых ступеняў засцярогі да несіметрычных КЗ. На прыкладу токавай засцярогі з выкарыстаннем дадзенага метаду атрыманы патэнт Рэспублікі Беларусь на вынаходства. Прапанаваны метады вызначэння месца пашкоджання, які забяспечвае пашырэнне зоны дзеяння хуткадзеючай ступені засцярогі і яе незалежнасць ад рэжыму працы сеткі і віду пашкоджання.

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, што пацвярджаецца атрыманай даведкай аб магчымым практычным выкарыстанні вынікаў даследавання ад ААТ «Белэлектра-мантажналадка». Атрыманыя вынікі выкарыстоўваюцца ў навучальным працэсе кафедры «Электрычныя станцыі» БНТУ з мэтай павышэння якасці падрыхтоўкі спецыялістаў.

РЕЗЮМЕ

Булойчик Елена Васильевна

**ПОВЫШЕНИЕ ЗАЩИТОСПОСОБНОСТИ
И ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ МИКРОПРОЦЕССОРНОЙ ТОКОВОЙ
ЗАЩИТЫ ЛИНИЙ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ**

Ключевые слова: релейная защита, микропроцессорная токовая защита, токовая отсечка мгновенного действия, максимальная токовая защита, техническое совершенство, определение вида короткого замыкания, определение места короткого замыкания, вычислительный эксперимент.

Цель исследований: повышение чувствительности и защитоспособности микропроцессорных токовых защит линий распределительных сетей.

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

Полученные результаты и их новизна: разработаны принцип выполнения и алгоритм функционирования микропроцессорной токовой защиты линий распределительных сетей 6–35 кВ на основе учета вида и места КЗ. Разработан новый метод выявления двухфазных коротких замыканий на линиях распределительных сетей на основе относительной несимметрии токов фаз, обеспечивающий повышение чувствительности медленнодействующих ступеней защиты к несимметричным КЗ. На устройство токовой защиты с использованием данного метода получен патент Республики Беларусь на изобретение. Предложен метод определения места КЗ, обеспечивающий расширение зоны действия быстродействующей ступени защиты и ее независимость от режима работы сети и вида повреждения. На устройство токовой защиты.

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, что подтверждается полученной справкой о возможном практическом использовании результатов исследования от ОАО «Белэлектромонтажналадка». Полученные результаты используются в учебном процессе кафедры «Электрические станции» БНТУ с целью повышения качества подготовки специалистов.

SUMMARY

Buloichyk Alena V.

INCREASING COVERAGE AND SENSITIVITY OF DISTRIBUTION NETWORKS LINES MICROPROCESSOR-BASED CURRENT PROTECTION

Keywords: relay protection, microprocessor-based current protection, current cutoff, overcurrent protection, technical perfection, short circuit type determination, fault location, computing experiment

The goal of research is to increase sensitivity and coverage of microprocessor-based current protection of distribution networks lines.

Methods of research: mathematics and computer simulations, theoretical analysis, computing experiment.

Obtained results and novelty: implementation principle and algorithm of functioning of microprocessor-based current protection of 6–35 kV distribution networks lines based on the determination of short circuit type and fault location was developed. A new method of two-phase short-circuit detection in distribution networks lines based on the relative asymmetry of the currents in the line phases was developed and its application improved sensitivity of slow operating protection stages to remote asymmetrical short-circuits. Invention patent for overcurrent protection device that uses this method was obtained in the Republic of Belarus. The fault location method was proposed which ensures instantaneous protection stage coverage extension and its independence of network operation mode and fault type.

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 that is confirmed by the received certificate of possible practical use of research results by JSC «Belelektromontazhnaladka». The obtained results are used in the educational process of the Belarusian National Technical University at «Power stations» department in order to improve the quality of training.

Научное издание

БУЛОЙЧИК
Елена Васильевна

**ПОВЫШЕНИЕ ЗАЩИТОСПОСОБНОСТИ
И ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ МИКРОПРОЦЕССОРНОЙ ТОКОВОЙ
ЗАЩИТЫ ЛИНИЙ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ**

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук

по специальности 05.14.02 – Электрические станции
и электроэнергетические системы

Подписано в печать 16.05.2016. формат 60×84 $\frac{1}{16}$. Бумага офсетная. Ризография.
Усл. печ. л. 1,28. Уч.-изд. л. 1,00. Тираж 85. Заказ 447.

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.